



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

Valentin Maron

► To cite this version:

Valentin Maron. 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. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris 7 - Denis Diderot, 2015. Français. <tel-01279581>

HAL Id: tel-01279581

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01279581>

Submitted on 7 Mar 2016

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 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*

Par Valentin MARON

THESE

Spécialité: Didactique des sciences physiques

Dirigée par Philippe Colin

Soutenue le 30 novembre de 2015 devant la commission d'examen constituée de:

David HAMMER, Tufts University, États-Unis	Rapporteur
Ludovic MORGE, Univ. Blaise Pascal – ACTé	Rapporteur
Cécile de HOSSON, Univ. Paris Diderot – LDAR	Examinatrice
Ricardo LOPES COELHO, FCUL, Portugal	Examineur
Cécile ROUCELLE, Univ. Paris Diderot – APC	Examinatrice
Philippe COLIN, Univ. d'Artois & Univ. Paris Diderot - LDAR	Directeur de thèse

Résumé

Ce travail propose une approche d'enseignement de la théorie newtonienne. L'une des intentions centrales est de justifier les concepts et formules qui la constituent, via un cheminement progressif permettant de les reconstruire. En particulier est visée la notion d'attraction terrestre, très souvent admise, bien qu'elle ne soit pas évidente par elle-même. L'interprétation de la chute libre comme un mouvement naturel - dans l'Antiquité et encore chez Galilée - est utilisée pour questionner la définition du concept newtonien de force. Il s'agit de mettre en évidence sa dépendance à un mouvement naturel de référence, redéfini par la première loi du mouvement, justifiant ainsi son lien à l'accélération. Cette formulation a pour but d'insister sur la définition spécifique du concept dans la théorie, afin de favoriser sa distinction des idées du sens commun sur les forces et le mouvement. D'autre part, une explicitation du raisonnement menant à relier la révolution des planètes, de la Lune, et la chute sur Terre - inspiré du cheminement de Newton - permet de justifier que la force associée à l'accélération de chute soit liée à la présence de la Terre. Elle permet de plus d'aboutir à l'idée d'attraction universelle, ainsi qu'à la formule de la force qui la quantifie. Au niveau épistémologique, le cheminement menant à relier ces différents phénomènes permet de mettre en avant le rôle d'unification d'une théorie physique. Une séquence d'enseignement a été développée sur la base de cette approche et expérimentée avec des élèves de lycée et des étudiants en première année à l'université. L'un des résultats majeurs obtenus est un intérêt très marqué pour la démarche de justification des définitions et formules.

Abstract

This work proposes a teaching approach of the Newtonian theory. One of the central intentions is to justify the concepts and formulae which constitute it, via a progressive pathway enabling to reconstruct them. In particular one of the conceptual target is the notion of terrestrial attraction, which is most of the time asserted, although it is not self-evident. The interpretation of free fall as a natural motion - in Antiquity and still to Galileo – is used to question the Newtonian concept of force. The purpose is to introduce it by showing its dependency to a natural motion of reference, redefined by the first law of motion, justifying then its relation to acceleration. This formulation aims at insisting on the specific concept definition of the theory, in order to foster its distinction from the common sense ideas about force and motion. Following this formulation of dynamics, is presented the reasoning - inspired by Newton's one - leading to the relationship between the revolution of planets, of the Moon, and free fall on Earth. This pathway enables to justify that the force associated to free fall acceleration can be associated to the presence of the Earth. It leads furthermore to the justification of the idea of universal attraction, as well as to the construction of the gravitational force expression. At the epistemological level, the pathway leading to relate these various phenomena highlights the role of unification of a physical theory. A teaching sequence has been developed on the basis of this approach and experimented with high school and first year university students. One of the results observed is a strong interest of students for the justification of concepts definitions and formulae.

Remerciements

Un grand merci à mon directeur Philippe Colin pour sa patience et ses encouragements durant ces trois années. Le plaisir pris en menant ce travail doit grandement à sa confiance, notamment à travers la liberté qu'il m'a laissée. Veillant cependant sur mes errances, la qualité de son écoute et la justesse de ses conseils m'ont bien souvent permis de traverser des brouillards, finalement bien moins menaçants après nos rendez-vous « qui-ne-devrait-pas-trop-durer » de 4 ou 5 heures d'affilée.

Un profond merci à Laurence Viennot, qui a toujours été disponible pour suivre de près mes tâtonnements et partager ses avancées. Nos échanges ont grandement nourri mes réflexions, irrigués par son indépendance d'esprit et son incrédulité sans concession. Ma gratitude s'étend de ses travaux antérieurs à ma naissance à nos plus récentes discussions. Que ce soit par la résonance de nos points de vue ou bien leurs contrastes, ce fut toujours un plaisir et un enrichissement.

Un chaleureux merci à Cécile de Hosson, pour m'avoir ouvert les portes de la recherche en didactique. Depuis son accueil lors de ma première venue, la finesse de ses cours, l'encadrement de mon mémoire de master 2, jusqu'à ce coup de fil à 21 heure, pour saisir à la volée un contrat doctoral en liberté. Je sais aussi dans quelle mesure l'atmosphère détendue et conviviale dont j'ai pu profiter au LDAR tient à son enthousiasme, sa diplomatie et son aura de bienveillance.

Ces mêmes qualités furent redoublées dans le bureau des doctorants par la présence de Robin. De sa bonne humeur quotidienne, nous aurons pu observer à quel point le sourire est contagieux. De son obsession du végétal, nous retiendrons aussi « l'essentialisme » qu'il y a dans l'identification de la menthe pour les mojitos... Du bureau à la forêt d'Helsinki, nos conversations - quitte à remettre au lendemain les objectifs du jour - furent bien souvent fertiles et toujours agréables.

A ma droite en 845A, il y eu d'abord la douceur et la gentillesse de Luz, qui m'a accueilli

et guidé à mon arrivée au laboratoire, la première à me faire découvrir la Colombie et sa culture.

A cette même place pour ma dernière année, ce fut ensuite Pablo, et sa pomme verte quotidienne de 16h00, symbole de sa discipline à toute épreuve. Nos fous rires et nos partages musicaux ont eu raison de nos divergences philosophiques et morales, jusqu'à la sagesse des collines drômoises.

Et puis bien sûr, face à la fenêtre, ouverte sur le monde : Adry - ma grande sœur colombienne - intrépide, attentionnée et authentique, qui m'a appris le sens du pragmatisme, du resto U jusqu'aux rues d'Istanbul.

Une pensée aussi pour Arturo, débordant de curiosité pendant ses six mois parmi nous, qui m'a fait connaître l'histoire et l'actualité du Mexique.

Parmi les passagers du 845A, il y eu aussi quelque temps Thomas Berger, dont la liberté d'esprit - que je connaissais bien - aura fait construire des tours de plusieurs milliers de kilomètres d'altitude (branche improbable des arbres de V), le tout sur un malentendu. Heureusement Mutmut et Georjus - les infiltrés - n'étaient jamais très loin pour nous faire redescendre sur terre.

Cet entourage et ces rencontres ont fait - peut-être pour la plus grande part - la valeur de cette expérience de thèse.

La bonne ambiance de Condorcet se prolongeait notamment jusqu'à Sophie Germain, auprès de sympathiques collègues - bien que mathématiciens pour la plupart - dont Zoé, Assia, Charlotte, Sophie, Michael, l'autre Charlotte et plus récemment Alice, Zakaria, Ines, et Leonard el Salsero. Mention spéciale pour Assia et notre plaisante coordination du groupe Jeunes Chercheurs les deux dernières années.

Merci aussi à Evelyne, Sandrine, Laetitia et Jérôme, pour leur aide toujours efficace et accueillante.

Après ceux pour qui cela valait la peine d'aller au labo, il y a ceux pour qui cela valait la peine d'en repartir. Ils ont successivement accompagné mon quotidien pendant ces trois années, chacun à leur façon, tous extraordinaires : mes supers colocs.

Elsa et ses failles temporelles, Stromae, les victoires sur nous-mêmes, After Effect, les gaufres, les surinterprétations psychanalytiques et les panacottas aux fruits rouges. . .

Yannick et la double malédiction hispanique, les Bun's, l'électropical et la gloire du jambon-faisselle. . .

Lucien et le canapé du divertissement, Vaneigem, les bières artisanales, le duel Deleuze VS Wittgenstein et l'éternel retour des flocons d'avoine...

Et enfin Lou, le bon son de l'Afrique, les couleurs, Ibeyi, les bons points pour mes fins de chapitres, les bières-debriefings du soir... sans oublier le RedBull magique de la dernière full-night de 72 heures.

Dans un rayon plus élargi, rien n'aurait eu de sens non plus sans une multitude de péripéties parallèles, avec des protagonistes sans pareil.

Mon duo de physiciens nucléaires préférés, de l'UJF à l'IRSN : Vivian et Bertrand. Vivian, partenaire Yes Man d'exploration culturelle sans garantie, le cœur toujours ouvert à l'inattendu. Bertrand, la fougue et le reflet de Miage dans les yeux, dont le lyrisme nous aura fait imaginer les projets les plus fantasques. Des descentes en otarie aux feux d'artifice des sommets, les hurlements de nos folies *résonnent dans l'éternité*.

Dans le souvenir de ces acclamations de joie, on peut encore discerner cet accent à la fois allemand et marseillais... celui de notre cosmologue favori : Heinrich. Depuis la relativité générale de Luminy à nos premiers vols au-dessus du Vercors, tant de beautés partagées !

Sur les sentiers nous menant jusqu'à Solvay, on aura aussi pu observer un improbable tube de télescope d'un 1,5 mètres, tanguer dans le sac à dos de Rémy, monté à la force de son amour pour l'astronomie. Les vacillements des galaxies observées cette nuit-là n'étaient pas dus qu'aux fluctuations du ciel.

Impossible de ne pas mentionner non plus les liens tissés avec le fil rouge du mouvement, traversant de part en part de ces trois années.

D'abord Iratze et notre alchimie d'ombres et de lumières...

Puis Florence, Fasia et Claudine, de nos explorations des profondeurs orientales jusqu'à l'éblouissement des surfaces en mouvement...

La période de fin de thèse requiert des remerciements spécifiques, pour le renfort dont elle a bénéficié.

Au début de la fin fut Guillaume, alias GuB, stagiaire aussi inattendu qu'agréable, dont l'efficacité déconcertante fut au-delà de toutes attentes. De notre repère à la BNF aux cafés sur la péniche, on aura fait une équipe de choc, merci encore !

D'autres alliés ont permis de sortir des rames supplémentaires pour accélérer la galère des derniers mois, dans l'orage précédant la deadline finale.

D'abord Martin, tranquillement depuis le train pour Grenoble entre deux répèts.

Puis Florianne, au volontariat jovial et inespéré, agrémenté de commentaires personnels sur mes références à Freud.

En parallèle, la réception progressive des portraits dessinés par Sylvain¹ redonna à chaque fois un souffle à la rédaction, en rendant visible les inspirations ayant porté le navire.

Deux autres rameurs auront été réquisitionnés : mes parents, qui ont eu ainsi l'occasion de voir l'architecture du bateau depuis l'intérieur.

Un chaleureux merci aussi à ma Mamie pour sa contribution, par sa dictée amusée de commentaires d'étudiants.

Un grand sourire également à ma grande sœur Camille, pour sa présence, sa complicité et son soutien, et un clin d'œil à mon neveu adoré Hugo, ayant triplé de taille entre le début et la fin de ce travail, tout en « faisant le fou » sur le canapé.

Merci aussi Maman pour le service orthographique sans faille, toujours à temps malgré des délais déraisonnables. Rien ne remplace une maman. Un grand merci également à ses complices, Annie d'une part, puis Léonie – professionnelle de la langue française – dont l'expertise et la fraîcheur du regard n'a rien laissé passer.

Ce marathon de relecture et de retouches de dernière minute se sera achevé avec, au-dessus de la tête, le passage de la Lune à travers notre ombre portée, cette nuit d'éclipse du 28 septembre 2015. Il était alors temps de remettre le manuscrit dans les mains de David Hammer et Ludovic Morge, que je remercie encore d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Merci aussi à Cécile Roucelle, Cécile de Hosson et Ricardo Coelho qui ont également pris le temps de lire ce manuscrit et faire partie du jury.

1. p. 29, 36, 39, 63, 137

Pour en revenir sur le travail de thèse en lui-même, il aura été une occasion d'observer la valeur de certains aspects relationnels qui, s'étant illustré dans le cadre de la recherche, le dépasse largement.

Il aura été en particulier l'occasion de confirmer à quel point la progression passe par l'écoute sincère et attentive des critiques : la reconnaissance de la valeur du regard des autres sur ses propres idées, la recherche de compréhension de la perspective avec laquelle ils les voient, et de ce que cette perspective ouvre effectivement comme nouvelles questions.

Je pense en particulier à certaines critiques de Laurence Viennot, Ricardo Coelho, Wanda Kaminsky, et Nicolas Décamp sur mon travail. C'est dans une très grande mesure grâce à la justesse de leurs remarques que ma réflexion a pu se développer et s'enrichir, même s'il m'a parfois fallu du temps pour le réaliser.

Être sincère envers soi-même et les autres en reconnaissant que l'on s'est trompé, et adapter par la suite ses choix à cette prise de conscience, m'apparaissent - encore plus nettement aujourd'hui - comme des conditions nécessaires à une évolution et des relations saines.

Enfin, mes derniers remerciements s'adressent à tous les élèves et étudiants s'étant portés volontaires pour expérimenter les différents fruits de ce travail.

Les tous premiers sur les forces et le mouvement naturel : Ana, Iale, Charlotte D., Justine, Charlotte A., Raphael, Alexandre, Tibault, Fadila, Sofiane et Jérémy.

Puis les premiers à avoir suivi la séquence complète : Alexis, Alice, Clara, Juliette, Daïanah, Eloise, Mamadou, Marthe Mélaine, Mathilde, Maxime, Riccardo, Svetlana, Werner, Yohan, Alexandra, Delphine, Laviru, Ramatoulaye et Pierre.

Et enfin les lycéens volontaires pour un stage intensif de physique newtonienne : Nihal, Valentine, Aïssita, Philippe, Cyrille, Farah, Marc-François, Louise, Paul D., Rayane, Ilias, Paul M. et Guillaume.

Au fil de ces expériences, j'ai été impressionné par la légitimité et la pertinence des doutes et des réactions exprimées, même par les plus jeunes d'entre eux. Nombreux sont les froncements de sourcils, si légers soient-ils, qui m'ont permis de réaliser effectivement la maladresse d'une formulation, le manque d'explicitation d'un exemple ou

l'ambiguïté insoupçonnée d'un terme... Ces manifestations d'incompréhension ont été autant d'indices me guidant dans l'affinement progressif de ce travail.

Autrement dit : lorsque vous ne compreniez pas bien : vous aviez en général raison, ce n'était pas assez clair.

Merci à vous tous pour votre enthousiasme, votre curiosité et votre sincérité, auxquels ce travail et ses perspectives doivent énormément. Je vous souhaite de continuer à ne jamais faire semblant de comprendre, de continuer à douter de vos professeurs, de poser des questions. A eux, aux livres, à vous-même.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements	v
Table des matières	xi
Table des figures	xix
Liste des algorithmes	xx
1 Introduction	1
1.1 La mécanique newtonienne et son aura	1
1.2 Un cheminement fondateur	3
1.2.1 Une insatisfaction comme impulsion initiale	3
1.2.2 Une approche de la gravitation	4
1.2.3 Le rôle de la dynamique	5
1.3 Problématique générale et méthodologie	7
1.4 Contenu de la thèse	8
2 Positionnements didactiques et épistémologiques généraux	11
2.1 L'intentionnalité de l'éclairage du contenu	12

TABLE DES MATIÈRES

2.2	Le rapport au sens commun	14
2.2.1	Le sens commun comme point de départ	15
2.2.2	Se relier au sens commun : état de l'art d'une intention partagée	18
2.2.3	Langage courant et langage scientifique	21
2.3	Le problème de l'interprétation	25
2.3.1	Klaassen, Davidson et le problème de l'interprétation	26
2.3.2	D'autres expressions philosophiques du problème de l'interprétation	28
2.3.3	De la vigilance à l'ambiguïté	30
2.4	Points de vue épistémologiques et conséquences didactiques	32
2.4.1	La physique et sa construction	33
2.4.2	La physique comme mises en relation	38
2.5	Autres positionnements pour la conception d'une séquence d'enseigne- ment	43
2.5.1	Aspects non évidents d'une théorie physique pour le sens commun	43
2.5.2	La motivation des élèves et la « problem posing approach » (Klaas- sen, 1995)	44
2.5.3	Le rapport à l'histoire des sciences	47
2.5.4	Des parties transmissives face à l'objurgation constructiviste . .	52
2.6	Conclusion sur les positionnements généraux adoptés	54
3	Une approche de l'enseignement de la dynamique	57
3.1	Idées des élèves & problèmes d'apprentissage visés	59
3.1.1	Des cadres théoriques d'interprétation	59
3.1.2	Synthèse des tendances majeures du sens commun	61
3.1.3	Problèmes d'apprentissage visés	64
3.2	Analyse de contenu & solutions proposées	70
3.2.1	Problèmes conceptuels dans les fondements de la théorie newto- nienne	70

3.2.2	Définition du concept de force : deux postures face au principe d'inertie	74
3.2.3	Arguments didactiques contre l'interprétation empirique	81
3.2.4	Force, explication et mise en relation	87
3.2.5	Une formulation, deux idées	92
3.2.6	La possibilité d'introduire les idées centrales par des exemples de la vie courante	94
3.3	Présentation de la séquence d'enseignement de la dynamique	96
3.3.1	Les étapes de la séquence	97
3.3.2	Schéma de synthèse	109
3.4	Synthèse des choix principaux	111
4	Une approche de l'enseignement de la théorie de la gravitation	117
4.1	Introduction	117
4.2	Idées des élèves & problème d'apprentissage visé	120
4.3	L'utilisation d'un cheminement historique	127
4.3.1	Les motivations	127
4.3.2	Analyse de l'exposition par Newton de la théorie de la gravitation	131
4.3.3	Les éléments préalables nécessaires pour une reconstruction de la théorie de la gravitation	142
4.3.4	Inspiration et écarts avec la présentation de Newton	147
4.3.5	Comparaison à d'autres séquences d'enseignement	152
4.3.6	Présentation de la séquence d'enseignement de la gravitation	157
4.3.7	Une motivation globale : la justification de l'héliocentrisme	165
4.4	Le cas de l'impesanteur	168
4.4.1	Rappel du contexte	168
4.4.2	Les étapes du problème proposé	168
4.5	Synthèse des choix principaux	174
4.5.1	Des motivations multiples pour la reconstruction de la théorie de la gravitation	174

4.5.2	La présentation explicite du cas de l'impesanteur	175
4.5.3	Des motivations pour l'étude de la théorie newtonienne	176
5	Questions de recherche et méthodologie	179
5.1	Questions de recherche	181
5.2	Activités proposées	183
5.2.1	Activités de recherche de passages dans une synthèse du cours .	184
5.2.2	Activité de reconstitution de la logique de la séquence : les puzzles de cheminement	185
5.3	Perception du cours et des activités	191
5.4	Expérimentations	193
5.5	Plan de la séquence complète dynamique et gravitation	195
6	Résultats concernant la dynamique	199
6.1	Retour d'élèves sur les choix principaux de l'approche de la dynamique	199
6.1.1	L'idée de dépendance de l'explication à une situation de référence	200
6.1.2	L'utilisation de la contradiction historique pour questionner la définition précise du concept de force	203
6.1.3	La formulation de la première loi comme redéfinition du mouve- ment naturel de référence	206
6.1.4	La justification de l'interprétation de la chute libre en terme de force	208
6.1.5	L'usage de la notion de circonstances physiques associées à l'ac- céleration	209
6.1.6	Le caractère instantané de la relation $F(t) = ma(t)$	210
6.1.7	La définition proposée d'un référentiel galiléen à partir de la no- tion de circonstances physiques	211
6.1.8	Les difficultés des 1 ^{ère} S avec le formalisme mathématique	213
6.2	Résultats aux questionnaires sur la perception de l'approche de la dyna- mique	215
6.2.1	Lycéens : perception des différents aspects du cours	215

6.2.2	L1 physique : l'approche proposée aurait-t-elle été accessible au lycée?	217
6.2.3	L1 physique : ressentis des étudiants à propos des deux approches de la dynamique suivies à l'université	218
6.3	A1 - Activité de recherche de passages dans la synthèse du cours	219
6.3.1	Méthodologie d'évaluation des réponses des élèves	220
6.3.2	Synthèse des résultats obtenus pour chaque question	221
6.3.3	Perception de l'activité A1	227
6.4	A2 - Activité de reconstitution de la logique de la séquence : puzzle de cheminement	229
6.4.1	Catégorisation des productions d'élèves	230
6.4.2	Statistique globale des résultats obtenus	232
6.4.3	Statistique obtenue pour chaque emplacement du puzzle	234
6.4.4	Comparaison des puzzles en binômes	240
6.4.5	Perception de l'activité A2	242
6.5	Synthèse des résultats majeurs relativement aux questions de recherche	244
6.5.1	Compréhension de la logique globale du cours sur la dynamique	244
6.5.2	Justification des aspects non évidents	247
6.5.3	Perception de cours sur la dynamique	248
7	Résultats concernant la gravitation	251
7.1	Retours d'élèves concernant le contenu du cours sur la gravitation	251
7.1.1	Comparaison des statistiques globales obtenues pour les différentes parties du cours	251
7.1.2	Le statut de la troisième loi de Kepler	254
7.1.3	La comparaison entre l'accélération de la Lune et l'accélération de chute verticale	255
7.2	Résultats aux questionnaires sur la perception de l'approche de la gravitation	261
7.2.1	L1 physique : quelle différence avec les cours suivis au lycée sur ce sujet?	261

TABLE DES MATIÈRES

7.2.2	L1 physique : l'approche proposée aurait-t-elle été accessible au lycée?	262
7.3	A3 - Activité de recherche de passages dans la synthèse du cours	263
7.3.1	Synthèse des résultats obtenus pour chaque question	264
7.3.2	Statistique globale sur l'activité A3	269
7.3.3	Perception de l'activité A3	270
7.4	A4 - Activité de reconstitution de la logique de la séquence : puzzle de cheminement	272
7.4.1	Statistique globale des résultats obtenus	273
7.4.2	Statistique obtenue pour chaque emplacement du puzzle	275
7.4.3	Comparaison des puzzles en binômes	275
7.4.4	Perception de l'activité A4	277
7.5	Problème sur l'impesanteur	279
7.6	Synthèse des résultats majeurs relativement aux questions de recherche	282
7.6.1	Compréhension de la logique globale du cours sur la gravitation	282
7.6.2	Justification des aspects non évidents	284
7.6.3	Perception du cours sur la gravitation	285
7.7	Résultats sur la perception de l'approche globale de la séquence	286
	Conclusion	293
	Annexes	305
	A Diaporama de support de la séquence Dynamique et Gravitation	309
	B Synthèse de la séquence Dynamique et Gravitation - partie 1	353
	C Synthèse de la séquence Dynamique et Gravitation - partie 1 - Version lycéens	357

D Synthèse de la séquence Dynamique et Gravitation - partie 2	363
E Questionnaire supplémentaire sur la perception de la dynamique pour les lycéens	371
F Catégorisation pour l'activité A1	373
G Catégorisation pour l'activité A2	375
H Catégorisation pour l'activité A3	379
I Catégorisation pour l'activité A4	383
J Résultats de l'activité A2	387
K Résultats de l'activité A4	395
L Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - Lycéens	403
M Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - L1 physique, deux mois plus tard	407
N Extrait de transcription du passage : « Pourquoi la lune ne tombe pas ? »	417
Bibliographie	419

Table des figures

2.2.1	Concepts quotidiens et concepts scientifiques : comparaison (d'après Vygotski 1934/1997). Les nombres entre parenthèses renvoient aux numéros des pages où ces questions sont traitées. Reproduit de (Lhoste, 2014, p.123)	22
2.3.1	Il y a plus d'idées que de mots	31
3.1.1	« balles de jongleur identiques, à la même altitude » (Viennot, 1977) .	66
3.3.1	Expérience des chariots de sable	102
3.3.2	Deux chariots de sable de masse variable	104
4.2.1	« Students' "Tree of referential chains" which presents possible mistaken interpretations of the reality observed inside a coasting satellite. Numbers label information sources : 1 -the present study ; 2- Galili, 1993 ; 3 -Minstrel, 1982 ; 4- Watts, 1982 ; 5 - Ruggiero et al., 1985 ; 6 - Noce et al., 1988 ; 7 - Mayer, 1987 ; 8 - Kruger et al., 1990 ; 9 - Berg et al., 1991 ; 10 - classroom discussions followed the test of this study [level : intermediate, high school and college students]. » (Galili, 1995a) . . .	123
4.3.1	Système de Tycho Brahe (extrait de (Lindemann, 1999))	166
4.4.1	De la chute au sol à la révolution	172
5.2.1	Activité 2 - Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton et éléments correspondants	188
5.2.2	Activité 4 - Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle et éléments correspondants	190
5.3.1	Tableau de réactions (extrait)	192

TABLE DES FIGURES

6.1.1	Passage de la synthèse sur la définition du vecteur accélération	214
6.4.1	A2 - Statistique des réponses dans chaque catégorie pour chacun des emplacements du puzzle dynamique, pour le groupe de L1 physique, lors de la résolution individuelle.	236
6.4.2	A2 - Statistique des réponses dans chaque catégorie pour chacun des emplacements du puzzle dynamique, pour le groupe témoin de L1 physique, n'ayant pas suivi la séquence.	237
6.4.3	A2 - Statistique des réponses dans chaque catégorie pour chacun des emplacements du puzzle dynamique, pour le groupe de L1 physique, lors de la résolution individuelle.	238

Illustrations : Sy Graham
sygraham.com

Chapitre 1

Introduction

1.1 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.

2.1 L'intentionnalité de l'éclairage du contenu

La possibilité même d'une réflexion sur la conception d'une séquence d'enseignement repose sur un point de vue essentiel : l'idée qu'un contenu de savoir puisse se présenter sous différents aspects selon la façon dont on choisit de l'aborder. L'image du paysage proposée par Laurence Viennot est particulièrement parlante à ce propos :

« The body of knowledge on which scholars agree at a given time could be regarded as a landscape which can be lit from different angles, observed from different perspectives and travelled by different paths. There is a wide choice, therefore a need for a decision, which will be by no means innocuous, in order to define the conceptual targets of a given teaching sequence. (Viennot, 1999)

Ce choix des cibles conceptuelles - et ainsi « d'éclairage du contenu » - est en particulier orienté par la prise en compte des idées et modes de raisonnement communs des élèves sur le sujet, et influe fortement sur la manière dont il peut être présenté.

« There is a strong mutual relationship between the 'staging' of a science content for teaching and the chosen spotlighting of this content, in other words the aspects of this content that have been chosen as central in the aimed-for comprehension. The "what" and the "how" of teaching overlap. Their links should be examined in the light of learners' common conceptions and ways of reasoning, as well as of a thorough content analysis ; this without losing sight of the distance existing between the learner's conceptual starting point and the targeted understanding. »(Viennot, 2009)

Un point de vue très proche est revendiqué par Duit et al. (1997) dans leur programme de recherche « Model of Educational Reconstruction », en s'appuyant sur un positionnement épistémologique :

« Our approach is based on a constructivist epistemological position that assumes that there is no such thing as the "true" content structure of a particular content area. What is commonly called the science content structure is seen as the consensus of a particular science community. Every presentation of this consensus, including the presentations in the leading textbooks, is an idiosyncratic reconstruction of the authors informed by the specific aims they explicitly or implicitly hold. In our research program the approach of students' perspectives and conceptions being idiosyncratic cognitive constructs is applied to scientific theories and concepts as well.

Issues of the content's significance from the science perspective and from students' perspectives are intimately interconnected. Furthermore, it is a key assumption of ours that the curriculum developers' awareness of the students' point of view may substantially influence the reconstruction of a particular science content in that the different point of view improves the researchers' understanding of the referring science content. » (Duit et al., 1997)

L'ensemble des idées exprimées dans les citations précédentes a une importance centrale dans ce travail, relativement à l'activité de conception d'une séquence d'enseignement. Elles seront remises en avant et illustrées par les différents choix d'éclairage de la dynamique et de la gravitation, dans les chapitres 3 et 4. Ces choix seront justifiés d'une part par une revue et interprétation des problèmes d'apprentissage, basées sur un certain nombre de prises de position vis à vis du sens commun, qui seront abordés dans la section suivante, 2.2. Ces problèmes seront mis en perspective avec des objectifs explicites d'enseignement, liés à des positionnements épistémologiques généraux, développés en 2.3.

Les prises de positions didactiques et épistémologiques présentées comme « générales » dans la suite de ce chapitre signifient qu'elles sont au moins communes à l'ensemble du contenu physique en jeu dans cette recherche. De même que les propos généraux sont souvent avancés en référence implicite à des exemples précis, ici aussi ces points de vue formulés de manière autonome sont choisis et synthétisés à partir de la réflexion sur l'enseignement et l'apprentissage de la mécanique newtonienne. Leur importance est donc relative à ce contenu particulier, et pourrait s'avérer moins pertinente pour l'étude d'un autre sujet. Il s'agit donc de positionnements généraux au sens de non spécifiques à un élément précis du contenu, mais tout de même relative à l'étude d'ensemble de la mécanique newtonienne.

Cette posture sur la généralisation fait écho au premier paragraphe d'un des tout premiers articles de recherche en didactique de la physique :

« Cet exposé se situe dans le cadre limité d'une matière : la physique. On rencontrera sans doute, en chemin, des éléments transposables à d'autres domaines de la connaissance, mais dans un premier temps, on se souciera davantage de préciser quelques points plutôt que de les insérer dans une théorie globale. » (Viennot, 1978)

D'autre part, certains points de vue considérés dans ce chapitre seront particulièrement simples, voire évidents. L'objectif est d'explicitier clairement ces bases au préalable,

afin de pouvoir s'y référer par la suite, dans l'esprit de ces mots d'ouverture de Raoul Vaneigem (1967) :

"La voie vers la simplicité est la plus complexe et, ici particulièrement, il était utile de ne pas arracher aux banalités les multiples racines qui permettront de les transplanter dans un autre terrain, de les cultiver à notre profit." (Vaneigem, 1967)

2.2 Le rapport au sens commun

Une définition du sens commun

Apprendre quelque chose implique d'acquérir une nouvelle information. Une information est nouvelle si on ne l'a pas déjà, et est donc relative à ce qui est déjà là. Sur un sujet nouveau, des aspects de ce déjà-là sont en général partagés par différentes personnes pour qui ce sujet est également nouveau. C'est ce qu'on entend généralement par l'appellation de « sens *commun* ». Il comprend toutes les perceptions, représentations, idées ou modes de raisonnement que l'on peut avoir a priori sur un sujet donné, communs avec de nombreuses personnes ayant une expérience similaire à la nôtre¹.

L'importance de la prise en compte du sens commun pour l'enseignement est consensuellement revendiquée dans le champ de la didactique des sciences. L'idée qu'une nouvelle connaissance se construise sur la base de connaissances déjà existantes - que l'on se réfère à Socrate, Bachelard ou au constructivisme - ne connaît pas d'opposant.

Laurence Viennot (1996), après une synthèse efficace des apports de Bachelard et Piaget, conclut que « ces auteurs partagent au moins l'idée que l'on construit ses connaissances à la fois « avec » et « contre » celles que l'on possède déjà », tout en réaffirmant la généralité de ce consensus, et la direction de recherche qu'il implique :

1. Ce type de formulation en terme d'information reprend une réflexion générale de Ogborn et al. (1996) sur la communication et la « différence » a son origine : « In our view, the fundamental motor of communication is that there is something known to one participant and not - or often assumed not to be - known to another. I have something to say to you, which I think - or pretend - you do not know, and this allows me to open a conversation. There is a difference between us. It may be a difference of knowledge or information. it may be a difference of interest - perhaps I want to inform you of, or recruit you to, my interest. [...] The bridging of difference, dealing with it, is what drives communication. Conversely, where there is no difference, there is no communication. Another metaphor for the same thing is that of semiotic tension. The existence of a difference creates expectations, a drive towards communication. Like an arc between oppositely charged poles, the tension produces an effect which removes its cause. »

« Par delà la variété des conjectures sur le « comment » de la construction et sur les moyens de l'orienter, cette position minimale largement partagée conduit inévitablement à une conclusion : il est préférable, lorsqu'on définit un enseignement, de connaître les idées et modes de pensée de ceux à qui on le destine. » (Viennot, 1996, p.12)

Cette base minimale étant entendue, la diversité et les subtilités commencent lorsque l'on considère plus précisément les différentes façons d'identifier, d'interpréter, de prendre en compte ou d'utiliser le déjà-là du sens commun, dans le but de favoriser l'apprentissage d'un contenu donné. En amont de ces considérations précises, qui viendront dans les chapitres suivants, plusieurs points de vue sur le rapport au sens commun sont adoptés ici de manière transversale pour l'ensemble du contenu en jeu, voire au delà pour l'enseignement de la physique.

2.2.1 Le sens commun comme point de départ

L'acquisition d'une nouvelle information, à partir d'un certain niveau de complexité, nécessite de l'appréhender *progressivement*, c'est-à-dire par étapes s'articulant de manière suffisamment cohérente. Lorsqu'une telle progression logique est nécessaire, la question se pose du point de départ sur lequel se baser.

« Pour comprendre un phénomène physique [...], il faut des points d'appui, c'est-à-dire des choses que l'on sait déjà ou que l'on est prêt à prendre en compte. » (Viennot, 2002, p.39)

Lorsqu'il s'agit d'enseigner un sujet nouveau pour des élèves, prendre comme point de départ le sens commun peut être considéré en soi comme inévitable. Pour passer d'un état à un autre d'information, il faut bien que l'on puisse s'entendre déjà sur l'état initial, à peu près commun, de ceux à qui il s'agit d'enseigner.

« the design of teaching should give high priority to making sense to pupils, capitalising and using what they know and addressing difficulties that may arise from how they imagine things to be. » (Ogborn, 1997)

De fait, ce principe a priori banal et consensuel est appliqué avec des degrés assez divers, dans l'enseignement comme dans la recherche en didactique . Sans chercher à en donner des exemples pour le moment, une façon de commencer à se situer est d'annoncer que ce positionnement - le sens commun comme point de départ de l'enseignement - sera maintenu de manière particulièrement ferme ici. Ne jamais perdre de vue cette

intention, dans les différentes formes que peuvent prendre ses applications, constitue un effort ayant structuré en grande partie ce travail de thèse.

Il s'agit, lors de l'introduction d'une nouvelle idée, de chercher à ce que la progression des étapes qui permettent d'y arriver soient *systematiquement* - dans la mesure du possible - ancrée à des faits ou significations partagés par le sens commun. Il s'agit en particulier de rattacher le discours au sens des mots dans leur usage le plus courant ou le plus intuitif, partagé par la grande majorité, indépendamment de la connaissance du vocabulaire scientifique. Si la progression logique pourra faire évoluer ces significations, cette évolution devra pouvoir être reliée à la base commune du langage courant.

Ce point de départ implique de considérer comme *légitimes* les idées et modes de raisonnement des élèves, dans la mesure où ils sont liés à cette base partagée du langage et de l'expérience commune.

« Au moins dans une partie des cas, on peut penser que le langage courant et l'expérience quotidienne ont une bonne part de responsabilité dans les convictions observées » (Viennot, 1996)

« the common-sense theory is intended to represent the way in which children and adults make sense of their experience in the world, experience which derives from the fact that humans are, among other things, material objects on a gravitating planet with a rough surface and a not very dense atmosphere. » (Bliss and Ogborn, 1993)

A ce constat correspond une attitude de recherche de compréhension des idées du sens commun, en tant que *légitimes*, dans la mesure où elles sont liées à notre environnement naturel et social commun. C'est en particulier un point de vue défendu par Lijnse (1994) :

« 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. [...] Réaliser que le système de croyances "du sens commun" des élèves concernant le monde, étant ce qu'il est, ne peut qu'être en grande partie correct, conduit à considérer qu'il y a une base commune de départ de la communication et de l'enseignement. » (Lijnse, 1994)

Lijnse (1994) se réfère notamment au philosophe du langage Davidson, et en particulier au « principe de charité ». Développé par Davidson et Quine, il s'agit d'une posture d'in-

interprétation qui consiste à considérer une impression d'incohérence, lorsque l'on cherche à interpréter le propos de quelqu'un, comme le signe d'une interprétation inapproprié.

« We make maximum sense of the words and thoughts of others when we interpret in a way that optimises agreement » (Davidson, 1984)

Autrement formulé par Lijnse :

« pour que quelqu'un soit compréhensible, on doit l'interpréter de telle manière qu'il soit très largement consistant, qu'il croie en ses vérités, et qu'il aime ce qui est bien (de point de vue de celui qui interprète). Ceci constitue, sous une forme résumée, le principe de charité de Davidson » (Lijnse, 1994)

Du côté des sciences de l'éducation, cette attitude de reconnaissance de légitimité du sens commun rejoint également le « postulat de cohérence » dont parle Favre (2010), selon lequel « chacun a de « bonnes raisons » (légitimes, valables. . .) de penser ce qu'il pense, de dire ce qu'il dit, de faire ce qu'il fait et surtout de ressentir ce qu'il ressent ».

Enfin d'un point de vue épistémologique, la posture annoncée relativement au sens commun résonne particulièrement avec cette considération plus générale de Popper (1999), insistant sur le rôle de la remise en question du sens commun pris comme point de départ.

« La science, la philosophie, la pensée rationnelle, toutes doivent partir du sens commun. Non pas, peut-être, que le sens commun soit un point de départ solide : le terme "sens commun" que j'utilise ici est fort vague ; mais parce qu'il traduit une chose vague et changeante - les instincts ou opinions de nombreux hommes, souvent adéquats ou vrais et souvent aussi inadéquats et faux. Comment une chose aussi vague et fragile que le sens commun peut-elle nous fournir un point de départ ? Je répondrai : parce que nous ne voulons ni n'essayons de construire comme le tentèrent Descartes ou Spinoza, ou Locke, Berkeley ou Kant) un système solide sur ces "fondations". Chacune de nos multiples affirmations de sens commun qu'on pourrait encore appeler notre connaissance d'arrière-plan [background knowledge] sur laquelle nous nous basons peut être mise en question et critiquée à tout instant ; souvent de telles affirmations sont critiquées avec succès et rejetées comme celle-ci, par exemple, que la terre est plate. Dans un tel cas, ou bien le sens commun est modifié par la correction, ou bien il est dépassé et remplacé par une théorie qui peut, pour un temps plus ou moins long, paraître plus ou moins "délirante" à certains. Si la compréhension d'une telle théorie suppose

trop d'instruction, elle peut même ne jamais parvenir à être intégrée par le sens commun. Mais même alors on peut exiger que nous tentions de nous rapprocher au plus près de l'idéal : **toute science, et toute philosophie, n'est autre que du sens commun éclairé. Nous partons donc d'un point fort vague, et nous construisons sur des fondations peu sûres. Mais nous pouvons progresser : nous pouvons quelquefois, suite à une critique, constater que nous nous trompions : nous pouvons apprendre de nos erreurs, du fait que nous nous rendons compte de ce que nous avons commis une erreur.** » (Popper, 1999)²

2.2.2 Se relier au sens commun : état de l'art d'une intention partagée

La volonté de prendre le sens commun comme point de départ se retrouve chez de nombreux chercheurs en didactique, sous différentes formulations.

« Work with it »

Duschl et al. (2011), analysant un grand nombre de séquences d'enseignement, font une synthèse du rapport au sens commun en jeu, sous-tendant la conception de ces séquences. Ils font la distinction entre l'approche consistant à « réparer » les conceptions erronées, et celle cherchant plutôt à « travailler avec » les idées a priori :

« In our review of science learning progressions, teaching sequences and teaching experiments it is often quite evident when the researcher(s) is working from one or the other framework of conceptual change - the misconception-based *fix it* view or the intuition-based *work with it* view. » (Duschl et al., 2011)

La littérature sur le changement conceptuel (« conceptual change ») est immense, et il ne s'agit pas de passer en revue les différentes positions théoriques à ce sujet³. Sont considérés dans cette section seulement les postures proches de celle adoptée dans ce

2. Il s'agit également d'un point de vue partagé par l'historien des sciences Max Jammer, spécialiste de la dynamique : « Science, as a whole, is unquestionably a gradual and continuous outgrowth from ordinary everyday experience. It would therefore be only natural to assume that scientific concepts, too, have their ultimate origin and foundation in the conception of everyday experience. » (Jammer, 1957, p.16)

3. depuis (Posner et al., 1982) jusqu'à (Vosniadou, 2009) et au-delà.

travail, rejoignant plutôt l'attitude de « work with it » que de « fix it » de Duschl et al. (2011), qu'ils exemplifient notamment ainsi :

« [...] students' personal perspectives and views are seen as learners' productive intuitions for understanding carbon cycling and water cycling. Therefore, the researchers' perspectives on conceptual change reflects the intuition based 'work with it' view. » (Duschl et al., 2011)

« Anchoring intuitions »

Parmi les références connues revendiquant l'utilisation productive de certaines idées du sens commun, la plus ancienne est probablement (Clement, 1987), avec l'idée d'« anchoring intuitions » :

“Students Have Anchoring Intuitions

Question 5. Is there a positive side to students' conceptions? Are there particular key examples or qualitative problem situations which are especially important to introduce and discuss in courses?

Finding 5. In addition to misconceptions, diagnostic tests and interviews show that students enter courses with useful ideas we call anchoring intuitions which are in rough agreement with accepted theory.

Implication 5. Anchors can be used as starting points for instruction as a way of making physics make sense at an intuitive level. Students should attain a greater understanding of physics ideas if they are grounded in prior intuitions whenever possible. [...] Therefore I believe it is extremely important to also identify positive aspects of naive student thinking, aspects which can be tapped and put to good use in instruction.” (Clement, 1987)

« Model of Educational Reconstruction »

Ces idées sont également fortement présentes dans le « Model of Educational Reconstruction » développé par les chercheurs allemand Duit, Komorek, Kattman et Parchman.

« The educational reconstruction model closely links considerations on the science concept structure with analyses of the educational significance of the content in question and with empirical studies on students' learning processes and interests. Students' conceptions are taken into account in a constructive perspective in reconstructing science content structure by providing answers to questions like :

- Which are the most relevant elements of the students' conceptual framework to be respected ?
 - Which opportunities are opened by certain elements of students' conceptions or perspectives ?
 - Which conceptions of students correspond with scientific concepts in such a way that they can be used for a more adequate and fruitful learning ?
- [...] **The conceptions and beliefs students bring into instruction** are not seen primarily as obstacles of learning but **as points of departure for guiding them to the science knowledge to be achieved.** » (Duit, 2007)

« Epistemological resources »

L'intention de relier l'apprentissage de notions au sens commun se retrouve également chez Hammer & Elby, en particulier sur le plan épistémologique. Ils s'intéressent à des situations courantes impliquant déjà un certain rapport à la connaissance, et pouvant être utilisés comme analogies productives pour appréhender l'introduction aux notions physiques et leur statut en tant que connaissance.

“in designing instruction and in deciding how to respond to students' reasoning, much of our thinking consists of trying to identify contexts of relevant, everyday epistemological expertise and, from there, of trying to help students apply that expertise to learning physics.” (Hammer and Elby, 2003)

Une spécificité majeure de ces travaux est l'importance accordée à l'interdépendance des niveaux conceptuel et épistémologique, et ainsi de l'apport pour la compréhension des concepts que peut permettre un point de vue suffisamment élaboré sur la connaissance.

« Students holding more sophisticated epistemological views tend to approach learning more actively and tend to acquire a better conceptual understanding. [...] Given the importance of epistemologies for learning, how can teachers foster epistemological sophistication most efficiently ? » (Louca et al., 2004)

Certaines formulations de ces chercheurs ont particulièrement nourri ce travail, dont en particulier l'idée d'*encourager l'attention à la façon de penser de tous les jours, telle qu'elle existe à travers le langage courant, et apprendre à raffiner cette pensée.* Ces directions se retrouvent explicitement dans la structure d'un cours d'introduction à la physique conçu par David Hammer, articulée autour des sections suivantes :

- « 1) Developing an **awareness of everyday thinking** ;
- 2) Learning to **refine everyday thinking** ;
- 3) Developing and committing to a principled framework.

Each section describes the epistemological objectives of that part of the course, and equally important, the contexts of everyday epistemological expertise from which we try to draw productive resources. » (Hammer and Elby, 2003) (emphases ajoutées)

L'intention de se relier à l'interprétation de situations de la vie quotidienne, telle qu'on peut les formuler dans le langage courant, rejoint tout à fait la position de Klaassen (1995) :

« Without linking up with pupils' existing uses of language it is unlikely that they arrive at a proper understanding of science. » (Klaassen, 1995, p.100)

2.2.3 Langage courant et langage scientifique

Avec le sens commun comme point de départ pour penser l'enseignement, l'apprentissage de la physique peut être interprété « comme un apprentissage à parler, au moins partiellement, de façon nouvelle du monde commun dans lequel nous vivons » (Lijnse, 1994). Une grande part de la réflexion didactique consiste ainsi en la recherche de compréhension des rapports entre langage courant et langage scientifique.

« Le formalisme enseigné ne prend en fait sa pleine efficacité que lorsque l'on a bien mesuré la distance qui le sépare des raisonnements spontanés. » (Viennot, 1978)

La contribution de Vygotski, à propos de la distinction entre concepts quotidiens et concepts scientifiques, est reconnue comme particulièrement importante à ce niveau, et a été beaucoup reprise et développée depuis.

Concepts quotidiens et concepts scientifiques

Une importante synthèse des apports de Vygotski, dans une recherche d'articulation avec ceux de Bachelard, a été effectuée par YannLhoste (2014), notamment en reprenant certaines analyses de Michel Brossard. Selon ce dernier, «Vygotski va établir que les concepts quotidiens et les concepts scientifiques se différencient par leurs lieux de naissance, leurs modes de formation, leurs trajectoires et leurs destinées » (Brossard,

2008, p.73) cité dans (Lhoste, 2014). Lhoste (2014) propose une synthèse des thèses de Vygotski selon cette catégorisation, dans le tableau reproduit ici :

	Concepts quotidiens	Concepts scientifiques
Contexte de formation	Expérience quotidienne de l'enfant (292, 371)	Situations formelles d'apprentissage. C'est dans ces situations que les élèves sont confrontés aux savoirs scientifiques historiquement produits (291)
Mode de formation	Ils sont liés à des opérations de pensée non conscientes, au sens où l'attention n'est pas portée sur ces opérations de pensée, pour organiser l'expérience quotidienne (317, 364-365)	Ils naissent en collaboration entre le professeur et l'élève. Le professeur assure le déplacement des questions spontanées des élèves vers un questionnement pertinent par rapport aux domaines scientifiques étudiés (290, 355-356, 364-365)
Caractéristiques	Ils ont une portée locale, ils sont en relation instable et partielle entre eux (275, 318) Difficile de conduire un raisonnement (une inférence réglée nécessite de pouvoir subsumer un concept sous un autre concept) (319)	Les concepts scientifiques sont organisés en système. Ils constituent un ensemble organisé de concepts portant sur un contenu spécifique, collectivement élaborés, contrôlés, ... (318) Comme ils sont organisés en système, ils permettent de conduire des raisonnements ¹⁵⁸ (318-320, 381-383, 403)
Trajectoire	Les concepts quotidiens se développent (280, 371-373)	Les concepts scientifiques ne sont pas acquis en une seule fois. Ils se développent de façon « souterraine » (280, 293, 348, 371-373)

FIGURE 2.2.1 – Concepts quotidiens et concepts scientifiques : comparaison (d'après Vygotski 1934/1997). Les nombres entre parenthèses renvoient aux numéros des pages où ces questions sont traitées. Reproduit de (Lhoste, 2014, p.123)

Plusieurs aspects présents dans ce tableau ont déjà été abordés plus haut. Un point non encore abordé est celui du caractère local des concepts quotidiens, relatifs à certaines situations de la vie courante, par opposition au caractère organisé d'un réseau de concepts scientifiques, visant une plus grande généralité. Cette localité peut faire notamment écho à la dépendance des idées et raisonnements communs aux caractéristiques de la situation considérée, un point majeur mis en évidence en particulier pour le cas de la mécanique dans (Viennot, 1978). La difficulté mentionnée de conduire un raisonnement avec les concepts quotidiens peut être nuancée, d'un autre point de vue, par l'observation d'un certain degré de cohérence et de robustesse de certains modes de raisonnement spontané. De même, le fait que les concepts quotidiens soient « en relation instable et partielle » est à nuancer par la mise en évidence de certaines tendances transversales de ceux-ci, pour des contenus a priori divers, dans les modes de pensée du sens commun.

« [...] des zones de cohérence ont bel et bien été dégagées dans ce qui pouvait apparaître comme un fatras d'erreurs inorganisées » (Viennot, 1996)

Appropriation du langage scientifique : un processus d'acculturation

Un autre point de vue intéressant de Vygotski est de considérer le savoir scientifique comme une partie de la culture, et voir ainsi l'apprentissage comme un processus d'acculturation. Cette idée est en particulier mise en avant par Driver et al. (1994) :

« Learning is seen as the process of by which individuals are introduced to a culture by more skilled members. As this happen they « appropriate » the cultural tools through their involvement in the activities of this culture » .
(Driver et al., 1994), cité par Bächtold (2012)

La familiarisation au langage scientifique constitue ainsi une étape cruciale pour appréhender les concepts en jeu.

« Ainsi, si le professeur parle le langage de la physique, et même s'il s'exprime dans des termes simples, il ne peut être immédiatement compris comme il le voudrait par les élèves qui ne connaissent pas ce langage [. . .]. »
(Lijnse, 1994)

Une analogie proposée par Vygotski pour l'appropriation du langage scientifique et celle de l'apprentissage d'une langue étrangère, comme cela est particulièrement bien synthétisé par Brossard (2008) :

« C'est en prenant comme support les concepts spontanés que l'élève pourra s'approprier les concepts scientifiques (. . .) Vygotski établit une analogie avec ce qui se passe lors de l'apprentissage d'une langue étrangère. L'apprentissage d'une langue étrangère, en effet, ne suit pas la même route que celle qui a été parcourue lors de l'acquisition de la langue maternelle : celui qui apprend une langue étrangère prend appui sur le riche réseau sémantique déjà construit lors de l'acquisition de sa langue maternelle. L'apprentissage d'une langue seconde ne suit donc pas l'ordre qui a été suivi lors de l'acquisition de la langue maternelle. **De même c'est en prenant appui sur les concepts quotidiens que l'enseignant peut introduire auprès des élèves les concepts scientifiques** et cela demeure vrai même lorsque les conceptions spontanées font obstacle (ce qui est le cas le plus fréquent) à l'acquisition des concepts scientifiques. **Les concepts spontanés vont donc être des supports pour l'appropriation des concepts scientifiques, mais des supports qui peuvent être tout à la fois des obstacles** »
(Brossard, 2008, p. 76-77) cité par Lhoste (2014).

Notion de « learning demand » et interprétation par le sens commun du langage scientifique

Se référant également à Vygotski, Leach and Scott (2002) formulent la notion de « learning demand », comme l'appréciation de la *nature* des différences entre le langage courant des élèves et le langage scientifique relatif au contenu en jeu. Parmi ces différences, ils rappellent notamment la caractéristique du langage courant comme étant le produit d'une immersion inconsciente dans un environnement physique et social, et en particulier conditionné par la nécessité de communication dans la vie quotidienne. Ils insistent par ailleurs sur le fait que le langage courant est à la fois structuré par notre interaction avec notre environnement, et structurant de notre manière d'observer et de penser les phénomènes.

« The point was made earlier that different social languages (Bakhtin, 1986) are used by specific communities of people for particular purposes. Thus a distinction can be drawn between the 'everyday' social language of day-to-day living and the 'scientific' social language which is first formally introduced in school. From birth, each one of us is immersed in an everyday social language, which has itself been shaped by the ways in which human beings perceive their environment. It is this language which provides the means for communicating with others, it provides a way of talking and thinking about the physical and social worlds that surround us, and impinge on all of our senses. In a strong sense, **everyday social language acts to shape our view of the surroundings, drawing attention to particular features and presenting those features in particular ways.** The informal or spontaneous (Vygotski 1987) concepts which constitute everyday social language include many of those which are referred to as 'alternative conceptions' in the science education literature. » (Leach and Scott, 2002) (emphase ajoutée)

A la suite de la considération précédente sur les langages quotidien et scientifique, ces auteurs avancent que cela permet également un autre type d'interprétation des conceptions des élèves, en tant que produites par la cohabitation des deux langages :

« Other 'alternative conceptions' are better viewed as products of school science learning : a social language emerges amongst science learners that draws upon features of everyday social language and the social language of school science, but is different from both. » (Leach and Scott, 2002)

Allant dans la même direction, Bliss and Ogborn (1993) mettent en avant le phénomène de projection d'idées du sens commun sur le langage scientifique, plaquant sur le vocabulaire scientifique entendu en classe, les a priori déjà là. C'est pour cette raison qu'ils cherchent à exprimer une description synthétique des idées et modes de raisonnement du sens commun (désignée par « common sense theory »), n'utilisant pas les termes également présents dans le langage scientifique.

« Forces, including gravity, are not mentioned as such in the theory, though the general term 'effort' covers some of their possible uses. It is proposed that such terms are added later to the basic natural scheme, gaining properties from the scheme rather than giving their properties to the scheme. That is, **people hear such words in use and give them meaning and roles consistent with what they already think.** » Bliss and Ogborn (1993) (emphase ajoutée)

Un tel phénomène est accentué par la polysémie fréquente des termes scientifiques utilisés, permettant leur interprétation par leur acception courante pour le sens commun.

2.3 Le problème de l'interprétation

Cette projection du sens commun sur le langage scientifique met en avant la question de l'interprétation des réponses des étudiants, phase cruciale en amont de toute entreprise de conception d'enseignement, comme le rappelle Laurence Viennot :

« This phase of interpretation is crucial because the way we try to act upon and possibly modify students' reasoning in our teaching obviously depends on the way we analyze the reasoning. It is not possible to build appropriate teaching strategies on misinterpretations of students' conceptions. » (Viennot, 1985)

Elle met en garde en particulier contre le risque d'interpréter le sens des mots utilisés par les élèves via leur définition scientifique :

« There is a general tendency to forget that students' spontaneous reasoning is not necessarily expressed in the same terms as that of physicists. [...] a concept such as « force acting on a body » is well defined in physics, always designated explicitly by the same word. On the contrary in spontaneous reasoning, students are generally not conscious of the notion they use

and may call it, sometimes indifferently, « force », « impetus », « energy », « momentum », and so on. » (Viennot, 1985)

Cette mise en garde contient une idée de bon sens à la fois des plus triviales, et en même temps d'une importance absolument fondamentale. Il s'agit de l'évidence suivante :

Lorsque l'on dit quelque chose, le sens de ce que l'on dit dépend de la signification que l'on donne aux termes qu'on utilise pour le dire.

Un problème universel de communication apparaît dès qu'il y a une polysémie possible des mots ou formulations employés, et que le sens précis est laissé implicite, étant supposé clair ou allant de soi. Le problème de l'interprétation est donc celui de la compréhension du sens d'une proposition, en cherchant à tenir compte de la signification des différents termes que son auteur-e utilise pour l'exprimer.

« L'usage des mêmes termes dans la physique telle qu'on l'enseigne et dans les explications intuitives n'est nullement le signe, ou la garantie, qu'il s'agisse des mêmes notions dans l'un et l'autre registre, ni même que l'on se soucie de leur compatibilité. » (Viennot, 1979)

2.3.1 Klaassen, Davidson et le problème de l'interprétation

Un auteur particulièrement sensible à la question de l'interprétation est Kees Klaassen, qui l'exprime ainsi :

« This problem of interpretation arises if we do not take identity of meaning for granted, if we do not assume that a speaker uses his words as we do » (Klaassen, 1995)

Il se réfère en particulier à Davidson, dont l'expression de ce problème mérite d'être rapportée ici :

« A central source of trouble is the way beliefs and meanings conspire to account for utterances. A speaker who holds a sentence to be true on an occasion does so in part because of what he means, or would mean, by an utterance of that sentence, and in part because of what he believes. (Davidson, 1984a, p.142) [T]he sentences that correspond to beliefs are (1) sentences held true by someone, and (2) sentences that have an interpretation. Someone else can know what I believe if he knows what sentences I hold true, and what those sentences mean. (Davidson, 1986a) [I]f we merely know that someone holds a certain sentence to be true, we know neither

what he means by the sentence nor what belief his holding it true represents. His holding the sentence true is thus the vector of two forces : the problem of interpretation is to abstract from the evidence [what sentences he holds true] a workable theory of meaning and an acceptable theory of belief. (Davidson, 1984a, p.196) » cité par (Klaassen, 1995)

Ce problème fondamental implique pour Klaassen une grande vigilance dans les inférences sur les idées des élèves (« believes » en anglais), telles qu'on peut en trouver dans la littérature en didactique. D'après ces considérations sur la question de l'interprétation, ce que pense un élève dépend à la fois :

- des propositions qu'il considère comme vraies,
- du sens qu'il attribue aux termes utilisés dans ces propositions.

Sans chercher à comprendre précisément la signification pour l'élève des mots ou formulations qu'il utilise, il est impossible de déduire pertinemment quelque chose sur ses « croyances », relativement à la situation concernée. Selon Klaassen, cette seconde condition manque souvent d'élucidation dans les recherches sur les idées des élèves.

« [...] if we only know which sentences someone assents to, and we cannot assume identity of meaning, then how are we to find out what her sentences mean and what she believes? My methodological criticism of a lot of research into children's thinking is that this problem of interpretation, despite quite common implicit recognition, is hardly ever explicitly mentioned, let alone properly solved. Reports in which intuitive theories are formulated, without further clarification, in terms that are also in use in science, cannot be expected to have solved the problem. » (Klaassen, 2005)

Klaassen conclut en ajoutant qu'une inférence sur ce que pense une personne n'est finalement possible que lorsque l'on sait (ou suppose) que l'on partage avec elle un certain nombre d'idées ou de croyances. La fiabilité de cette inférence dépend donc du degré de confiance que l'on a sur les idées et croyances que l'on pense partager avec la personne .

« The point is that we can only intelligibly attribute a particular belief to someone (whether or not we also hold that particular belief) against the background of related beliefs we share with that person. "If we are going to understand the speech or actions of another person, we must suppose that their beliefs are incorporated in a pattern that is in essential respects like the pattern of our own beliefs" (Davidson, 1980b). » (Klaassen, 1995)

2.3.2 D'autres expressions philosophiques du problème de l'interprétation

Morin et la nécessité de contextualisation

Le problème de l'interprétation est directement lié au constat de la polysémie. Celle-ci nécessite une contextualisation des mots employés pour pouvoir donner un sens précis à la proposition qui les emploie. L'insistance sur le contexte est particulièrement bien exprimé par Edgar Morin⁴, en ouverture du texte « Pour une réforme de la pensée » :

« Je voudrais partir d'une évidence en psychologie cognitive. Une connaissance n'est pertinente que dans la mesure où elle se situe dans un contexte. Le mot, polysémique par nature, prend son sens une fois inséré dans le texte. Le texte lui-même prend son sens dans son contexte. Ainsi une information n'a t-elle de sens que dans une conception ou une théorie. De même un événement n'est intelligible que si l'on peut le restituer dans des conditions historiques, sociologiques ou autres. On peut donc en déduire qu'il est primordial d'apprendre à contextualiser et mieux, à globaliser, i.e. à situer une connaissance dans un ensemble organisé. » (Morin, 1996)

Wittgenstein et la recherche de clarification

Plus généralement encore, la démarche de clarification du langage, amorcée par la prise de conscience du problème de l'interprétation, constitue pour Wittgenstein l'objectif même de l'activité philosophique.

« Le but de la philosophie est la clarification logique de la pensée. [...] Le résultat de la philosophie n'est pas un nombre de "propositions philosophiques", mais le fait que des propositions s'éclaircissent. La philosophie a pour but de rendre claires et de délimiter rigoureusement les pensées qui autrement, pour ainsi dire, sont troubles et floues. » (Wittgenstein, 1921) Tractatus logico-philosophicus, 4.112

4. penseur français de la complexité et du constructivisme épistémologique



Ludwig Wittgenstein

Deleuze et l'importance du « en tant que »

Pourfendeur des « wittgensteiniens »⁵, Deleuze est au moins d'accord avec Wittgenstein sur cette recherche de clarification du langage. Cela apparaît notamment dans son insistance sur la spécification d'une signification particulière d'un terme, par l'usage du « en tant que », précisant et explicitant le point de vue par lequel le mot ou l'objet est considéré dans la proposition en question. On peut l'observer par exemple dans cet extrait de son cours sur Spinoza :

« [...] tous les êtres sont égaux, en tant que quoi ? De quel point de vue ? En tant que quoi ? Qu'est ce que cela veut dire alors, une pierre et un sage, un cochon et un philosophe ça se vaut ? Il suffit de dire *en tant que quoi*. Bien sûr, ça se vaut. En tant qu'existence, ça se vaut ; ça se vaut. Et là, Spinoza ne renoncera jamais à ça. Il le dira formellement, le sage et le dément, il y a bien un point de vue, "un en tant que", où l'on voit de toute évidence que l'un n'est pas supérieur à l'autre. » (Deleuze, 1980)

2.3.3 De la vigilance à l'ambigüité

La polysémie inévitable du langage, à la racine du problème de l'interprétation, peut être synthétisée par la formule : *il y a plus d'idées que de mots*. Pour l'exprimer mathématiquement, on pourrait dire que l'application associant un mot à une idée est surjective⁶. Le contexte détermine son antécédent, c'est-à-dire sa signification en tant qu'idée.

Dans une perspective didactique de conception d'une séquence d'enseignement, la conscience du problème de l'interprétation implique une vigilance aigüe à l'*ambigüité* des termes employés, liée à leur possible polysémie.

Concrètement, cela demande d'être très attentif au choix des mots et des formulations à utiliser, de considérer les différentes interprétations possibles de ce qui est formulé, et l'écart entre ce qu'on a en tête, ce qu'on veut signifier, et ce qu'on dit explicitement avec les mots choisis. Autrement dit, il s'agit d'examiner avec attention les ambigüités

5. cf. cet extrait vidéo de *L'Abécédaire de Gilles Deleuze*, 1996, Arte, dans le passage « W comme Wittgenstein » : « C'est un danger qui revient, ce n'est pas la première fois [...]. C'est grave, surtout qu'ils sont méchants, les wittgensteiniens. Et puis ils cassent tout. S'ils l'emportent, alors là il y aura un assassinat de la philosophie. C'est des assassins de la philosophie. Il faut une grande vigilance... »

6. cf. figure 2.3.1 page ci-contre. On dit souvent que le terme de « philosophie » a presque autant de définitions qu'il y a de philosophes. Les définitions proposées par Gilles Deleuze (en noir) et Ludwig Wittgenstein (en blanc) en sont par exemple des propositions particulièrement divergentes.

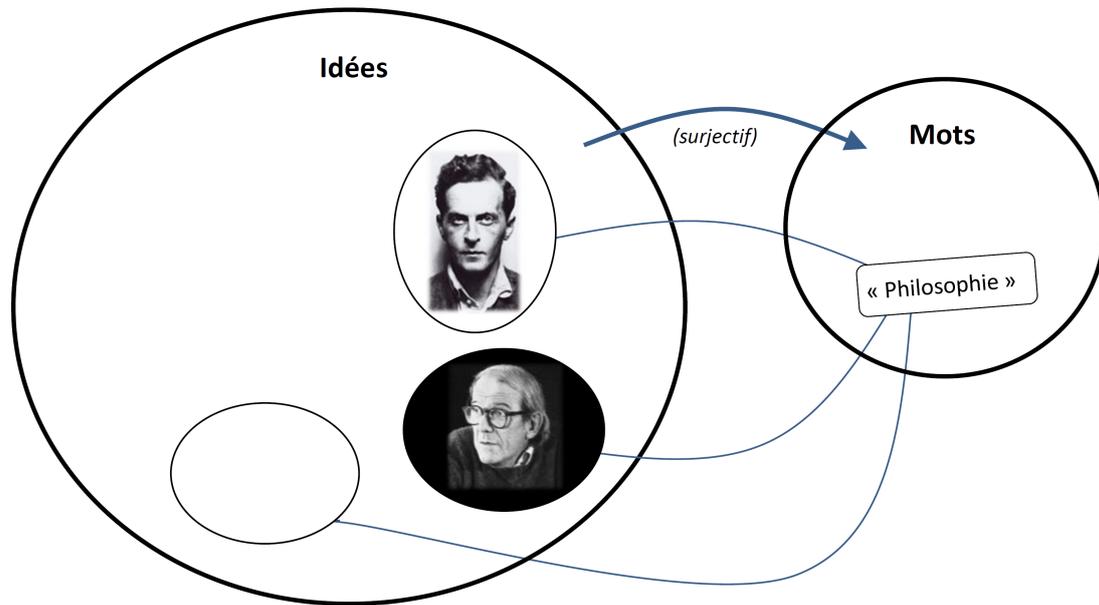


FIGURE 2.3.1 – Il y a plus d'idées que de mots

possibles des mots que l'on utilise, indépendamment de ce que l'on veut dire par eux, dans le contexte du contenu en jeu.

En informatique, on parle aussi de « désambiguïsation sémantique » lorsque chaque mot est lié dans un contexte donné à une définition unique. Cela peut être considéré comme l'un des enjeux majeurs d'une présentation didactique.

L'ambiguïté en histoire des sciences

La question de l'interprétation est également particulièrement problématique en histoire des sciences, comme le souligne notamment Nersessian (1989) :

« [...] it often happens that the same word is used in the old and new conceptual structure, but its meaning has changed significantly. » (Nersessian, 1989)

Richard Westfall, historien des sciences spécialiste de la dynamique, exprime assez précisément cette notion de vigilance à l'ambiguïté dans la préface de *Force in Newton's physics : the science of dynamics in the seventeenth century* :

« Because the change was gradual, a considerable ambiguity of technical language existed. Without exception, I believe, the technical terms of Newtonian dynamics descended from those in common use in earlier mechanics. Words that acquired a precise meaning with Newton were part of the coinage

in which the commerce in mechanics had long been carried on, and for want of alternate coinage, they continued in use during the seventeenth century. Those who employed them undoubtedly thought they were clear enough ; in relation to the new dynamics that eventually appeared, however, they were charged with ambiguities. I must warn the reader not to impose the precise modern meaning on such words. [...] **A fair part of the history I recount has to do with the development of precise terminology, and the indication of prevailing ambiguities is essential to my task.** Let the reader then exercise care in the meanings he imposes. » (Westfall, 1971)

En revenant au problème de l'interprétation au niveau de l'enseignement, Nersessian (1992) insiste sur l'importance de la construction des concepts.

« Teachers need to be aware that when they use scientific language, students may already have different representations associated with the same words, as we saw for 'motion' and 'force'. Changing existing representations **requires that they be taught how to construct the new concepts and work these into a quite different representation of the phenomena.** » (Nersessian, 1992) cité par (Rowlands et al., 1999)

Cette nécessité de *construire* les concepts est à la base de ce travail, avec la conscience qu'elle implique de comprendre la nature de cette construction :

« To inquire as to how it is possible for the teacher to facilitate the construction of the Newtonian system - a system that explains the world qualitatively - **requires understanding what it *is* that is being constructed.** » (Rowlands et al., 1999)

2.4 Points de vue épistémologiques et conséquences didactiques

Le rapport de la physique à sa construction a une place essentielle dans cette recherche. D'autres postures concernant la nature de la physique, ayant un fort impact sur la conception de la séquence d'enseignement, seront également explicitées dans cette partie.

Ces positionnements sont intentionnellement élémentaires, suffisamment basiques pour être jugés ici fondamentaux. Il ne s'agit donc pas de chercher à rentrer dans la richesse et la finesse de la philosophie des sciences, mais plutôt de chercher à réaffirmer certains

points avec lesquels on puisse penser que tout le monde soit à peu près d'accord. Cette posture minimaliste est notamment analogue à celle annoncée par Driver et al. (1994) :

« Although recent writings in the field of science studies emphasize that scientific practices cannot be characterized in a simplistic unitary way, that is, there is no single "nature of science" (Millar, Driver, Leach, & Scott, 1993), there are some core commitments associated with scientific practices and knowledge claims that have implications for science education. » (Driver et al., 1994)

Ces vues épistémologiques peuvent cependant également être conséquentes vis à vis de l'apprentissage et la compréhension de la physique, comme en témoignent notamment les travaux de David Hammer et Andrew Elby sur le sujet :

« This research has provided evidence of an epistemological component to students' success in learning introductory physics. Students who have difficulties often view physics knowledge as a collection of facts, formulas, and problem solving methods, mostly disconnected from everyday thinking, and they view learning as primarily a matter of memorization. By contrast, successful learners tend to see physics as a coherent system of ideas, the formalism as a means for expressing and working with those ideas, and **learning as a matter of reconstructing and refining one's current understanding.** » (Hammer and Elby, 2003)

2.4.1 La physique et sa construction

Les concepts et théories physiques sont le résultat d'une construction.

Cette affirmation est suffisamment banale et imprécise pour ne pas être sujette à remise en question, qu'elle vienne du champ de la didactique ou de l'épistémologie. D'un autre côté, l'observation de l'enseignement montre que ces deux éléments - un contenu physique et sa construction - ne sont pas forcément associés. On peut trouver de nombreux exemples de présentations déclaratives, où le contenu est annoncé directement sous une forme synthétique, ou aussi de présentations déductives, où un principe général est posé, afin d'en déduire logiquement les autres propositions, à la façon des mathématiques. Ces types de présentation font l'objet d'un regard critique depuis longtemps déjà :

« Le gros inconvénient des méthodes déductives est leur caractère dogmatique ; la connaissance scientifique est d'emblée présentée dans son aspect de perfection actuelle. » (Gohau, 1977)

Cette critique est partagée ici, notamment sous la forme exprimée par Weil-Barais and Lemeignan (1993), en vertu de l'importance centrale accordée à la démarche intellectuelle de construction des concepts.

« La manière habituelle de présenter les programmes ou de rédiger les manuels fait oublier une chose essentielle : la physique est une construction de l'esprit. Cette construction aboutit bien sûr aux concepts et aux théories, aux lois ainsi qu'aux principes que tout professeur connaît. Si ceux-ci ne sont pas associés aux activités intellectuelles qui les ont produits ou qui les mettent en œuvre, ils ne sont que des énoncés, c'est-à-dire des traces écrites sur une page, ou des phrases récitées. L'important dans cette affaire n'est pas tant l'énoncé des contenus mais la pensée qui le sous-tend. » Weil-Barais and Lemeignan (1993)

L'étude de la démarche de construction qui sous-tend les théories physiques est l'objet d'une très grande quantité de réflexions en épistémologie. Pour s'en tenir - comme annoncé - à des vues suffisamment minimales pour être consensuelles, il nous suffira simplement de la considération suivante :

La construction des concepts et théories physiques résulte d'aller-retours complexes entre réflexion théorique et expériences.

Cela n'est rien de plus qu'une expression du fait que la physique soit une science expérimentale. De façon plus précise, il s'agit d'une science ayant pour objet des phénomènes, qu'elle cherche à décrire et relier entre eux en les exprimant via certaines idées, analyses mathématiques ou conceptuelles, qui vont constituer la théorie physique.

De fait, historiquement, l'articulation de ces différents éléments expérimentaux et théoriques relève de dialogues complexes, voire de natures diverses⁷. L'analyse des différentes formes que ces aller-retours ont pu avoir au cours de l'histoire des sciences, qui peut être passionnante, n'est cependant pas nécessaire pour formuler une critique épistémologique - basique - des enseignements à dominante déclarative et déductive évoqués précédemment.

Critique d'un enseignement déclaratif et déductif de la physique

Présenter un contenu sous une forme synthétique est une méthode courante d'exposition en mathématiques, où l'on pose un certain nombre de définitions et d'axiomes, desquels

7. comme le développe notamment Feyerabend dans « Contre la méthode, Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance » (Feyerabend, 1979).

on peut déduire des théorèmes par démonstration logique. Ce type de présentation peut également être utilisé pour une théorie physique. C'est le cas par exemple fréquemment pour la théorie de la gravitation, dont la formule de la force gravitationnelle est posée telle quelle, et dont on *déduit* en particulier les trois lois de Kepler ou l'expression du poids. Justifiée par l'efficacité de l'accès au contenu, une telle présentation revient à négliger l'importance de l'image de la physique qu'elle implique. En présentant la physique sur le mode des mathématiques, on nie sa spécificité : son rapport à l'expérience, qui - même si elle ne la détermine pas à elle seule - impulse et contraint sa construction.

Avant la réflexion sur les phénomènes, il y a la considération des phénomènes qui suscitent la réflexion. Entre les faits expérimentaux initiaux et la théorie achevée, la construction passe par des aller-retours complexes et divers entre expérience et hypothèses. Mais la formulation d'une hypothèse elle-même émerge d'une réflexion sur des faits expérimentaux, prenant en compte d'autres idées, concepts ou considérations mathématiques. Autrement dit : une hypothèse ne sort pas de l'imaginaire pur ou du génie, mais résulte d'un certain cheminement, avec des arguments de différentes natures, pouvant être *plus ou moins* ancrés dans l'expérience, mais qui n'en sont jamais complètement détachés.

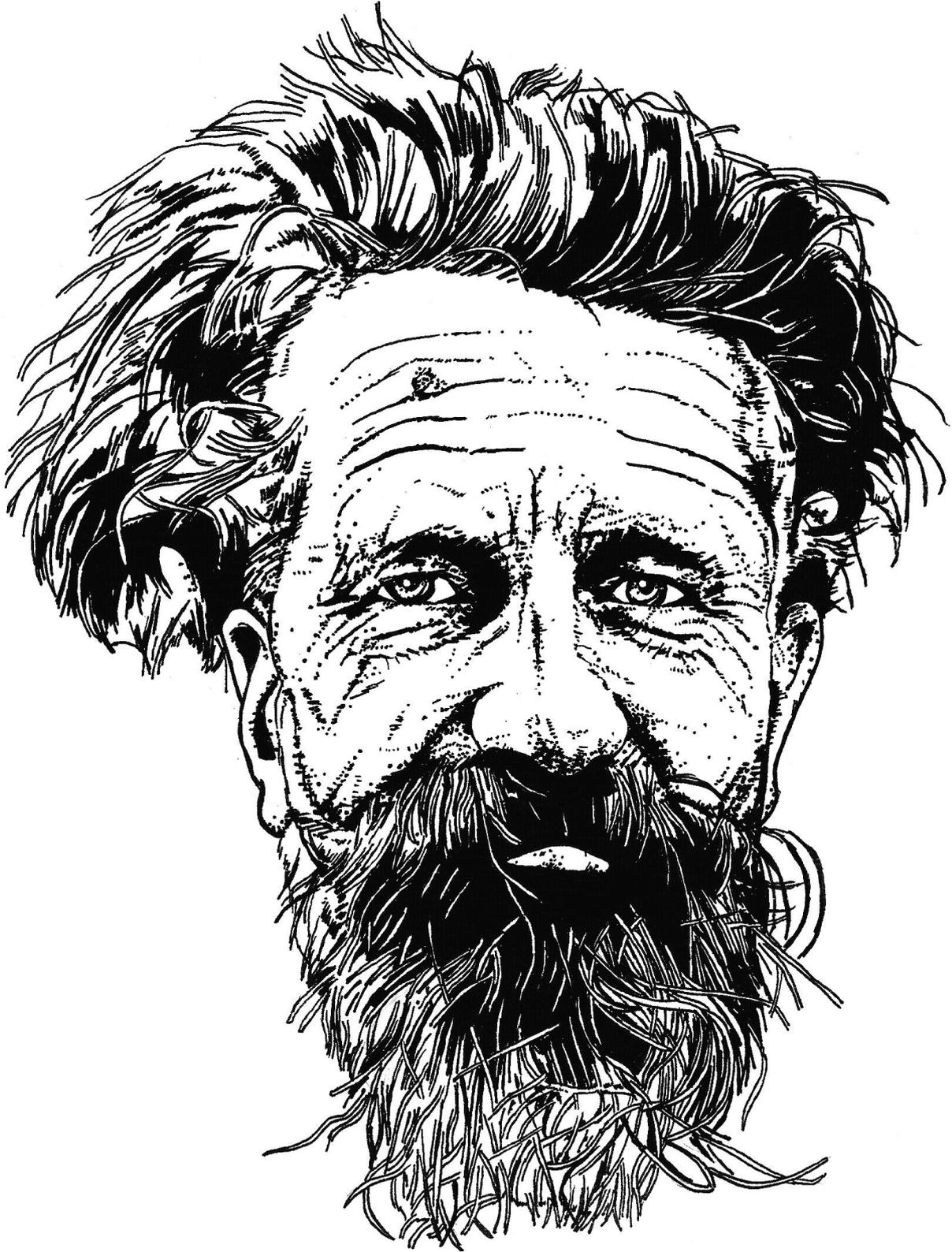
Une présentation déductive implique généralement de passer sous silence ces phénomènes initiaux à l'origine de la théorie, de sorte que sa forme aboutie - l'hypothèse finalement retenue - passe souvent pour un « coup de génie » d'un grand physicien.

Cette sensation d'inaccessibilité de la démarche du savant est également due au fait que soit omis le *problème* auquel il s'intéressait. Cette critique rejoint ce passage très fort de Gaston Bachelard dans *La formation de l'esprit scientifique (1938)* :

« Et, quoi qu'on en dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir de connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. » (Bachelard, 2004, p.14)

Du point de vue de l'apprentissage, il fait le lien plus loin avec le risque de projection des idées du sens commun sur le vocabulaire scientifique⁸, pour une présentation déclarative.

8. « people hear such words in use and give them meaning and roles consistent with what they already think. » (Bliss and Ogborn, 1993)



Gaston Bachelard

« [...] l'enseignement des résultats de la science n'est jamais un enseignement scientifique. Si l'on n'explicite pas la ligne de production spirituelle qui a conduit au résultat, on peut être sûr que l'élève combinera le résultat avec ses images les plus familières. » (Bachelard, 2004, p.234)

Un autre aspect de la construction tend à être omis lors d'une présentation déductive : celui du caractère provisoire d'une théorie physique. Contrairement à la démarche de déduction mathématique à partir d'axiomes, la physique part d'une certaine conceptualisation de différents faits expérimentaux, pour chercher des principes plus généraux qui puissent les relier. Ces principes sont donc nécessairement relatifs à l'expérience, et de nouvelles observations peuvent toujours se rajouter à la réflexion, faisant évoluer - parfois en profondeur - les bases conceptuelles de la théorie.

En posant d'entrée une forme finalisée, une présentation déclarative et déductive d'une théorie laisse dans l'ombre l'image de la science « comme un questionnement permanent et rigoureux, évolutif et hypothétique et non un savoir "dogmatique et intangible" » (Morge and Doly, 2013).

Au contraire, la présence d'une argumentation justifiant la construction de la théorie contient implicitement son caractère provisoire : celle-ci étant argumentée en s'appuyant sur des faits et hypothèses, un raisonnement différent, prenant en compte d'autres faits ou d'autres hypothèses, peut toujours la remettre en question.

Le caractère provisoire des théories physiques est fréquemment interprété comme le signe d'un relativisme dévalorisant. Henri Poincaré, dans *La science et l'hypothèse* (1902), exprime particulièrement bien cette critique, avant de s'appuyer sur elle pour en faire émerger un sens plus profond.

« Les gens du monde sont frappés de voir combien les théories scientifiques sont éphémères. Après quelques années de prospérité, ils les voient successivement abandonnées ; ils voient les ruines s'accumuler sur les ruines ; ils prévoient que les théories aujourd'hui à la mode devront succomber à leur tour à bref délai et ils en concluent qu'elles sont absolument vaines. C'est ce qu'ils appellent la faillite de la science. Leur scepticisme est superficiel ; ils ne se rendent nul compte du but et du rôle des théories scientifiques, sans cela ils comprendraient que les ruines peuvent être encore bonnes à quelque chose. » (Poincaré, 1902, p.173)

2.4.2 La physique comme mises en relation

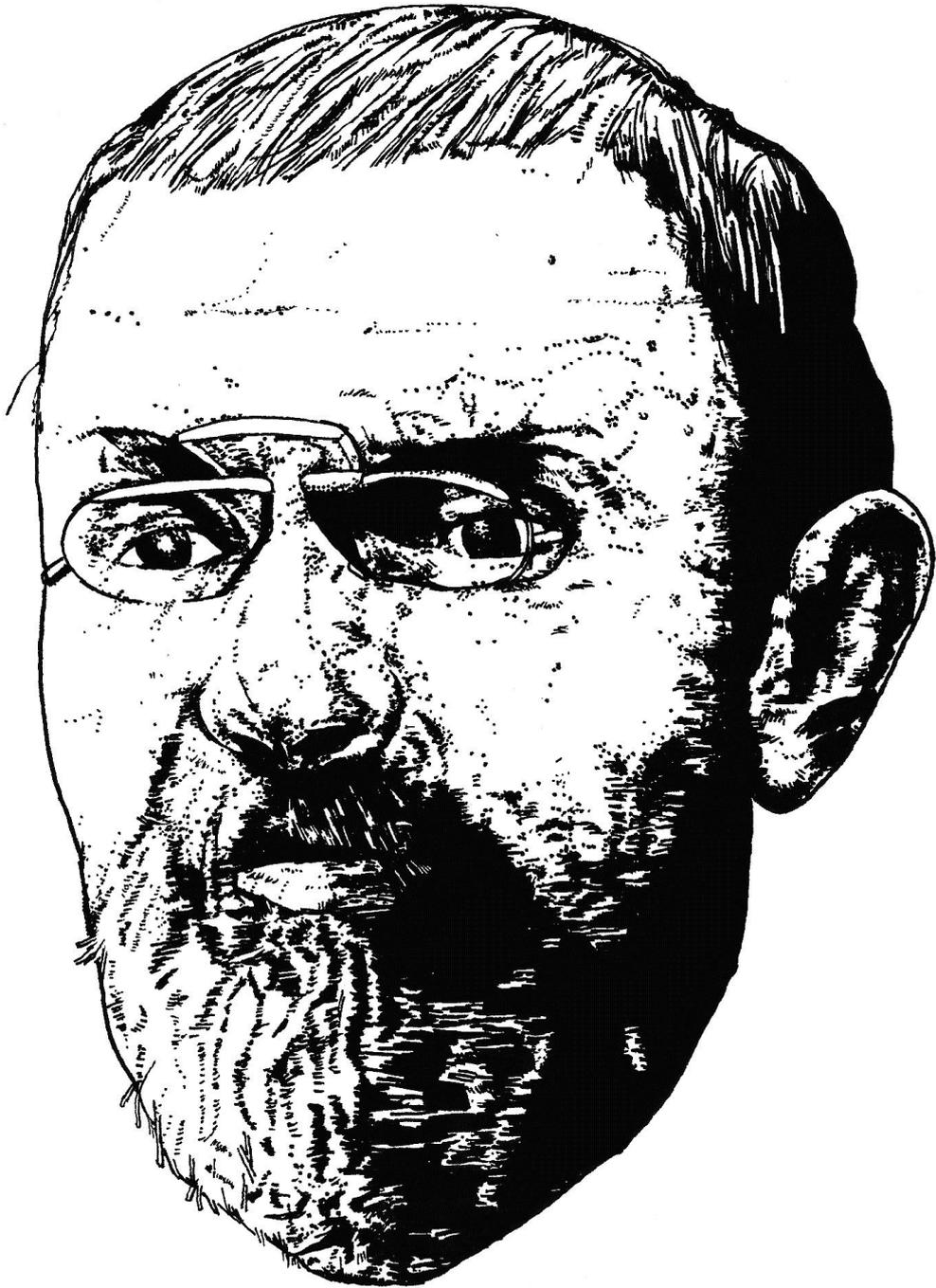
Cela vaut la peine de laisser poursuivre Poincaré, avec son exemple de la théorie de la lumière.

« Nulle théorie ne semblait plus solide que celle de Fresnel qui attribuait la lumière aux mouvements de l'éther. Cependant, on lui préfère maintenant celle de Maxwell. Cela veut-il dire que l'œuvre de Fresnel a été vaine ? Non, car le but de Fresnel n'était pas de savoir s'il y a réellement un éther, s'il est ou non formé d'atomes, si ces atomes se meuvent réellement dans tel ou tel sens ; c'était de prévoir les phénomènes optiques. Or, cela, la théorie de Fresnel le permet toujours, aujourd'hui aussi bien qu'avant Maxwell. Les équations différentielles sont toujours vraies ; on peut toujours les intégrer par les mêmes procédés et les résultats de cette intégration conservent toujours toute leur valeur. Et qu'on ne dise pas que nous réduisons ainsi les théories physiques au rôle de simples recettes pratiques ; ces équations expriment des rapports et, si les équations restent vraies, c'est que ces rapports conservent leur réalité. Elles nous apprennent, après comme avant, qu'il y a tel rapports entre quelque chose et quelque autre chose ; seulement, ce quelque chose nous l'appelions autrefois mouvement, nous l'appelons maintenant courant électrique. Mais ces appellations n'étaient que des images substituées aux objets réels que la nature nous cachera éternellement. Les rapports véritables entre ces objets réels sont la seule réalité que nous puissions atteindre, et la seule condition, c'est qu'il y ait les mêmes rapports entre ces objets qu'entre les images que nous sommes forcés de mettre à leur place. Si ces rapports nous sont connus, qu'importe si nous jugeons commode de remplacer une image par une autre. » (Poincaré, 1902, p.173)

Cette posture épistémologique, valorisant les mises en relation qu'une théorie physique permet de mettre en évidence, est adoptée dans ce travail. On peut en trouver une reformulation synthétique dans *La valeur de la science* (1905) :

« Maintenant qu'est-ce que la science ? [...] c'est avant tout une classification, une façon de rapprocher des faits que les apparences séparaient, bien qu'ils fussent liés par quelque parenté naturelle et cachée. La science, en d'autres termes, est un système de relations. » (Poincaré, 1905, p.265)

Ainsi, on peut parler de *découverte* au sens où la théorie nous apporte une information inattendue : le fait qu'il soit possible de mettre en relation tel et tel types de phénomènes, que l'on pensait distincts au départ.



Henri Poincaré

Cette conception donne par ailleurs un critère pour comparer différentes théories :

« Une théorie physique, avons-nous dit, est d'autant plus vraie, qu'elle met en évidence plus de rapports vrais. [...] si l'une nous révèle des rapports vrais que l'autre nous dissimule, on pourra néanmoins la regarder comme physiquement plus vraie que l'autre, puisqu'elle a un contenu plus riche. » (Poincaré, 1905, p.272)

Ce point de vue permet ainsi de donner un sens à l'idée de *découverte* et celle de *théorie plus vraie qu'une autre*, indépendamment de considérations métaphysiques sur la « réalité objective » (ou plus explicitement en anglais : « mind-independent reality »).

Quelque soit leur rapport à la réalité, la prise de conscience de nouveaux liens entre *phénomènes* - tel qu'on peut les percevoir et concevoir - est déjà en soi extraordinaire⁹. Cela *suffit* à donner sa valeur à la théorie physique qui permet de mettre en évidence un tel lien.

Il s'agit également du point de vue de Poincaré, qui s'amuse des prétentions réalistes trop ambitieuses :

« Donc quand nous demandons quelle est la valeur objective de la science, cela ne veut pas dire : la science nous fait-elle connaître la véritable nature des choses ? Mais cela veut dire ; nous fait-elle connaître les véritables rapports des choses ? À la première question, personne n'hésiterait à répondre, non ; mais je crois qu'on peut aller plus loin : non seulement la science ne peut nous faire connaître la nature des choses ; mais rien n'est capable de nous la faire connaître et si quelque dieu la connaissait, il ne pourrait trouver de mots pour l'exprimer. Non seulement nous ne pouvons deviner la réponse, mais si on nous la donnait, nous n'y pourrions rien comprendre ; je me demande même si nous comprenons bien la question. » (Poincaré, 1905, p.266)¹⁰

9. On peut penser par exemple aux liens entre électricité et magnétisme, mis en forme dans les lois de Maxwell, et dont l'une des conséquences mathématiques est l'existence d'une onde électromagnétique voyageant à la vitesse de 300 000 km/s... qui s'avère correspondre précisément à la vitesse de la lumière. La mise en relation de ces trois types de phénomène - électrique, magnétique et optique - est l'une des découvertes les plus saisissantes de l'histoire de la physique. Rien ne pouvait laisser prévoir « une telle parenté naturelle et cachée » entre ces faits.

10. Pour une introduction aux arguments étayant cette position, voir le court texte de Michel Bitbol : *Le réel-en-soi, l'inconnaissable, et l'ineffable*, « [...] dressant un inventaire un peu hétéroclite, et sans doute partiel, des motifs qui pourraient interdire en principe l'appréhension d'un réel-en-soi par les moyens de la science. » (Bitbol, 1998) (accessible en ligne : <http://michel.bitbol.pagesperso-orange.fr/Reelensoi.html>)

Avec cette constatation d'impossibilité fondamentale d'accès à « la véritable nature des choses », Poincaré redéfinit le sens de « objectif », pouvant signifier « vrai *indépendamment* de nous », comme signifiant « vrai *pour chacun* de nous » :

« [...] que devons-nous entendre par objectivité? Ce qui nous garantit l'objectivité du monde dans lequel nous vivons, c'est que ce monde nous est commun avec d'autres êtres pensants. Par les communications que nous avons avec les autres hommes, nous recevons d'eux des raisonnements tout faits ; nous savons que ces raisonnements ne viennent pas de nous et en même temps nous y reconnaissons l'œuvre d'êtres raisonnables comme nous. Et comme ces raisonnements paraissent s'appliquer au monde de nos sensations, nous croyons pouvoir conclure que ces êtres raisonnables ont vu la même chose que nous ; c'est comme cela que nous savons pas que nous n'avons pas fait un rêve. » (Poincaré, 1905, p.272)

Cette définition de l'objectivité correspond à ce qu'on appelle aussi de nos jours « intersubjectivité » ou « objectivité faible » (Espagnat, 1981). Elle est au cœur d'un passionnant débat sur le réalisme en physique¹¹. Il est intéressant de noter qu'en réfléchissant uniquement sur la physique classique, Poincaré tenait déjà une position revendiquée plus tard essentiellement à partir de la physique contemporaine (en particulier la mécanique quantique).

Il ne s'agit pas de rentrer plus avant sur ce terrain épistémologique, très vaste. Il n'en sera plus question explicitement dans la suite. Cependant il peut être dit dès à présent que la séquence d'enseignement finale se suffira de la position de Poincaré, vis à vis de l'intersubjectivité, et de la valorisation d'une théorie par les mises en relation qu'elle permet. Autrement dit, aucune référence implicite au réalisme ne sera nécessaire pour introduire la puissance de la théorie newtonienne, qui apparaîtra donc plutôt via les phénomènes qu'elle permet de relier, indépendamment de toute considération sur leur rapport à la « réalité indépendante ».

Cela vaut la peine d'être mentionné, étant donné la fréquence d'implicites réalistes dans le cadre des présentations de la gravitation. Par exemple la synthèse de cet extrait de recommandations officielles d'un document particulièrement reconnu aux États Unis (« Benchmarks for Science Literacy ») :

11. Dont un des protagonistes actuels majeurs est Michel Bitbol (notamment avec *Mécanique quantique : une introduction philosophique* (Bitbol, 1997) et *L'aveuglante proximité du réel* (Bitbol, 1999)). Celui ci développe d'ailleurs plus récemment l'importance de la notion de relation, dans *De l'intérieur du monde : Pour une philosophie et une science des relations* (Bitbol, 2010).

« The important point is that *the Earth pulls on objects*. (BM, grades 3–5; 94). [...] At the middle school level, students are expected to *leave behind* their previous perception that "things just naturally fall" and to *recognize* that gravity *is a force* that pulls things toward Earth's center and acts throughout the universe. » (Kavanagh and Sneider, 2006a) (emphase ajoutée)

Les termes mis ici en italique sont jugés emprunts d'une forte connotation ontologique, impliquant une certaine confiance dans la position réaliste. Cela est d'autant plus manifeste quand on considère la théorie contemporaine de la gravitation, où le mouvement gravitationnel n'est plus interprété en termes de force d'attraction, mais de « géodésique *libre* dans un espace-temps courbe », où le terme *libre* renvoie plutôt à l'idée d'un mouvement naturel que forcé. Ainsi l'affirmation « gravity *is a force* », laisse imaginer quelque chose de *réel* là où il ne peut s'agir que de l'*interprétation* d'un *phénomène*, dans le cadre d'une certaine théorie.

Face au problème philosophique du réalisme, très complexe et encore ouvert, l'attitude choisie dans ce travail de didactique est celle d'un agnosticisme épistémologique¹² : *ne pas se prononcer sur les rapports entre théorie physique et réalité indépendante*. Cela fait également écho à cette remarque d'Albert Einstein, dans une lettre à Erwin Schrödinger de 1935 :

« La physique décrit la « réalité ». Mais nous ne savons pas ce qu'est la réalité ; nous ne la connaissons que par la description qu'en donne la physique. »

Le fait est qu'il est possible d'introduire la physique newtonienne en se passant de ces notions métaphysiques, tout en conservant son intérêt, en particulier via la découverte de nouvelles mises en relation entre phénomènes.

Du moins c'est ce dont il sera possible de juger avec l'approche proposée dans cette thèse.

12. pour reprendre l'expression attribuée à la position de Bas van Fraassen (bien plus élaborée), notamment par (Garreta, 2002).

2.5 Autres positionnements pour la conception d'une séquence d'enseignement

2.5.1 Aspects non évidents d'une théorie physique pour le sens commun

Pour la présentation d'un certain contenu d'enseignement, l'intention de maintenir le sens commun comme point de départ (développée en 2.2.1) se résumait à la posture suivante :

« Il s'agit, lors de l'introduction d'une nouvelle idée, de chercher à ce que la progression des étapes qui permettent d'y arriver soient *systématiquement* - dans la mesure du possible - ancrée à des faits ou significations partagés par le sens commun. C'est-à-dire en particulier rattaché au sens des mots dans leur usage le plus courant ou le plus intuitif, partagé par la grande majorité, indépendamment de la connaissance du vocabulaire scientifique. » (2.2.1 page 15)

Lorsque l'on examine une théorie physique du point de vue des idées et modes de raisonnement a priori des élèves, de nombreux aspects de cette théorie apparaissent comme non évidents pour le sens commun. Prendre le sens commun comme point de départ de son enseignement implique de prendre en compte *dès le départ*, toutes les idées du sens commun pouvant être en contradiction avec le contenu physique enseigné. Autrement dit, il s'agit de la volonté de ne pas faire passer pour allant de soi certaines choses qui ne sont ni évidentes, ni intuitives, et dont la compréhension demande une certaine justification ou reconstruction, via des arguments explicites.

A cette posture correspond une hypothèse - peut-être la plus centrale de tout le travail de thèse - pouvant être exprimée ainsi :

Le degré d'efficacité d'une séquence d'enseignement, est reliée de manière significative à l'explicitation plus ou moins forte d'aspects non évidents pour le sens commun.

Il s'agit à ce niveau d'une hypothèse générale, où l'« efficacité » d'un enseignement est prise au sens de sa capacité à permettre l'appropriation d'un certain contenu. Pour un contenu spécifique donné, cette définition nécessite de préciser les objectifs d'apprentissage et les types d'appropriation visés, pouvant être de nature différente.

En amont de ces spécifications, cette hypothèse générale entraîne, dans la conception d'un enseignement,

- de *détecter* autant que possible les aspects du contenu potentiellement non évidents pour le sens commun,
- de chercher des moyens pour *explicitier* au maximum ces aspects, en s'appuyant sur la base commune du langage courant et de l'expérience quotidienne.

Cette hypothèse et cette intention ne prétendent à aucune originalité. Elles sont au contraire probablement partagées par de nombreux chercheurs en didactique de la physique (parmi ceux intéressés par la conception de séquence d'enseignement) qui l'ont exprimées ou l'exprimeraient peut-être différemment. C'est à partir de cette formulation là que les propositions didactiques pour aborder la dynamique et la gravitation newtoniennes seront exprimées et justifiées.

Parmi les aspects d'un cours pouvant être non évidents pour des élèves, il y a déjà l'intention elle-même de chercher à faire évoluer leur état de connaissance, qu'il soit constitué d'idées a priori ou d'apprentissages antérieurs. Comprendre les motivations pour s'engager dans l'étude d'un certain contenu n'est souvent pas une évidence, et peut avoir un rôle crucial pour la motivation des élèves.

2.5.2 La motivation des élèves et la « problem posing approach » (Klaassen, 1995)

Personne ne conteste l'importance de la motivation et de l'engagement des élèves pour leur apprentissage. Parmi les facteurs pouvant jouer sur la motivation, il y a celui de la compréhension de la justification du déroulé logique qui leur est présenté. Chercher à faire en sorte que les élèves puissent comprendre pourquoi est abordé une certaine notion ou pourquoi ils font ce qu'ils font, est une intention en particulier revendiquée par Klaassen (1995) sous l'appellation de « problem posing approach », comme synthétisé dans (Lijnse and Klaassen, 2004).

« [...] students should at any time during the process of teaching and learning see the point of what they are doing. If that is the case, the process of teaching and learning will probably make (more) sense to them and it then becomes more probable that they will construct or accommodate new knowledge on grounds that they themselves understand. An approach to science education that explicitly aims at this, we call problem posing. »
(Lijnse and Klaassen, 2004)

Il s'agit donc de faire en sorte que les élèves puissent avoir de bonnes raisons de chercher à faire progresser leurs états de connaissance :

« [...] The emphasis of a problem posing approach is thus 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 and Klaassen, 2004)

« if pupils are to meaningfully engage in an activity there should be a sense in which they know why they are going to do it. They will have to develop some sense of purpose for going to study events they have never witnessed or paid attention to ; the inductive hypotheses should become reasonable for them ; an intention to improve on already established generalizations should come forward, etc. » (Klaassen, 1995)

La justification du vocabulaire introduit

En particulier, l'introduction de nouveaux termes scientifiques demande une justification :

« [...] it has been argued that if the introduction of a scientific term is to make sense to pupils, it should have a point for them. They should feel some kind of need for, or at least have good reasons for, having available a term of the kind one intends to introduce. » (Klaassen, 1995)

Or ce point demande une attention particulière, car les motivations pour lesquelles un enseignant introduit une certaine notion, dans l'enchaînement logique du cours, ne sont pas forcément explicites ou compréhensibles par l'élève.

« This need or these good reasons are to create, so to say, a place in pupils' conceptual apparatus for the term to be introduced to occupy. I also think that in general this task is non-trivial, because generally pupils' reasons, or need, for having available a particular term cannot, at the stage that it is to be introduced, coincide with what may be called the teacher's or curriculum deviser's reason to introduce it, namely that having available such a term is useful in the light of a further development towards a scientific theory. » (Klaassen, 1995)

Motivations locales et globales

De plus, Klaassen insiste sur l'importance de plusieurs niveaux de motivation : à la fois des motivations locales, justifiant le passage d'une étape à une autre, et également une motivation globale, justifiant l'intérêt pour le sujet abordé.

« [...] it is an essential ingredient of a problem posing approach that pupils' reasons for being involved in a particular activity are induced by preceding activities, while that particular activity in turn, together with its preceding activities, induces pupils' reasons for being involved in subsequent activities. Thus their process of science learning is, at any stage, provided with a local point, which is to locally involve them in the development of the process with respect to content. Another essential ingredient of a problem-posing approach is that their process is provided, at appropriate stages, with a global point, e.g. by making them see a connection with existing interests, or by bringing them in such a position that they themselves come to pose a main problem that they intend to work on. A global point is to induce a (more or less precise) outlook on the direction that their process of science learning will take, and thus to increase their involvement in the further development of the process with respect to content. » (Klaassen, 1995)

Cette « problem posing approach » n'est pas sans lien avec le point de vue de Bachelard cité précédemment : « toute connaissance est une réponse à une question ». Elle rejoint également le courant français de l'apprentissage par problématisation (Orange, 2002). Celui-ci consiste essentiellement à considérer que le savoir se constitue des énoncés et de leurs raisons, c'est-à-dire des problèmes qui leur sont associés et des arguments qui en ont permis l'élaboration. L'hypothèse est que faire revivre - autant que faire se peut - cette genèse à ceux qui apprennent est positif, comme stratégie d'enseignement et comme promotion d'une image appropriée de la science.

L'essence de l'approche de l'apprentissage par problématisation, de même que la « problem posing approach », sont adoptées dans ce travail. Lijnse and Klaassen (2004) en propose une reformulation sous forme de programme de recherche didactique :

« How can we design a conceptual teaching pathway that is divided in such steps that, in a teaching situation, students are meaningfully able and willing to take them, building productively on what they already know and are able to? Can we make students ask or value questions that on the one hand make sense to them and that, on the other, ask for the development of (possibly adapted) new ideas and scientific concepts to be taught that provide an answer to their questions? » (Lijnse and Klaassen, 2004)

Ils font également le rapprochement entre la démarche de justification en science et son apprentissage par les élèves.

« [...] for them, the concepts to be reinvented will function for a particular purpose, and that the reasons for their construction and acceptance are directly derived from that functioning. In doing so, apart from being guided, knowledge construction within this problem posing approach is, in a sense, similar to the process of professional knowledge construction within science itself. Knowledge is (guidedly) constructed for a certain purpose. And it is accepted by those who construct it to the extent that it functions productively for that purpose » (Lijnse and Klaassen, 2004)

Une des pistes pour comprendre la nature du problème à l'origine d'une connaissance est d'aller voir du côté de l'histoire de la construction de cette connaissance.

2.5.3 Le rapport à l'histoire des sciences

Beaucoup a été dit sur l'usage de l'histoire des sciences dans l'enseignement, et il ne s'agit pas ici d'en faire une revue détaillée. Pour situer les différentes recherches sur le sujet Hosson and Schneeberger (2011) les catégorisent selon les trois axes suivants :

« Axe 1 : étude de l'apport de l'histoire des sciences pour l'apprentissage des lois et des concepts scientifiques ; [...] »

Axe 2 : étude de l'apport de l'histoire des sciences pour approcher la nature de la science ;

Axe 3 : étude des rapports entre l'Institution scolaire et l'histoire des sciences. » (Hosson and Schneeberger, 2011)

Le premier axe est structuré selon les trois types d'objectif suivant :

- « Éclairer les difficultés des élèves »
- « Identifier des problèmes féconds et/ou favoriser l'installation d'un débat au sein de la classe »
- « Concevoir un parcours d'apprentissage » (Hosson and Schneeberger, 2011)

L'utilisation de l'histoire des sciences revendiquée dans les programmes français

Au niveau institutionnel,

« Selon les programmes de collège actuels « la perspective historique donne une vision cohérente des sciences et des techniques et de leur développement conjoint. Elle permet de présenter les connaissances scientifiques comme une construction humaine progressive et non comme un ensemble

de vérités révélées » (MEN, 2008, p. 1). Dans les nouveaux programmes de lycées, la volonté affichée d'une présentation dynamique et culturelle de la science pose l'histoire des sciences comme un moyen de réconcilier les élèves avec la science. En première S, « l'enseignant peut utiliser l'approche historique comme démarche didactique destinée à mettre la science en contexte et en culture » (MEN, 2010b, p. 4). En classe de seconde, la « mise en perspective historique » (en tant qu'« histoire de la construction de la connaissance scientifique ») est posée comme une voie à privilégier pour approcher la nature et « l'universalité » des lois et des modèles et devient le témoin des qualités humaines sous-jacentes à l'activité scientifique : « 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. Elle est également une école d'humilité et de patience » (MEN, 2010a). » (Hosson and Schneeberger, 2011)

La genèse de l'idée de « reconstruction didactique » (Hosson, 2011)

Dans l'analyse des difficultés des élèves, de nombreuses recherches ont reliées des idées d'élèves à des conceptions ayant existées dans l'histoire des sciences. Bien que ces parallèles soient parfois frappants, des chercheurs ont également montré certaines réserves vis à vis de cette tendance de rapprochement. Les premières d'entre eux sont probablement Saltiel and Viennot (1985), qui ont mis en évidence les limites des analogies historiques pour le cas de la dynamique. Hosson (2004) synthétise en particulier cette critique :

« Certaines théories historiques sont nées dans le cadre de contingences philosophiques particulières qui rend leur compréhension complexe et leur transposition périlleuse. Ensuite, la logique des raisonnements des élèves à propos de la chute des graves ne suit pas un cheminement calqué sur une logique historique particulière. Elle est tantôt proche des idées d'Aristote, tantôt proche de celles de Buridan. Et l'on peut imaginer qu'il sera toujours possible de rapprocher une prévision d'élève d'une prévision historique. » (Hosson, 2004, p.42)

Ayant conscience de cette limitation, elle insiste alors sur la primauté de l'analyse des difficultés des élèves, indépendamment de leur rapport à l'histoire des sciences :

« [...] les analogies historico-psychogénétiques (lorsqu'elles existent) ne doivent pas dispenser le chercheur d'une investigation sur les conceptions

des élèves. Ainsi, la détection des difficultés didactiques est première et indépendante, et il n'est nullement besoin d'invoquer l'idée d'un parallélisme pour analyser la logique du raisonnement commun. C'est la raison pour laquelle une partie de notre recherche sera consacrée à l'étude des conceptions initiales des élèves à propos de la vision, indépendamment de toute préoccupation historique.[...] A vouloir analyser les raisonnements des élèves avec l'aide de l'histoire des sciences, on réduit le champ des investigations didactiques à une dimension unique et discutable. La spécificité didactique perd son identité, une partie de son indépendance, et l'analyse des raisonnements risque de perdre en cohérence, voire d'être « bloquée » » (Hosson, 2004, p.43)

Ainsi l'intérêt de Hosson pour l'histoire des sciences dans le champ de la didactique s'oriente plutôt vers la conception de parcours d'apprentissage. L'idée essentielle est celle d'une relecture de l'histoire des idées, guidée par la connaissance des difficultés des élèves, pour chercher des éléments qui pourraient contribuer à y remédier.

Elle synthétise cette posture dans (Hosson, 2011) :

« La création d'une reconstruction didactique est dépendante d'une enquête psycho-cognitive visant à établir le profil conceptuel d'une population donnée (élèves, étudiants, enseignants...) en caractérisant les types de difficultés et les raisonnements mis en œuvres par cette population confrontée à une situation physique donnée. Cette enquête va servir une enquête historique, visant une reconstruction historique. Il s'agit d'un travail d'exploration et de tri sous-tendu par un projet didactique spécifique : l'élaboration d'un matériau d'enseignement.» (Hosson, 2011, p.34)

Une reconstruction coordonnée des concepts (Nersessian, 1989)

L'article critique de Saltiel and Viennot (1985) concluait sur l'intérêt de l'étude de l'histoire des sciences, en tant qu'elle nous permet de mesurer la difficulté de la construction des concepts.

« [...] at least the history of Science, through the long term resistances it manifests, gives us a better chance not to underestimate our students' difficulties. It also indicates that certain concepts and notions should not be introduced too quickly.» Saltiel and Viennot (1985)

Nersessian (1989), analyse plus précisément cette idée. Elle souligne en particulier que l'étude de l'évolution des concepts montre l'interdépendance de leur évolution. Elle suggère que cette interdépendance, source de difficultés historiques pour les scientifiques, pourrait et devrait être prises en compte dans l'enseignement.

« [...] in all major conceptual changes in science, whole complexes of concepts have changed. These changes are largely independent, and yet interconnected. [...] They are independent in that emergence of a new concept or alteration of an existing one does not automatically lead scientists to see how to make the other changes that will eventuate in the new conceptual structure. At most the repercussions of change in one part of the conceptual network will spread throughout the network and will point to areas in need of revision. We see clearly what needed revision and why only in historical perspective. For example, Galileo's transforming motion from a process to a state did not force any particular revision in the cause of motion and any rethinking at all of the properties of space [...]. Local revisions, by themselves, do not force global changes. The instructional import of this is that in teaching a scientific conceptual structure, a number of concepts need to be targeted for revision at the same time and new concepts introduced in a coordinated fashion. Unlike the scientists who first constructed the conceptual framework, we can take advantage of hindsight and emphasize the relevant conceptual interconnections in instruction. » (Nersessian, 1989)

« Learning by construction » (Nersessian, 1989)

Tout en étant consciente elle aussi des limites de l'usage de l'histoire des sciences¹³, Nersessian défend l'intérêt de s'inspirer de la construction historique des concepts pour l'enseignement. Ce point de vue est très proche de celui ayant orienté ce travail de thèse, même si celui-ci s'est élargi plus tard vers d'autres directions. Nersessian (1989) formule cette position ainsi :

« Can the same kind of reasoning used in scientific discovery be fruitfully employed in science education? If learning a scientific representation involves active construction of the representation in a problem-solving process,

13. « Not enough is known about either conceptual change in science or the relationship between the discovery process and the learning process to come to any definite conclusions about how to generate effective instructional strategies. » (Nersessian, 1989)

then understanding how scientific concepts were developed in the first place will aid the development of instructional strategies. » (Nersessian, 1989)

Elle insiste ainsi sur les différents types de cheminements qui permettent d'aboutir à une idée ou un concept scientifique. Sans qu'ils soient démonstratifs, au sens déductif des mathématiques, ni généralisables, ces cheminements permettent d'introduire de manière justifiée une idée, en permettant de comprendre l'enchaînement des idées qui y a mené.

« Concept formation in science requires such procedures as analogy, idealizations such as limiting case analysis and thought experiment, and use of imagistic representations. These are heuristic procedures, which while not algorithmic, are systematic and their use can be evaluated. These procedures comprise what has been called 'discovery argumentation'. [...] What is proposed here is that there is good reason to believe that leading students through some of the same kinds of argumentation employed in the initial construction of a conceptual structure will prove more productive. Teachers do, of course, already make use of 'discovery argumentation' to some extent, but it needs to be incorporated more systematically into instruction designed specifically to teach the conceptual structure of a science. » (Nersessian, 1989)

« Didactical reconstruction of processes » (Mäntylä, 2011)

S'inspirant en particulier de Nersessian, Mäntylä (2011) revendique également l'importance pour l'enseignement de relier les concepts enseignés de leur processus de formation.

« The structures of knowledge are inherently connected with the processes which produce the knowledge. In traditional teaching, however, these process aspects are often overlooked, with the result that for students the structures of knowledge appear as preexisting ones. Therefore, what is needed is a metacognitive learning and teaching tool, which helps the pre-service physics teachers to :

- Organize or reorganise their knowledge.
- Reflect the knowledge that they already possess.
- Think through how the knowledge is formed or can be formed. » (Mäntylä, 2011, p.30)

L'objectif du cadre qu'elle propose ainsi d'aider à formuler ce processus de formation des concepts, articulant éléments théoriques et expérimentaux.

« The DRoP [Didactical Reconstruction of Processes] aims to capture the knowledge formation of physical concepts and laws in concise and simplified form. » (Mäntylä, 2011, p.11)

En particulier, elle insiste sur la progressivité de la reconstruction, ayant un impact sur la structure globale du contenu en jeu.

« The DRoP produces a single law or a quantity at a time, but they always are constructed on the basis of previous knowledge or theory. It means that every new concept is already connected to previous concepts when it is formed and when the knowledge is constructed further the new concept will be connected to other new concepts. This approach leads to the idea of quantities as part of networks of other quantities and laws, where applying DRoP in a case of a certain quantities or laws is seen as having a central role in building up the network and in determining its structure (the structure of physics). » (Mäntylä, 2011, p.32)

2.5.4 Des parties transmissives face à l'objurgation constructiviste

Cette dernière section a pour but de justifier la forme que prendra essentiellement la séquence développée, contenant d'importantes phases transmissives, où l'enseignant expose et l'élève écoute.

L'anticipation de la défense d'un tel format tient au fait qu'il a été beaucoup critiqué dans le champ de la didactique et de la pédagogie. Ces critiques se réfèrent en particulier au constructivisme psychologique, et à l'importance accordée à « construire par soi-même » un savoir, au sens d'un maximum d'activité de l'élève et d'un minimum de guidage par l'enseignant.

Cette importance est en elle-même tout à fait partagée d'un point de vue pédagogique. Cependant d'autres contraintes s'ajoutent à cette intention, tenant de la spécificité des savoirs en jeu, et qui font que l'activité des élèves à construire « par eux-mêmes » n'est pas systématiquement la plus appropriée. Les arguments précis à ce niveau, et pour la légitimité d'une présentation magistrale du contenu en jeu, viendront dans les prochains chapitres, puisque relatifs au contenu.

Avant ces arguments, on peut déjà mentionner le point de vue critique de certains chercheurs, contrebalançant l'hégémonie du modèle d'enseignement calqué sur le modèle d'apprentissage du constructivisme. Il s'agit en particulier de la position de Laurence Viennot (2009) à ce sujet, réhabilitant l'idée d'un enseignement transmissif :

“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 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.” (Viennot, 2009, p.11)

Le rejet en bloc d'un enseignement de type transmissif est par ailleurs peu crédible, dans la mesure où une très grande diversité existe dans les différentes façons d'exposer un certain sujet de manière magistrale, de même qu'il existe une grande diversité de types d'activités qu'il est possible de proposer.

Il n'est pas rare par exemple de trouver des activités ou travaux pratiques dont la logique de la trame reste hermétique, ce qui rend les activités procédurales, imposées de l'extérieur, sans que l'on sache où l'on souhaite en venir. Et d'un autre côté, il existe des cours magistraux (ou des livres) dont la logique de progression n'évolue que via une argumentation légitime. Ceux là impliquent finalement une appréhension du contenu beaucoup plus *constructive*, du moins au sens de la compréhension de l'articulation des éléments qui permettent de construire.

Leach and Scott (2002) réhabilitent également la composante transmissive de l'enseignement en plaidant pour son équilibre avec une composante plus exploratoire :

« In thinking about staging the scientific story, we have found it useful to draw upon the distinction made between the 'authoritative' and 'dialogic' functions of texts (see Wertsch, 1991 ; Mortimer, 1998 ; Scott, 1997). The principle function of authoritative discourse is to introduce, or make available, ideas, whereas dialogic discourse involves exploration of meanings. In the classroom, authoritative discourse might involve the teacher in presenting new ideas in a transmissive mode which offers the students little, or no, invitation for discussion. Dialogic discourse might see the teacher asking for, and discussing, student opinions, or it might involve students in discussing

ideas with each other. **It seems reasonable to suggest that learning in the classroom will be enhanced through achieving some kind of balance between presenting information (focussing on the authoritative function) and allowing opportunities for exploration of ideas (focussing on the dialogic function).** [...] From our point of view, the activities which are often used in science lessons (experiments, demonstrations and so on) are important, but only insofar as they can act as points of reference in the development of the scientific story. » (Leach and Scott, 2002)

2.6 Conclusion sur les positionnements généraux adoptés

Différents positionnements ont été présentés dans ce chapitre, relativement à la conception d'une séquence d'enseignement.

Au niveau épistémologique, les deux idées principales retenues sont les suivantes :

- **Les concepts et théories physiques sont le résultat d'une construction,** constituée d'allers retours complexes entre réflexions théoriques et expérience.
- **Un apport fondamental d'une théorie physique est les mises en relation entre phénomènes qu'elle permet de révéler.**

Au niveau didactique, plusieurs positions générales ont été développées, consistant à souligner l'importance des différents points de vue suivants :

- La prise en compte du **sens commun comme point de départ de l'enseignement**, c'est à dire la volonté d'ancrer la progression des étapes menant à une nouvelle idée à des faits ou significations partagés du langage courant et de l'expérience quotidienne,
- L'attention portée au **problème de l'interprétation et de la polysémie des mots**, et ainsi l'importance accordée à la **vigilance concernant l'ambiguïté des termes utilisés**,
- La recherche d'**explicitation des aspects de la théorie non évidents pour le sens commun**, exprimant la volonté de ne pas faire passer pour allant de soi certains points qui ne sont ni évidents, ni intuitifs, et dont la compréhension demande une certaine justification ou reconstruction, via des arguments explicites,

- **L'importance pour la motivation de la compréhension des motifs**, c'est-à-dire de la justification du déroulé logique présenté,
- La considération de **l'intérêt pour l'histoire des idées**, dont une relecture guidée par la connaissance des difficultés des élèves peut permettre de trouver des éléments pouvant contribuer à y remédier

Ne jamais imposer la soumission à l'argument d'autorité

Parmi ces positionnements, l'insistance sur l'explicitation d'aspects non évidents est particulièrement centrale dans ce travail. Elle est liée à la volonté de minimiser les situations où les élèves sont obligés d'admettre ou de « faire confiance » à un savoir scolaire énoncé. De telles situations, de fait très fréquentes, impliquent le risque de d'accoutumer à la présence de l'argument d'autorité en science, dont elle ne peut s'accommoder qu'en se dénaturant.

Une façon de reformuler l'entreprise didactique consiste à la re-situer d'un point de vue anthropologique, en reprenant l'idée d'extériorité des savoirs scientifiques, tel qu'exprimée notamment par Brossard :

« Dans ce monde social « s'accumulent et se sédimentent les savoirs et savoir-faire que les hommes ont construits au cours de leur histoire. Ce que l'humanité est devenue par son travail n'est pas stocké dans l'individu mais se trouve « objectivé » dans le monde humain des biens, des outils, des œuvres d'art et des connaissances. » (Brossard 1993, p. 190) [...] « le petit d'homme trouve à sa naissance, déposées hors de lui, cristallisées dans les objets culturels, les formes d'activité plus ou moins complexes élaborées par la société à laquelle il appartient. (...) Il a pour tâche essentielle de s'approprier, par des sortes de « raccourcis didactiques », les contenus culturels » (Brossard 1998, p. 39) cité par Lhoste (2014)

La conception de tels « raccourcis didactiques », pour la théorie newtonienne, est l'objet de cette thèse. Dans la recherche de chemins pouvant y mener, une volonté essentielle et structurante est qu'ils puissent être parcourus tout au long *les yeux ouverts*, sans avoir besoin de croire sur parole qui que ce soit.

Chercher à accoutumer les élèves à cette exigence d'autonomie face à tout argument d'autorité, prolonge notamment cette vision de Raoul Vanegem :

« On n'insistera jamais assez sur l'importance des premiers pas dans la vie. Préparer l'enfant à l'autonomie, lui apprendre que l'indépendance est

sa meilleure protection, l'aider à s'affranchir de toute tutelle, telles sont les pratiques appelées à fonder nos mœurs sur des assises véritablement humaines. » (Vaneigem, 2010)

Tracer « au plus court » donc, au sens du minimum nécessaire pour l'appropriation de ces « objets culturels », mais avec la contrainte de ne jamais - ou le minimum possible - imposer aux élèves d'accepter des idées qui pourraient ne pas être évidentes pour eux, de ne jamais les mettre dans des situations les rendant dépendant et soumis à un argument d'autorité, sous la tutelle de leur enseignant et du savoir savant.

Si cette intention, ainsi que les autres développées dans ce chapitre, peuvent paraître banales et consensuelles, c'est leurs mises en œuvre explicites dans les prochains chapitres qui seront à juger, dans l'esprit annoncé en ouverture :

« ici particulièrement, il était utile de ne pas arracher aux banalités les multiples racines qui permettront de les transplanter dans un autre terrain, de les cultiver à notre profit. » (Vaneigem, 1967)

Chapitre 3

Une approche de l'enseignement de la dynamique

Les trois lois du mouvement - le principe d'inertie, le principe fondamental de la dynamique, et la loi des actions réciproques - constituent le cœur de la dynamique newtonienne. Elles mettent en jeu une certaine définition du concept de force, ainsi qu'une classe particulière de référentiels où elles sont valables : les référentiels galiléens. Ces concepts et lois formulés au départ pour le mouvement d'un point (le centre de gravité d'un corps), se généralisent et se complètent pour le mouvement des solides et des fluides, dont il ne sera pas question ici. Seront abordés uniquement les fondements de la dynamique¹.

Étant donné la quantité de livres et de recherches existant sur le sujet, proposer *encore* une nouvelle approche de la dynamique requiert un argumentaire conséquent. En amont d'éventuels résultats probants avec des élèves, il faut déjà avoir des motivations suffisamment fortes - au moins à titre personnel - pour entreprendre de développer et d'expérimenter *une autre* présentation du concept de force et des lois du mouvement.

Ainsi le choix même de cette ancienne thématique de recherche devra être justifié par les apports et intérêts de la nouvelle approche proposée. L'argumentation visant à établir la pertinence de cette proposition sera donc déterminante.

Afin d'exposer cette argumentation aussi clairement que possible, celle-ci sera structurée en distinguant :

- les problèmes d'apprentissage visés,

1. Ces notions ne seront pas redéfinies explicitement ici, car leur formulation-même est sujette à discussion, qui engage des problèmes conceptuels et didactiques qui seront discutés plus loin.

- les solutions proposées,
- les arguments pour lesquels ces solutions seraient (plus) adaptées relativement aux problèmes visés².

Dans la mesure où les problèmes d'apprentissage considérés seront reconnus comme effectivement importants - c'est-à-dire comme devant effectivement être pris en compte dans l'enseignement - la valeur des solutions proposées pourra être appréciée en jugeant de la pertinence des arguments qui les sous-tendent. Cette argumentation permettra au moins de juger de la valeur *théorique* de l'approche proposée, avant la considération de sa faisabilité pratique sous forme de séquence d'enseignement, et de sa réception par des élèves³.

« Together with a **design to solve the identified teaching/learning problem** one would expect to find **an argument of how this design is expected to do that**. Without such an argument the (sometimes impressive) learning outcomes are difficult to relate to elements of the design. »
(Westra, 2006, p.8)

L'explicitation des problèmes d'apprentissage visés est une étape décisive, dans la mesure où l'analyse de ces problèmes détermine et justifie en grande partie les pistes suivies pour leur solution.

Pour exposer cette proposition d'approche de la dynamique, nous aborderons donc en premier lieu les **idées des élèves sur les forces et le mouvement**, afin de formuler les **problèmes d'apprentissages qui seront considérés ici**, en s'appuyant sur les positionnements généraux synthétisés précédemment⁴.

Viendra ensuite une **analyse de la dynamique newtonienne au niveau épistémologique**, visant à mettre en évidence certains problèmes conceptuels dans les fondements de cette théorie.

En se situant relativement à ces questions épistémologiques, du point de vue des problèmes d'apprentissage visés, les **solutions proposées** dans ce travail seront alors présentées, avec les arguments qui les motivent.

2. Il s'agit d'une reconstruction a posteriori. En pratique, dans le processus de tâtonnement de la recherche, la prise de conscience de certains problèmes a parfois été postérieure à l'examen de leur solution, considérée pour d'autres raisons.

3. ce qui pourrait être jugé dans un second temps à partir de l'expérimentation conçue, dans le chapitre 6.

4. comme le rappelle notamment Lijnse and Klaassen (2004) : « [...] neither education nor science are value-free processes and, thus, [...] 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. »

3.1 Idées des élèves & problèmes d'apprentissage visés

3.1.1 Des cadres théoriques d'interprétation

Les idées et modes de raisonnement du sens commun en dynamique ont été très largement étudiés par la recherche en didactique depuis une trentaine d'années (Viennot, 1978; Clement, 1982; McCloskey, 1983; Halloun and Hestenes, 1985).

Leurs analyses ont varié selon différents développements théoriques, les voyant tantôt comme des habitudes interprétatives élémentaires, déconnectées les unes des autres (« knowledge in pieces » (DiSessa, 1988)), ou tantôt comme des théories alternatives avec une certaine cohérence (Vosniadou et al., 2008). Depuis l'article de Posner et al. (1982) *Accommodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change*, une grande quantité de réflexions a été publiée sur le sujet, comme en témoignent notamment Rowlands et al. (1999) :

« Over the past two decades, international research on student understanding of science concepts has produced a vast literature that has attempted to describe that understanding. Much of the research has catalogued the interpretations that students have of scientific concepts (e.g. Boeha 1990), and many of the researchers have attempted to explain the origins and nature of these interpretations (e.g. Bliss & Ogborn 1994). The terms *alternative frameworks* (e.g. Terry & Jones 1986), *alternative conceptions* (e.g. Ramadas et al. 1996), *student prior conceptions* (e.g. Driver 1988), *misconceptions* (e.g. Hestenes 1992), *preconceptions* (e.g. Arons 1990) and *conceptual profiles* (e.g. Mortimer 1995) have been used to refer to the various interpretations of scientific concepts that are at odds with the well-defined meaning of these concepts held by the scientific community. [...] » (Rowlands et al., 1999)

De nombreuses synthèses de ces travaux existent déjà, dont cet article de Rowlands et al. (1999). On peut trouver également une synthèse particulièrement bien organisée dans la thèse de Westra (2006), portant également sur la mécanique⁵. Sans nier la finesse d'analyse des différentes théories existantes, et leur pertinence pour certains types de cas, nous ne reviendrons pas sur celles-ci ici. L'absence de consensus entre ces orientations théoriques dans la communauté a plutôt incité à considérer des problèmes

5. avec la conscience de l'étendue de la littérature sur ce sujet : « It is impractical if not impossible to give an account of what people have done to understand and improve teaching/learning mechanics that comes close to being complete. » (Westra, 2006, p.8)

d'apprentissages plus basiques, en amont des raffinements des divers cadres interprétatifs.

Cette posture rejoint la remarque de Rowlands et al. (1999), qui poursuivent leur observation précédente sur la quantité des développements théoriques, en constatant qu'ils n'ont pas réussi à aboutir à une certaine forme de paradigme, au delà de l'influence partagée du constructivisme :

« The research on the various student interpretations of scientific concepts has generated a constructivist perspective that seems to be a major influence in science education (Mortimer 1995 ; Matthews 1997). **However, it would seem reasonable to suppose that, after twenty years, a paradigm would have emerged that would govern an approach to ideas, theory and observation** - that by now we would have established some form of structured approach to (1) the nature of student ideas with respect to the learning of science, (2) how these ideas are generated, (3) how these ideas effect the construction of scientific concepts in the classroom and (4) the steps necessary to facilitate that construction. **What we have instead are the many reports that describe student understanding and much reference to philosophical issues that pertain to pedagogy, epistemology and psychology.** » (Rowlands et al., 1999)

Nous ne chercherons donc pas à nous situer au sein des différents courants sur le changement conceptuel. Ceux-ci ont plutôt été considérés comme des points de repère pouvant aider à interpréter certaines situations concrètes, sans avoir besoin de spéculer sur leur degré de généralité⁶. Au final les difficultés majeures prises pour cible dans cette proposition d'enseignement ne nécessitent pas de se prononcer vis à vis de ces différentes théories.

Avant d'explicitier les problèmes considérés dans l'apprentissage de la dynamique, commençons par une synthèse des modes de pensée principaux ayant été identifiés sur les forces et le mouvement.

6. dans l'état d'esprit notamment de cette citation de Driver (1989) : « In the complex business of classroom learning in science, it is likely that all these perspectives, 'theory-change', 'knowledge-in-pieces' and 'situated cognition' have a contribution to make. The question for science educators is not so much which model to adopt but to identify, from the evidence about children's reasoning and an analysis of the structure of the science to be taught, when each may be appropriate. »

3.1.2 Synthèse des tendances majeures du sens commun

Quand on demande les forces qui s'exercent sur un objet ayant été jeté verticalement vers le haut, un commentaire classique d'élève est le suivant : « Pendant la montée, il y a la force de l'objet vers le haut, transmise par le lanceur ». Il s'agit d'une réponse extrêmement répandue, encore en études supérieures, et incompatible avec le point de vue physique selon lequel le poids et les forces de frottement de l'air agissent sur l'objet. Ce commentaire permet d'illustrer les tendances majeures du sens commun en dynamique (Viennot, 1978; Halloun and Hestenes, 1985) :

- **Penser la force comme cause du mouvement, dans la direction de celui ci, intuitivement associée à la vitesse.** (Une force vers le haut pour le mouvement vers le haut). Un mouvement à vitesse constante nécessite une force constante, et un mouvement dont la vitesse augmente nécessite une force qui augmente.
- **La tendance à aller chercher une cause dans le passé, quand les forces connues ne semblent pas compatibles avec le mouvement.** (Dans ce cas, comme le poids – dirigé vers le bas – semble incompatible avec un mouvement vers le haut, alors il faut quelque chose d'autre : la force qu'a donnée le lanceur, vers le haut).
- **Penser la force comme une quantité que possède l'objet** (la force *de* l'objet), qui peut être transmise, stockée et s'épuiser. (La force donnée *par* le lanceur). On parle parfois de « capital de force » (Viennot, 1977) .

Ces modes de raisonnement du sens commun correspondent à des tendances générales. D'autres moins répandues ont été mis en évidence, ainsi que des distinctions plus précises parmi celles-ci, sur lesquelles nous ne nous arrêterons pas.

Une considération importante, et qui justifie ce choix, est que les réponses d'élèves interprétées sont fortement dépendantes de la situation physique en jeu, du type de question posée, et de la formulation des réponses d'élèves. Cette dépendance inévitable au contexte a été mise en avant par Laurence Viennot dans son travail de thèse (Viennot, 1977) puis plus tard, comme le synthétise Rowlands et al. (1999) :

« A taxonomy of student conceptions may be impossible because, as Viennot (1985) has stated, the consideration of 'misconceptions' requires a specificity regarding the framework from which the 'misconceptions' occur : namely, what kind of problem prompts the misconception, what formulations are used in holding the misconception, and how the misconception is linked to other forms of reasoning. » (Rowlands et al., 1999)

Viennot (1977) proposait plusieurs catégories de situations ayant tendance à déclencher les différents modes de raisonnement qu'elle a identifiés, selon que le mouvement soit compatible ou non avec les forces « connues » dans cette situation.

« [...] bon nombre d'étudiants obéissent à une nécessité intuitive de « compatibilité » entre force et mouvement, et [...] ils sont prêts à fabriquer au besoin la force nécessaire, dans le sens du mouvement si mouvement il y a, opposée aux forces réelles s'il y a « équilibre » (traduire : vitesse instantanée nulle). » (Viennot, 1977, p.71)

Cette idée de dépendance aux types de situations est également soulignée par (Rowlands et al., 1999) :

« [...] the findings suggest [...] that alternative ideas are **context specific**, that is, specific to the various forms of motion presented [...]. The student's **intuitive schema of force and motion** is not well defined and is specific to the dominant features of the situation — how the student perceives the **dominant feature** of the situation triggers his response to the situation. » (Rowlands et al., 1999)

Cette caractéristique implique pour ces chercheurs qu'il n'est pas légitime de parler d'un concept intuitif de force, et ils préfèrent ainsi la notion de « schema »⁷ reliant les différents modes de raisonnement possibles selon les cas.

« An 'intuitive concept of force' seems to suggest a concept that is fairly well formed; whereas it might well be the case that instead of a concept of force, we have a schema of loosely related and poorly differentiated concepts formed from spontaneous reasoning. » (Rowlands et al., 1999)

C'est en s'appuyant sur cette considération qu'ils critiquent l'idée de « changement conceptuel » pour le cas de la mécanique. Si l'on ne peut pas parler d'un « concept intuitif de force », alors il n'est pas légitime de voir l'apprentissage de la notion physique de force comme l'évolution d'un « concept intuitif » vers un « concept scientifique », dont la caractéristique est d'avoir une définition unique et précise, s'appliquant pour toutes situations.

Dans ce travail, les « idées du sens commun sur les forces et le mouvement » seront considérées également dans cette perspective : comme un ensemble de modes de raisonnement d'élèves, dépendant des situations considérées, s'observant de manière récurrente.

7. « A schema may be defined as a mental representation of a set of related categories, i.e. as a cluster of related concepts (Howard, 1987). A schema is an organised body of knowledge, a mental structure, that helps us to make sense of the world. A schema establishes the relation between concepts. » (Rowlands et al., 1999)



Laurence Viennot

Un premier constat unanimement partagé est que ces tendances restent très présentes même après enseignement. Plus précisément, on observe une utilisation parallèle et parfois mixte de ces différents modes de raisonnement et du concept physique de force.

« Savoirs appris et raisonnements naturels peuvent coexister, se réservant chacun des lieux d'exercices différents. Il en résulte beaucoup d'ennui en cours d'apprentissage et une maîtrise incertaine en fin de compte. » (Viennot, 1996, p.13)

3.1.3 Problèmes d'apprentissage visés

A partir de la revue des idées et modes de raisonnement commun à propos de la dynamique, trois problèmes d'apprentissage ont été pris pour cible dans ce travail. Il s'agit :

- du problème de la coexistence du sens commun et du sens physique chez les apprenants,
- du problème de l'ambiguïté de la notion de causalité,
- du problème de la non évidence de la notion d'attraction terrestre.

1) La coexistence du sens commun et du sens physique

Le constat de la coexistence est certainement un fait très courant lors de l'apprentissage d'un contenu scientifique en général.

« [...] au moment où les concepts scientifiques sont introduits par le professeur, il y a cohabitation, dans la tête de l'élève, de deux réseaux (réseau des concepts quotidiens et réseau des concepts scientifiques) » (Lhoste, 2014)

Gilbert et al. (1982) distinguent différentes formes de cette cohabitation. A partir de l'analyse d'entretiens conduits avec des élèves de 15 à 20 ans ayant eu suivi un cours sur la dynamique, ils proposent une catégorisation de quatre types de compréhension insuffisante résultant de l'enseignement :

- « **UNDISTURBED CHILDREN'S SCIENCE OUTCOME** : Some children have viewpoints which appear to be quite uninfluenced by formal teaching. However, although the viewpoint is essentially unaltered, **often some language of science is now used to describe the viewpoint.** »

- « **TWO PERSPECTIVES OUTCOME** : It is possible for the student basically to reject the teacher's scientific view of the world but to consider it

as something that must be learnt, e.g. for assessment purposes. **The students, therefore, has two views but the learned science viewpoint is not one that is used outside the formal learning situation.** »

- « REINFORCED OUTCOME : The dominance of the students' prior understandings and meanings for words can, as suggested earlier, often lead to quite unintended interpretations of what is being taught. As one example of this, **quantities defined in science in a particular way can be misinterpreted to mean something quite different.** The children's science viewpoint is maintained following teaching but scientific concepts are put forward to explain or underpin a particular viewpoint. »

- « MIXED OUTCOME : In many cases scientific ideas are learnt, understood and appreciated by learners. However, these ideas are interrelated in many different ways and at any one time only a certain amount can be learnt. Frequently, this results in **students holding ideas that are not integrated and may be selfcontradictory.** In this outcome the **learners' views are a mixture or amalgam of children's science views and teachers' views.** » (Gilbert et al., 1982)(emphase ajoutée)

Les passages mis en gras pour chacun de ces types de compréhension correspondent à plusieurs modes de coexistence des idées du sens commun et du sens physique des concepts en jeu.

La première d'entre elle, selon laquelle « some language of science is now used to describe the [intuitive] viewpoint » rejoint en particulier l'interprétation de Bliss and Ogborn (1993) vue précédemment, à propos de l'usage du vocabulaire scientifique : « [...] people hear such words in use and give them meaning and roles consistent with what they already think. ».

Vis-à-vis du dernier type de compréhension - « learners' views are a mixture or amalgam of children's science views and teachers' views » -, c'est également ce que retrouve Halloun and Hestenes (1985) via un questionnaire passé par 478 étudiants en première année de physique à l'université.

« The multiple-choice alternatives to a number of the questions on the diagnostic test are readily classified as characteristic of either Aristotelian [association force vitesse], Impetus [capital de force], or Newtonian theories. [...] nearly every student used some mixture of concepts from the three theories, and appeared to be inconsistent in applying the same concept in different situations. [...] No doubt much of the incoherence in the student

CS systems is the result of vague and undifferentiated concepts. »(Halloun and Hestenes, 1985)

On peut trouver également certaines explications d'élèves mettant en jeu différents sens du concept de force pour l'explication d'une même situation. Ce genre de situations a été analysé en particulier par Mildenhall (1998) dans son travail de thèse :

« Previous studies have suggested that students may compartmentalise knowledge : their everyday intuitions will serve in everyday contexts and their academic knowledge is activated, if ever, in academic contexts. In this study we put forward a case where significant numbers of students of Newtonian theory provide mixed explanations of motion in the same context. »(Mildenhall, 1998)

On peut observer d'autre part, pour une question donnée, que la réponse peut être celle du sens commun, tandis que la justification de cette réponse se fait à partir de la définition physique. C'est le cas en particulier dans l'expérimentation de Viennot (1977), où on considère plusieurs balles identiques ayant une trajectoire différente (figure 3.1.1), et on demande si la force s'exerçant sur chacune des balles est identique ou différente.

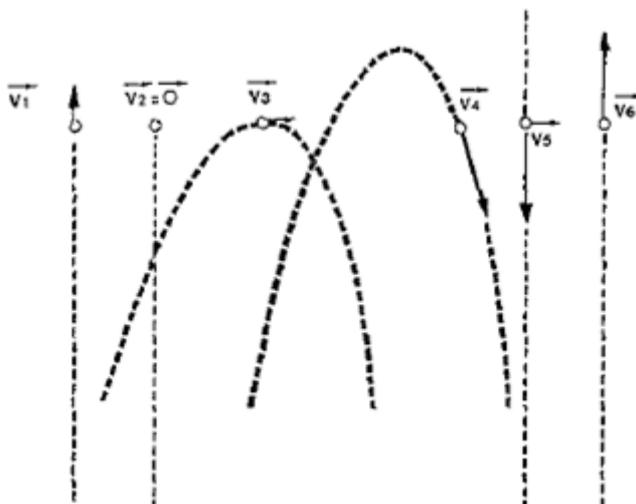


FIGURE 3.1.1 – « balles de jongleur identiques, à la même altitude » (Viennot, 1977)

Sur environ 200 étudiants en première et deuxième années d'université (en France, Belgique et Royaume Uni), plus de 50 % répondent que les forces sont différentes. Parmi les justifications d'étudiants données à cette réponse, on trouve la suivante (Viennot, 1977) :

« La force qui s'exerce sur chaque balle est $F = ma$. Les balles étant identiques, c'est a qui varie. Pour v_1 , a est positive. La balle continuera à monter. Pour v_2 , a est nulle. La balle redescendra. Pour v_3 [...] » (p.22)

Ce type justification illustre particulièrement bien cette synthèse du problème dans (Viennot, 1979) :

« Ces modes de raisonnement constituent une « physique » implicite, très généralement pratiquée. Dans le cadre scolaire en particulier, les étudiants l'utilisent parallèlement à celle qu'on leur enseigne, inconscients de marcher sur deux pistes à la fois, bien qu'ils cherchent parfois à détourner l'une pour la ramener à l'autre. » (Viennot, 1979)

2) L'ambiguïté de la notion de causalité

L'idée de causalité, dans son utilisation la plus courante, est associée à celle de chronologie, *la cause précède l'effet*.

« L'analyse causale des phénomènes, dans le domaine de la physique comme ailleurs, conduit à raisonner en termes de causes, antérieures à leurs effets. Le temps est naturellement présent dans notre recherche d'intelligence du monde, et s'y associe à l'idée de succession. » (Viennot, 1993)

Si l'on considère qu'un des rôles de la description physique est de rendre compte de l'évolution de systèmes dans le temps, il est légitime de penser que l'on va s'intéresser aux causes qui impliquent temporellement une certaine évolution. Ainsi en particulier, penser la notion de force en tant que cause du mouvement, sous entendant implicitement une antériorité, est de ce point de vue assez naturel. En revenant à l'exemple du projectile en mouvement vers le haut, le fait de rechercher une cause dans le passé du mouvement (la force du lanceur) semble une façon de raisonner tout à fait raisonnable, relativement aux significations usuelles.

Ce point de vue chronologique n'est cependant pas compatible avec la dynamique newtonienne, où la force à un instant donné correspond à l'accélération du mouvement à ce même instant. Viennot (1993) met en avant ce problème en parlant de « délocalisation temporelle des grandeurs et des relations ».

« Ces tendances communes consistent à nier, implicitement ou non, le fait que toutes les grandeurs impliquées dans des relations où ne figurent pas le temps soient à considérer au même instant. » (Viennot, 1993)

Pour le cas de la dynamique, elle propose dans *Raisonnement en physique* (Viennot, 1996) de mettre en avant cette idée en promouvant l'écriture : $\vec{F}(t) = m\vec{a}$ (même t).

L'incompatibilité entre l'instantanéité de cette relation et sens chronologique de la causalité est d'autant plus important que la formulation de la force comme cause de l'accélération est la plus répandue.

« In a sample of about a hundred textbooks [...], it was verified that “force is the cause of acceleration” is the most common definition of force. »
(Coelho, 2010)

Du point de vue du physicien, une telle formulation signifie que le terme de cause est implicitement entendu au sens logique : la cause comme premier terme d'une implication. Dans $A \Rightarrow B$, parler de A comme cause de B pour signifier qu'il s'agit d'une condition suffisante de B , ne met effectivement en jeu aucune temporalité. Cependant, de fait, dans le langage courant partagé par les élèves, la cause précède l'effet. L'ambiguïté de sens de la notion de causalité, entre logique et chronologie est un problème majeur qui ne peut être laissé dans l'implicite⁸.

3) La non évidence de l'idée d'attraction terrestre

De nombreuses recherches rapportent que la chute verticale, associée au terme de « gravité », est fréquemment considérée comme un mouvement ayant lieu de lui-même, c'est-à-dire ne nécessitant pas de « force » pour se produire.

« [...] 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)

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

« The same student argued that a force is not required for objects to fall, since they “always want to go down”. As he explained, “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...the ball wants to go down, but you were holding it...so when you let go, it goes

8. Cela rejoint l'importance accordé en 2.3.3 à la « vigilance aux ambiguïtés possibles des mots que l'on compte utiliser, indépendamment de ce qu'on veut dire par eux dans le contexte du contenu en jeu » p.30.

back to ground, and there is gravity". Here the interviewer intervened to ask whether gravity is a force; the student replied : "No. I don't know...I guess not since [after a ball is released] it speeds up for a short while...to reach the speed of fall. Then the ball must go at constant speed because there is no force to stop it or maybe to make it speed up... So I guess no, gravity is not a force." » (Halloun and Hestenes, 1985)

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

« 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 and Ogborn, 1993)

La fréquence de la tendance à penser la chute comme un mouvement naturel implique que lui associer une force n'est pas une évidence. De plus le l'idée que cette force soit exercée *par la Terre* est également loin d'être évidente.

Ce constat est exprimé notamment par Weil-Barais and Lemeignan (1993), à l'occasion de travail sur un ressort vertical.

« Quel peut être en effet l'autre objet qui agit sur le ressort ? Cet objet n'est, en effet, ni visible, ni manipulable comme le sont les autres. Le tour de force intellectuel consistant à avancer l'hypothèse que c'est la Terre ne doit pas être négligé. Quand on est à l'écoute des élèves, on voit qu'il y a là un obstacle cognitif majeur » (Weil-Barais and Lemeignan, 1993, p.50)

« L'idée que c'est la Terre qui intervient peut être proposée par un élève, ce qui fut le cas lors de l'atelier que nous avons conduit. Il convient toutefois de signaler que cette hypothèse ne remporte pas l'adhésion immédiate, comme en témoignent les propos suivants : "**Oui c'est la Terre, mais il faudrait qu'on le démontre.... parce qu'on le sait, on l'a appris mais...**" » (Weil-Barais and Lemeignan, 1993, p.105) (emphase ajoutée)

Ce commentaire d'élève est symptomatique du fait que l'idée de l'attraction terrestre est la plupart du temps déclarée un comme un fait à admettre, sans considérer qu'il s'agisse d'une interprétation très éloignée des observations de la vie quotidienne.

3.2 Analyse de contenu & solutions proposées

Les solutions proposées aux problèmes d'apprentissage considérés précédemment seront associées à des positionnements face à des problèmes conceptuels dans les fondements de la dynamique. Nous commencerons par présenter ces questions épistémologiques, avant d'argumenter sur les réponses adoptées dans ce travail, dans une perspective didactique.

3.2.1 Problèmes conceptuels dans les fondements de la théorie newtonienne

Le problème de la circularité des définitions

Le statut des concepts fondamentaux de la dynamique a été beaucoup discuté et critiqué depuis leur introduction par Newton. Une importante synthèse de ces discussions a été effectuée par Jammer (1957), et plus récemment les articles de Ricardo Coelho - dont *Conceptual problems in the foundations of mechanics* (Coelho, 2011) - analysent en particulier les critiques et contributions des physiciens et philosophes à partir du XVIIIe siècle.

Le volume, la richesse et l'intensité des débats épistémologiques sur l'interprétation de la théorie newtonienne montrent qu'il s'agit d'un problème très complexe, voir même insoluble pour un certain nombre d'auteurs, dont Hertz, Poincaré ou Jammer.

« [...] nous devons conclure, qu'avec le système classique, il est impossible de donner de la force et de la masse une idée satisfaisante » (Poincaré, 1897, p.736)

« One has to admit that in spite of the concerted efforts of physicists and philosophers, mathematicians and logicians, no final clarification of the concept of mass has been reached » (Jammer, 1997) cité dans (Coelho, 2011)

Les différentes remises en question peuvent être abordées sous différents angles, mais essentiellement, il s'agit de problèmes de circularité dans les définitions des concepts fondamentaux.

« J'admets qu'on puisse mesurer l'accélération, parce que je passe sur la difficulté provenant de la mesure du temps. Mais comment mesurer la force, ou la masse ? Nous ne savons même pas ce que c'est. Qu'est-ce que la masse ? C'est, répond Newton, le produit du volume par la densité. —

Il vaudrait mieux dire, répondent Thomson et Tait, que la densité est le quotient de la masse par le volume. Qu'est-ce que la force ? C'est, répond Lagrange, une cause qui produit le mouvement d'un corps ou qui tend à le reproduire. — C'est, dira Kirchhoff, le produit de la masse par l'accélération. Mais alors, pourquoi ne pas dire que la masse est le quotient de la force par l'accélération ? Ces difficultés sont inextricables.» (Poincaré, 1902, p.100)

En amont de sa relation au concept de masse, la définition du concept de force pose problème relativement à son rapport au principe d'inertie et à la définition d'un référentiel galiléen.

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 en dynamique, la notion de force est directement quantifiée par l'accélération. Mais l'accélération dépend du référentiel choisi, ce pourquoi on limite l'expression définissant la force 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.

Une autre façon de l'exprimer est de remarquer que la définition d'une force, selon les lois du mouvement, implique qu'une absence de force implique directement une accélération nulle. Donc un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel une accélération nulle (une absence de force), implique une accélération nulle (la vitesse se conserve). Cela rejoint la formulation de cette critique exprimée par Eddington, rapportée par Carson and Rowlands (2005) :

« The concept of force in mechanics has perplexed physicists and philosophers alike. For Eddington, the first law is circular and may be expressed as **'Everybody continues in its state of rest or uniform motion in a straight line, except in so far as it doesn't'** (Black 1964). And if it doesn't then we have an impressed force, which does raise the question as to what is an impressed force and where is it to be found ? » (Carson and Rowlands, 2005) (emphase ajoutée)

Point de vue du physicien et point de vue de l'enseignant

Bien que vis-à-vis de ces définitions, le système final n'ait pas la solidité logique d'une théorie de mathématique pure, le fait est qu'en tant que théorie physique, son efficacité est indiscutable, à la fois au niveau prédictif et explicatif. D'un point de vue de physicien, le critère de la rigueur logique pourrait même être relégué au second plan, derrière celui de l'efficacité pratique de la théorie. « Whatever works ».

Si l'on considère la théorie newtonienne d'une manière pragmatique, c'est-à-dire sans rentrer dans les critiques épistémologiques sur la façon dont ses concepts sont définis théoriquement, mais plutôt avec en tête la manière dont ils sont utilisés en pratique dans les situations concrètes, alors la théorie apparaît comme un système cohérent de concepts et de principes. Mais quand, à partir de ce premier point de vue, on commence à questionner plus en détail la définition des concepts, les problèmes commencent et on s'aperçoit de la circularité.

Une façon d'exprimer cette impression de circularité est que la définition de chacun des concepts dépend, de différentes manières possibles, de celle d'un ou des autres concepts en jeu.

« An inherent problem with conceptual definitions is that the most fundamental ideas are not expressible in terms of still more basic, previously defined concepts. » (Hecht, 2006)

De sorte que pour que tout fonctionne correctement, il faut que tout soit déjà donné, que tout soit à disposition, afin de pouvoir y faire référence. Bien que cela ne corresponde pas à un idéal de rigueur logique, la grande majorité du temps, en pratique, « ça marche ».

Ce caractère circulaire du système de définitions des concepts fondamentaux de la mécanique pose cependant problème vis-à-vis de son enseignement, comme l'exprimait déjà Hertz en 1900 dans son manuel de physique :

« it is exceedingly difficult to expound to thoughtful hearers the very introduction to mechanics without being occasionally embarrassed. Without feeling tempted now and again to apologize, without wishing to get as quickly as possible over the rudiments, and on to examples which speak for themselves » (Hertz, 1900, p.6-7), cité dans (Coelho, 2010)

Même si au final la théorie newtonienne - une fois installée - « fonctionne », le fait est que lors de son exposition devant un public ne connaissant pas ou peu le sujet,

la présentation est nécessairement progressive. Au sens où il faut bien commencer par quelque chose, et choisir l'ordre dans lequel les différentes notions vont être introduites. D'autre part, lors d'une première introduction du sujet, mettre en avant les problèmes conceptuels ou épistémologiques de prime abord n'est certainement pas une option défendable. En effet avant de pouvoir considérer ces problèmes, il faut bien entendu d'abord se familiariser suffisamment avec la théorie en question. Du point de vue de l'apprentissage et de la compréhension, en tant qu'ils comprennent une dimension importante de recherche de la logique interne d'un sujet donné, il est nécessaire que ce sujet présente initialement une certaine logique. Dans le cas de l'exposition d'une théorie, une analogie peut être l'exposition des règles d'un jeu : il faut qu'elles soient cohérentes, non contradictoires entre elles, pour pouvoir être comprises et acceptées. Il en est de même relativement à l'intention pédagogique selon laquelle les élèves devraient développer une capacité de réflexion rationnelle dénuée de contradictions.

« Science teaching experts agree that it is important to develop logical and critical thinking. It is, however, difficult to achieve this goal if the issues to be taught include logical or conceptual inconsistencies. Such problems, which have affected the foundations of mechanics for decades, emerge in introductory courses of physics in high school and university textbooks. »
(Coelho, 2011)

Cela implique donc qu'il faille, dans un premier temps, trouver un moyen de présenter la théorie de manière logiquement cohérente, « comme si » il n'y avait pas de problèmes conceptuels.

Ainsi, le problème de circularité des définitions, relativement aux contraintes d'une présentation du sujet qui soit à la fois progressive et cohérente, nécessite de faire des hypothèses face aux problèmes conceptuels en jeu. Celles-ci peuvent être vues comme des positionnements permettant de « couper » le cercle des définitions, afin de rendre possible leur introduction étape par étape et à partir d'un certain point de départ, tout en ayant conscience que les problèmes conceptuels associés à la circularité ne sont pas résolus pour autant⁹. Il s'agit donc de choix didactiques, au sens où ils sont motivés par des raisons relatives à l'apprentissage centrées autour des trois problèmes formulés dans la section précédente :

— la coexistence du sens commun et du sens physique de la notion de force,

9. Cela n'empêche pas par ailleurs de mentionner les problèmes associés à ces positionnements dans un enseignement, mais d'une manière annexe, qui ne bloque pas la progression logique de la présentation.

- l'ambiguïté de la notion de causalité,
- la non évidence de l'idée d'attraction terrestre.

3.2.2 Définition du concept de force : deux postures face au principe d'inertie

Le statut du concept de force relativement aux lois du mouvement a été beaucoup discuté et critiqué depuis son introduction par Newton. L'ensemble des critiques et contributions des physiciens du 18^{ème} et 19^{ème} siècles ont été en particulier rassemblées et analysées par Coelho (2010).

« There was a considerable effort concerning the understanding of force. D'Alembert, Lazare Carnot, Kirchhoff, Hertz, among others, did not only criticize the most common definition of force but also developed new theories in order to avoid that concept. [...] How force could be conceived in compliance with these scientists' contributions and without the inconveniences raised by the criticism of the concept, is the question to deal with in the present article. » Coelho (2010).

Sans rentrer ici dans l'analyse détaillée de l'auteur, on peut déjà distinguer deux types d'interprétation des forces entre lesquelles peuvent se répartir les différentes critiques. Cette distinction reprend celle développée par Hesse (1961), sous le nom d'interprétation empirique et d'interprétation logique des lois du mouvement. Ces deux interprétations se démarquent en premier lieu par le rôle attribué au principe d'inertie relativement au concept de force, selon que l'on considère le concept de force comme ayant un sens indépendant du principe d'inertie ou non.

L'Interprétation empirique des lois du mouvement

L'interprétation empirique correspond au cas où le concept de force à un statut indépendant, c'est-à-dire que les forces peuvent être reconnues indépendamment de leur rôle dans les lois de Newton¹⁰.

Le principe d'inertie a ainsi plutôt le statut d'une loi empirique, consistant en deux étapes :

10. « From this point of view the law can be regarded as an empirical generalisation, involving extrapolation to ideal experimental conditions, [...] and that we can recognise situations in which force is acting. » (Hesse, 1961)

1. On suppose qu'il est possible de reconnaître les forces (concept indépendant).
2. Par généralisation, pour des conditions expérimentales idéales, si aucune force ne s'exerce sur un objet (« corps libre »), alors son mouvement est rectiligne uniforme.

L'interprétation logique des lois du mouvement

L'interprétation logique, correspond inversement à considérer le concept de force comme directement relatif au principe d'inertie, qui est alors vu comme la définition du mouvement de référence à partir duquel toute déviation est interprétée en termes de force¹¹.

Le principe d'inertie consiste alors en :

1. Une définition du mouvement inertiel, en tant que mouvement de référence.
2. Une première définition qualitative d'une force, dont le critère d'existence est l'écart à ce mouvement de référence (en anglais, « a deviation from a motion of reference » en reprenant les termes de (Coelho, 2010)).

Dans cette interprétation, la définition du mouvement de référence est liée également à des observations expérimentales, mais on peut commencer à voir que la différence se fait au niveau du cas de la gravité, pour lequel on observe un mouvement accéléré, sans cause apparente a priori. Ceci nécessite de définir explicitement les mouvements pour lesquels on parle ou non de force, indépendamment de la possibilité d'identifier leur cause.

« No doubt the form of the law is suggested by the fact that when what we normally call 'forces' are missing, bodies do tend, on the whole, to continue in their state of rest or uniform motion, but they do not always do so, as the example of falling bodies shows.» (Hesse, 1961, p.135)

L'interprétation empirique correspond à celle généralement adoptée dans les présentations de la dynamique cherchant à établir ses fondements, par exemple (Giancoli, 1993; Benson, 1999; Hecht, 2003; Alonso and Finn, 2004). Ce type d'approche, présentant la force comme un concept indépendant, a cependant été sujette à de nombreuses critiques au cours de l'histoire des sciences. La formulation de Coelho (2010) utilisée ici pour exprimer l'interprétation logique - l'idée de *déviaton d'un mouvement de référence* - est

11. « From the logical point of view on the other hand, the law can be regarded as a definition of inertial motion, that is, if we do not assume that we have independent ways of recognising force-situations, it provides the means of testing whether or not there are forces acting upon the body. » (Hesse, 1961, p.135)

la conclusion d'une synthèse des critiques exprimées par Euler, d'Alembert, Lagrange, Lazare Carnot, Saint-Venant, Kirchhoff, Mach, Hertz, Poincaré.

« The concept of force as a deviation from a certain motion enables us to integrate theses of philosophers of science and to understand their criticism » (Coelho, 2010)

Au niveau de la littérature en didactique, plusieurs chercheurs relèvent également la tendance actuelle, et se prononcent plutôt en faveur de l'interprétation logique des lois du mouvement.

« The axiomatic form of mechanics is not appreciated in much of the textbook literature, whose treatment of mechanics may be described as empiricist : that the laws and principles of mechanics are summaries of what is given in sense perception. [...] In this section it will be argued that the laws of motion (unlike 'facts' such as Hooke's law) are axioms that together define force » (Carson and Rowlands, 2005)

Il s'agit également du positionnement de Hestenes (1992); Rowlands et al. (1999); Klaassen (2005); Westra (2006); Coelho (2010).

« With the concepts of space, time and particle understood from the Zeroth law, the concept of mass and force are *defined* by the rest of Newton's laws » (Hestenes, 1992)

« [...] force is defined by the laws of motion and can be applied to different types of motion without having to change the definition or meaning of force with respect to each type. » Rowlands et al. (1999)¹²

C'est également ce choix qui va être adopté dans ce travail, qui sera argumenté plus loin. Avant d'entrer dans les raisons didactiques de celui-ci, il est intéressant pour la suite de s'intéresser à certaines considérations épistémologiques relatives à l'interprétation logique.

Ellis et le caractère conventionnel du concept de force

Parmi les conséquences de l'interprétation logique des lois du mouvement, le caractère conventionnel de la définition du concept de force auquel conduit l'interprétation logique des lois du mouvement a été souligné en premier lieu par Hertz (1900) et Poincaré

12. Les formulations des autres auteurs seront traitées plus précisément plus loin.

(1902), puis repris et développé dans un article de Ellis (1965), intitulé *The Origin and Nature of Newton's Laws of Motion*.

Le propos d'Ellis se base d'une part sur le lien entre le concept de force et celui d'explication causale, et d'autre part sur le constat qu'une explication causale est nécessairement relative à un état ou mouvement naturel de référence, celui-ci ne nécessitant pas d'explication en terme de cause. Le caractère conventionnel provient alors de cette dépendance, qui peut être schématisée simplement ainsi :

1. La définition du concept de force est relative au mouvement « naturel » choisi comme référence.
2. Il y a un caractère conventionnel dans le choix du mouvement de référence, et donc dans la définition du concept de force.

« it is a matter of convention what states we should regard as natural, and hence what things we should regard as force-effects, and hence what forces we should say exist » (Ellis, 1976, p.175).

Ainsi le principe d'inertie est considéré comme une définition du mouvement naturel de référence à partir duquel se définit le concept de force, comme cela est bien synthétisé par Hunt and Suchting (1969) :

« Ellis argues that the law of inertia is an instance of a "framework" law which lays down what is the "natural" mechanical behaviour of bodies, as regards motion, with respect to which we may discriminate "unnatural" behaviour requiring causal explanation in terms of postulated forces : the failure of a body to persist either in a state of rest or uniform rectilinear motion is taken to mean that it is subject to a resultant force. Thus the first law is interpreted as a convention definitory of the notion of a Newtonian force. » (Hunt and Suchting, 1969)

L'argument principal pour aborder cette relativité s'appuie sur l'évolution des idées sur le comportement « naturel ». Dans la physique d'Aristote en effet, le mouvement considéré comme naturel pour un objet est de retourner en « son lieu naturel » par le chemin le plus court. La chute libre des objets n'est donc pas considérée comme due à l'action de force. Une force est nécessaire seulement pour empêcher ou modifier ce mouvement naturel. Chez Descartes puis Newton, le concept de « lieu naturel » est abandonné, et c'est le mouvement rectiligne uniforme qui est vu comme mouvement naturel, redéfinissant ainsi les mouvements étant interprétés en termes de force, en particulier la chute libre.

Un point notable par ailleurs est que la considération de la chute libre en tant que mouvement naturel a perduré jusque Galilée, qui sur ce point est resté très proche d'Aristote.

« However much we want to read his analysis of free fall as the description of a uniform acceleration produced by a constant force, Galileo never treated it in such terms. Weight was not a force acting on a body to accelerate it. On the contrary, weight was more a static force which a body exercises on another that restrains it from its natural motion. » (Westfall, 1971, p.9)

Le second argument d'Ellis pour établir le caractère conventionnel du principe d'inertie est de proposer une autre formulation de la dynamique, équivalente à celle de Newton, basée sur un autre choix de mouvement naturel. Le point de départ de ce système alternatif consiste simplement à intégrer la loi de la gravitation dans la première loi du mouvement, en posant comme mouvement naturel les accélérations gravitationnelles. Celle-ci devient alors :

« Every body has a component of relative acceleration toward every other body in the universe directly proportional to their mass ; and inversely proportional to the square of the distance between them – unless it is acted upon by a force. » (Ellis, 1965)

Ensuite, le concept de force dans ce système alternatif a le même rôle que dans le système de Newton, dans le sens de l'interprétation logique, c'est-à-dire : ce qui permet de quantifier la cause de la déviation du mouvement naturel de référence, posé par la première loi. Pour obtenir un système équivalent à la dynamique de Newton, la grandeur force « au sens de Ellis » est définie comme associée à l'accélération du mouvement relativement à l'accélération naturelle.

Une telle redéfinition des lois du mouvement a bien entendu des nombreuses conséquences sur le reste de la dynamique, mais Ellis montre dans son article que les ajustements à faire relèvent en définitive essentiellement de questions de vocabulaire, relatives de près ou de loin au choix du mouvement naturel de référence, c'est-à-dire à l'expression du principe d'inertie.

L'article de Brian Ellis (1965) a suscité une importante controverse en philosophie des sciences, avec des articles de réponse particulièrement intenses tel celui de Hunt and Suchting (1969) ou plus tard (Earman and Friedman, 1973)¹³. La thèse d'Ellis a

13. L'analyse de ces articles - très techniques, et sur lequel nous ne reviendrons pas ici - a mis en évidence des arguments tenant de convictions réalistes, qui ont été jugées comme discréditant en partie leur argumentaire, relativement à la position d'agnosticisme épistémologique développé dans la section

également eu le support de certains philosophes, tel Norwood Hanson (une influence forte de Thomas Khun). Dans l'article *A response to Ellis's conception of first law*, Hanson (1965) conclut notamment par cette phrase marquante :

« A mark of my high estimation of Ellis's foregoing contribution is that I wish I could have written it myself. »

Un autre aspect qui justifie l'attention à cette proposition de formulation de la dynamique est sa proximité, au niveau conceptuel, avec la relativité générale. Le fait de voir les composantes d'accélération vers les autres corps comme un mouvement naturel rappelle en effet l'idée de géodésique libre dans un espace-temps courbé par la présence des autres corps.

Il semblerait par ailleurs que cette proposition soit déjà apparue bien avant Ellis :

« Hofman (1904) formulated a law of inertia which avoids the free-body problem. His statement changes, however, the status of the law in the theory, since it presupposes the gravitation law instead of the law of inertia in first place in the logical structure of the theory. Furthermore, it disturbs the disjunction which characterizes the law of inertia : between the motion of a body by itself and the motion of the body by others. Hofman's approach was corroborated by Einstein (1913, p. 1260) but has never been adopted in mechanics. » Coelho (2011)

Toulmin et les conceptions idéales de l'ordre naturel

Une réflexion très proche de celle de Brian Ellis se retrouve également chez Stephen Toulmin (à peu près à la même époque). A partir de l'analyse de plusieurs exemples dans l'histoire des sciences, il montre la récurrence de « conceptions idéales de l'ordre naturel », déterminant les phénomènes à expliquer. L'évolution des conceptions sur l'ordre naturel implique alors l'évolution de certaines interprétations de phénomènes.

« Des types d'évènements qu'autrefois les hommes avaient acceptés comme le cours naturel des choses en vinrent, comme nous le verrons, à être considérés comme complexes et anomaliques, alors que d'autres, qui avaient jusque-là semblé exceptionnels, anomaliques ou même inconcevables, en vinrent à être traités comme des exemples parfaits de l'ordre naturel. » (Toulmin, 1973, p.52)

2.4.2 p.38 (« la physique comme mise en relation »). Si leurs présupposés métaphysiques (implicites) ne sont pas partagés, leur critique du propos d'Ellis perd fortement de sa vigueur.

Parmi les exemples considérés figure également celui de la dynamique newtonienne.

« Dorénavant on ne considère le mouvement d'un corps comme auto-explicatif que lorsqu'il n'est soumis à l'action d'aucune force, son propre poids inclus [...]. Mais, au point de départ de la théorie de Newton, nous est présenté comme paradigme un exemple complètement abstrait, à savoir un corps qui se meut à une vitesse uniforme selon une droite euclidienne. Une telle situation, aurait répliqué Aristote, est la dernière chose que l'on découvrira jamais dans le monde réel. Mais Newton n'a pas besoin de prétendre qu'il existe en fait un corps réel qui se meuve exactement comme sa première loi le prévoit. **Il nous fournit plutôt une norme pour déterminer en quoi le mouvement d'un corps nécessite explication, et quelles forces doivent apparaître comme imprimées à ce corps si nous voulons réussir à expliquer son mouvement.** Ce n'est que si un corps était laissé entièrement à lui-même qu'il suivrait à une vitesse régulière une ligne droite ; dans la réalité jamais aucun corps ne se trouve placé dans cette situation extrême. Il ne s'agit là pour Newton que d'une conception dynamique idéale, le seul type de mouvement qui serait auto-explicatif, qui serait dénué de toute complexité et n'appellerait aucun commentaire (s'il se produisait jamais). » (Toulmin, 1973, p.63) (emphase ajoutée)

En lien avec l'idée de conventionalité abordée précédemment, Toulmin insiste sur la non évidence a priori d'un certain choix de référence « d'ordre naturel », et du caractère provisoire d'une telle conception.

« Les changements dans nos conceptions idéales de l'ordre naturel sont quelquefois susceptibles d'être justifiés, mais il faut qu'ils soient justifiés de façon positive. Le mouvement rectiligne uniforme finit par devenir aussi naturel et auto-explicatif pour les successeurs de Newton que l'immobilité l'avait été pour Aristote. **Pourtant le caractère correct d'aucune de ces deux conceptions n'allait de soi : chacune devait faire ses preuves en produisant des résultats. Ainsi son adoption comme conception idéale de base de la dynamique était-elle conditionnelle et provisoire.** Aussi longtemps en effet que nous continuons à travailler avec les notions fondamentales de Newton, son principe de l'inertie garde sa place en physique. Mais il a déjà, au niveau d'analyse le plus raffiné, perdu toute autorité. En conséquence du passage à la physique de la relativité effectué au XXe siècle, la conception du « mouvement naturel » qu'exprime la première loi de Newton a de nouveau dû être reconsidérée. Les conséquences

des modifications de nos idées qui en ont résulté ont été moins radicales que lors de la révolution du XVII^e siècle ; pourtant, au niveau théorique, le changement a quand même été profond. » (Toulmin, 1973, p.67) (emphase ajoutée)

L'idée de relativité de l'explication est également reprise par Davidson (1995) :

« Events are changes that explain and requires such explanations. This is not an empirical fact : nature doesn't care what we call a change, so we decide what counts as a change on the basis of what we want to explain, and what we think available as an explanation. In deciding what counts as a change we also decide what generalizations to count as lawlike. [...] if you can't explain it using one assumption of what counts as a change, adopt new categories that allow a redefinition of change » (Davidson, 1995), cité dans (Klaassen, 2005)

3.2.3 Arguments didactiques contre l'interprétation empirique

Les considérations épistémologiques présentées précédemment soutiennent le point de vue de l'interprétation logique (force définie par les lois du mouvement), pour des raisons essentiellement philosophiques. Vont être considérées maintenant des motivations au niveau didactique, relatives aux problèmes d'apprentissage considérés. Il s'agit d'arguments indirects, consistant à mettre en évidence l'insuffisance - voir le danger - de l'interprétation empirique (la force comme un concept indépendant) pour l'apprentissage de la dynamique.

Le problème de la coexistence du sens commun et du sens physique de la notion de force

Lorsque le concept de force est implicitement vu comme indépendant des lois du mouvement, son sens est a priori généralisé à partir de l'idée intuitive d'action, c'est-à-dire basé sur les exemples les plus courants d'action de contact (comme la poussée ou traction d'un objet). Darrigol (2007) parle d'un « proto-concept de force » :

« In order to move a body or to alter its motion at a given instant we must exert an effort that results in muscular sensations. We roughly know that such actions have degree and direction. They define a proto-concept of force. » (Darrigol, 2007)

En plus du caractère vectoriel d'une action (direction et intensité), une caractéristique importante de cette notion intuitive est le fait que l'on puisse reconnaître l'agent à l'origine de cette action (ce qui est déjà dans sa définition la plus courante : « Opération d'un agent »).

Ce proto-concept de force est également valable pour les actions à distance courantes, comme la répulsion ou l'attraction entre aimants par exemple, ou d'objets chargés électriquement. Dans chacun des cas, on perçoit facilement que l'action en jeu à une certaine direction et une certaine intensité, et l'on peut identifier l'agent à l'origine de l'action considérée. L'action sur le premier aimant est exercée par le second, et vice-versa. Ainsi ce proto-concept de force, indépendant des lois du mouvement, suffit à définir une idée d'« interaction », qui semble légitimer la définition autonome du concept de force dans l'interprétation empirique.

Or ces deux caractéristiques - le caractère vectoriel et l'idée d'agent - qui sont effectivement des caractéristiques du concept physique de force, n'excluent cependant pas a priori de lui associer d'autres caractéristiques intuitives de l'idée de force du sens commun, puisque ce proto-concept de force a déjà une origine intuitive. La notion de force définie au premier abord par son caractère vectoriel et le fait qu'elle soit exercée par un agent, n'exclut pas par exemple de penser que cette force soit dans la direction du mouvement, proportionnelle à la vitesse. Une autre façon d'exprimer cela est de dire que le concept de force de la physique d'Aristote, bien que distinct et incompatible avec celui de la physique newtonienne, partage pourtant ces premières caractérisations (caractère vectoriel et nécessité d'un agent). Même l'idée de force comme cause interne pourrait se concilier avec ces caractéristiques, en voyant le « capital de force » comme l'agent, interne à l'objet, de la force qui le maintient en mouvement.

Ainsi, dans l'interprétation empirique, les lois du mouvement expriment des relations entre le concept de force et le mouvement, mais puisque le concept de force un a statut autonome, ces relations peuvent être vues comme des caractéristiques *supplémentaires* de celui-ci, *qui n'excluent pas* d'autres caractéristiques intuitives provenant des idées du sens commun. Au contraire, dans l'interprétation logique, la reconstruction progressive du concept de force et de la grandeur physique associée *par les lois du mouvement* permet d'appuyer explicitement l'exclusivité de ces caractérisations pour le définir.

Plus concrètement, on pourrait dire que dans l'interprétation empirique, le concept de force a un sens indépendant *et* une relation à l'accélération via la deuxième loi de Newton, ce qui a priori *n'exclut pas de manière évidente* que la force ait *aussi* une relation avec la vitesse ou la notion de capital de force. Tandis que dans l'interprétation

logique, le concept de force n'a pas de sens indépendant mais *est défini à partir de l'accélération*, et n'a donc pas plus de sens que ce qui est contenu dans sa définition finale, constituée par les lois du mouvement.

En pratique, plusieurs constats dans les raisonnements des apprenants témoignent en effet de ce risque de l'interprétation empirique, en tant qu'elle n'exclut pas explicitement certaines conceptions intuitives sur les forces et le mouvement. Il s'agit des exemples que l'on a vus pour exprimer le problème de la coexistence entre sens physique et sens intuitif de la notion de force.

En particulier, on a vu dans l'étude de Viennot (1977) le cas de réponse (incorrecte) selon le sens intuitif (des forces différentes pour des balles de mouvements différents) justifié en utilisant la deuxième loi de Newton :

« La force qui s'exerce sur chaque balle est $\vec{F} = m\vec{a}$. Les balles étant identiques, c'est \vec{a} qui varie. »

Une telle réponse implique que le premier raisonnement mis en œuvre est celui associant la force à la direction du mouvement (vitesses différentes, forces différentes), mais la justification via $\vec{F} = m\vec{a}$ signifie que cette relation peut simplement *s'ajouter* au premier sens utilisé. La détermination du vecteur accélération - demandant un effort technique - n'est pas *nécessaire* du point de vue de l'élève, puisqu'il a l'impression de savoir *déjà* ce qu'est une force. Or cette impression est légitime lorsque ce concept est présenté (souvent implicitement) comme indépendant des lois du mouvement, et donc basé sur l'idée intuitive d'action, dont on *sait effectivement déjà* de quoi il s'agit.

Ce phénomène de plaquage d'idée du sens commun sur des termes techniques rejoint l'observation de (Bliss and Ogborn, 1993), discutée dans le chapitre précédent :

« people hear such words in use and give them meaning and roles consistent with what they already think »

Un autre exemple particulièrement parlant est celui de la réaction d'étudiants à propos du mouvement dans une situation de force constante (Halloun and Hestenes, 1985), dont un résultat majeur est le suivant :

« 27% of the students held that a force cannot keep accelerating an object indefinitely, and that the object reaches a critical speed limit determined by the magnitude of the force and the mass of the object. » (Halloun and Hestenes, 1985)

Ce constat implique que pour une proportion significative d'élèves (presque un tiers), le lien entre force et accélération est connu - puisqu'il est cité de prime abord avant

de considérer qu'il pose problème - ,et pourtant il n'empêche pas un raisonnement qui conduit à revenir à un lien avec la vitesse, avec l'idée de vitesse limite déterminée par l'intensité de la force. C'est donc comme si la relation entre la force et l'accélération était pertinente seulement au cours d'un régime transitoire, et qu'ensuite en régime permanent, la relation pertinente était celle entre force et vitesse limite. Cela crée de plus un pont vers l'idée de « capital de force », au sens où une fois la vitesse limite atteinte, l'objet « garde » cette force, même si elle n'est plus appliquée sur l'objet.

Une définition du concept de force indépendante des lois du mouvement, basée implicitement sur une proto-définition intuitive, est d'autant plus propice à sa contagion par les modes de raisonnement du sens commun. A nouveau, cet effet de projection a une certaine légitimité, si la relation $\vec{F} = m\vec{a}$ est vue seulement comme une *caractéristique supplémentaire* du concept, se greffant à son sens intuitif autonome.

La critique exprimée dans ce paragraphe rejoint celle de Rowlands et al. (1999) :

« The intuitive schema of force and motion cannot assimilate the Newtonian concept of force, as defined by the law of motion, without changing the meaning of force : the laws cannot be understood within the context of the intuitive schema. If the laws are given didactically, then they would most likely be interpreted idiosyncratically according to the intuitive schema instantiated, and learnt separately as a strategy to tackle quantitative questions the student could be said to have a dual perspective in mechanics (Gilbert et al. 1982; Berry & Graham 1991) » Rowlands et al. (1999)

Le problème de la non évidence de l'idée d'attraction terrestre

L'interprétation empirique des lois du mouvement se retrouve dans certaines propositions didactiques, notamment celle de Weil-Barais and Lemeignan (1993), et le « modèle interaction »¹⁴. Dans cette approche, la notion de force est présentée en amont de son rapport au mouvement, comme on peut le voir sur cette synthèse récapitulant l'ordre de leur présentation :

- « - Tout corps matériel est un objet.
 - Il existe (ou non) une force d'un objet A sur un objet X. [...]
 - Relation entre force et variation de vitesse. [...] »
- (Weil-Barais and Lemeignan, 1993, p.52)

14. Ce type de présentation est notamment promue dans d'autres recherches françaises actuelles, dont (Tiberghien et al., 2009), sans modifications essentielles.

Leur caractérisation du concept de force, définie au second point, correspond à la proto-définition abordée précédemment (caractère vectoriel et idée d'un agent). On voit de plus que le lien avec le mouvement n'apparaît qu'*après, seulement* comme *une* relation entre force et mouvement.

Dans une telle approche (selon l'interprétation empirique), le fait que la proto-définition du concept de force contienne directement l'idée de l'agent exerçant cette force, pose problème pour le cas de la gravité. Si la physique scolaire consiste à associer une force à la chute libre, la nécessité d'un agent dans l'idée même de force implique de la déclarer *directement* comme la force *exercée par la Terre*. Or comme nous avons vu, que ce soit du point de vue de l'histoire des idées ou du point de vue des élèves, que cela est loin d'être une évidence.

Weil-Barais and Lemeignan (1993) sont conscients de ce problème¹⁵, comme on peut le voir notamment lorsqu'ils relèvent cette citation d'élève :

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

Parmi les chercheurs promouvant actuellement l'approche du modèle interaction, certains - lorsque questionnés sur ce problème - reconnaissent faire appel à « l'argument d'autorité scolaire » pour imposer l'idée d'attraction terrestre. Ce n'est pas la démarche adoptée dans ce travail, qui accorde une grande importance à la construction argumentée d'un savoir, développée dans la partie 2.4.1.

Un cas encore plus problématique est celui où le concept de force est présenté comme ayant un sens autonome (interprétation empirique), et où le premier exemple de force traité est celui de l'attraction terrestre. Une telle présentation - assez courante - laisse penser qu'il est évident que la chute libre soit associée à une force exercée par la Terre.

C'est le cas notamment du document officiel proposé par le CNED pour le cours de seconde¹⁶. La première évocation des forces du cours, dans la section « Actions mécaniques exercées sur un objet » p.69, commence ainsi :

« 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 là à une certaine hauteur ; lâchez-là ; elle tombe. Pourquoi cette**

15. « Le tour de force intellectuel consistant à avancer l'hypothèse que c'est la Terre ne doit pas être négligé. Quand on est à l'écoute des élèves, on voit qu'il y a là un obstacle cognitif majeur » (Weil-Barais and Lemeignan, 1993, p.53)

16. disponible sur le site « Académie en ligne », sous l'effigie du Ministère de l'Éducation Nationale : <http://www.academie-en-ligne.fr/Ressources/7/SP20/AL7SP20TEPA0111-Notions%20fondamentales-Physique.pdf>

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.** » p.69 (emphase ajoutée)

Une telle déduction, compte tenu de ce qui a été vu précédemment, revient à imposer cette idée aux élèves¹⁷. Cela est incompatible avec la posture annoncée dans le chapitre précédent - « l'explicitation d'aspects non évidents » - exprimant *la volonté de ne pas faire passer pour allant de soi certaines choses qui ne sont ni évidentes, ni intuitives, et dont la compréhension demande une certaine justification ou reconstruction, via des arguments explicites.*

Cette dernière critique de l'interprétation empirique vaut également pour d'autres propositions didactiques, qui ne relèvent pas de l'interprétation empirique, en particulier pour celle de Robardet (1995), très intéressante sur certains points, mais qui commence ainsi :

« Cet enseignement de mécanique a débuté par une étude préliminaire, avec les élèves, du concept de masse (masse inerte). [...] Une réflexion sur l'attraction terrestre a permis de différencier la masse M (grandeur qui mesure l'inertie d'un corps) et la force d'attraction universelle F (poids) qu'un astre - Terre, Lune, Soleil - exerce sur ce corps. » (Robardet, 1995)

Le fait de devoir aborder la gravitation avant la dynamique, impliquant de la déclarer comme un fait, n'est pas envisageable relativement aux exigences de ce travail. Le volonté de maintenir fermement ces exigences est justifiée par le fait qu'elles puissent être tenues. Nous verrons en effet qu'il est possible d'explicitier les raisons qui nous permettent de justifier le rôle de la Terre dans la chute libre, sans avoir besoin de l'imposer. Le cheminement qui mène à cette conclusion demande d'être parcouru pour en accepter les justifications. Il s'agit d'ailleurs de la raison d'être principale de cette approche conjointe de la dynamique et de la gravitation newtonienne.

17. Celle ci se retrouve également dans le document de cours de Première S, lors de la séquence sur « Champs et force » : « Prenez votre crayon de masse m avec le bout des doigts (le crayon a pour seul contact les doigts) et lâchez-le de n'importe quel endroit de l'espace ; **il tombe**. Le crayon est **donc soumis à une action à distance** en n'importe quel endroit de l'espace où on le place. La notion de champ (ici le champ de pesanteur g) permet de caractériser l'action subie par le crayon en un point de l'espace sans se préoccuper des causes produisant cette action : $P = mg$. » (emphase ajoutée) Ce document est également disponible sur le site « Académie en ligne » : <http://www.academie-en-ligne.fr/Ressources/7/SP12/AL7SP12TEPA0013-Sequence-05.pdf>.

3.2.4 Force, explication et mise en relation

Nous venons de voir deux positionnements pour l'introduction du concept de force - les interprétations empirique et logique des lois du mouvement. Des arguments à la fois d'ordre épistémologique et didactique nous ont conduit à préférer l'interprétation logique, où le concept de force est *défini par les lois du mouvement*, plutôt que considéré comme un concept indépendant. Les arguments didactiques développés précédemment s'appuyaient sur deux des trois problèmes d'apprentissages ciblés : celui de la co-existence du sens commun et du sens physique, et celui de la non évidence de l'idée d'attraction terrestre. Le troisième problème non considéré encore jusqu'ici est celui de l'ambiguïté de la causalité.

Force et explication

Face au problème du lien entre causalité et chronologie, la proposition ici est de se détacher entièrement du terme de cause dans la formulation de la dynamique. Il s'agit de prendre comme premier sens de la notion de force *ce qui permet d'expliquer le mouvement*, plutôt qu'une formulation en termes de *cause du mouvement*¹⁸. En effet dans le langage courant, les notions de causalité et d'explication sont très proches, au point que leurs usages puissent être la plupart du temps interchangeables. On répond à pourquoi un phénomène est tel qu'il est en « en donnant les causes » ou en « l'expliquant ».

« In Newtonian mechanics, 'force' is a functional quantity (a relationship) that explains changes in motion. » (Nersessian, 1989)

Il ne s'agit pas uniquement de changer le terme utilisé, mais de mettre en avant une signification de l'*explication* qui va avoir un rôle vis à vis de la question de la chronologie.

Explication et mise en relation

Le sens de l'explication qui va être mis à profit est le suivant : *on explique quelque chose en le mettant en relation avec quelque chose d'autre*.

Cette idée se retrouve par exemple chez Halbwachs (1973) dans *L'histoire de l'explication en physique* :

18. « In a sample of about a hundred textbooks [...], it was verified that "force is the cause of acceleration" is the most common definition of force. » (Coelho, 2010)

« Par définition, nous ne parlerons proprement d'explication [...] que lorsque nous nous trouvons en présence d'un énoncé (d'une théorie) qui [...] révèle un lien nouveau entre des faits qui apparaissaient d'abord comme qualitativement différents. ». (Halbwachs, 1973)

Ou encore du côté de la didactique chez Johsua and Dupin (1993) :

« [...] de la mise en relation de domaines considérés comme différents on produit une mise en ordre, qui a son propre espace de sens, et où s'organisent des connaissances nouvelles : c'est l'explication. » (Johsua and Dupin, 1993)

La familiarisation via des exemples d'explication courants

Des exemples classiques, reconnus comme explications scientifiques, permettent de mettre en évidence cette idée de mise en relation. Par exemple :

- On *explique* l'extinction des dinosaures *en la reliant* à l'impact d'une météorite et certaines conditions climatiques défavorables.
- En psychologie, on peut *expliquer* certains troubles ou comportements *en les reliant* à des événements ou traumatismes de l'enfance.
- En anatomie, on *explique* les mouvements possibles du corps *en les reliant* à la description des articulations, des os, et du fonctionnement des muscles.
- On *explique* que le Soleil se lève toujours à l'est et se couche à l'ouest *en reliant* cette observation *au* sens de rotation de la Terre sur elle-même.

L'intérêt : une mise en relation peut ne pas être chronologique

L'intérêt de ces exemples est de pouvoir mettre en évidence qu'une explication n'implique pas nécessairement de chronologie entre les éléments qui sont reliés. Ce peut être le cas, comme pour les deux premiers exemples : les impacts de météorites ou les traumatismes de l'enfance sont antérieurs à ce qu'on cherche à expliquer. Mais les deux exemples suivants montrent que l'on parle aussi bien d'explication pour des cas de mises en relation entre différents éléments ayant lieu simultanément : il n'y a aucune notion d'antériorité entre les positions de lever et de coucher du Soleil et la rotation de la Terre, ni entre le mouvement d'un membre et la forme d'une articulation. Cette idée de simultanéité peut donc faire sens déjà dans l'usage courant du terme d'explication.

La formulation en termes de mise en relation peut ensuite être appliquée à l'explication du mouvement. Par exemple on peut expliquer le mouvement d'un clou en le mettant

en relation avec la présence d'un aimant. Ou encore on peut expliquer le maintien de la vitesse d'un cycliste en le reliant au fait qu'il pédale. D'une manière générale, *on explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques de la situation considérée*. Plus précisément, au niveau quantitatif, on parlera de la grandeur physique force comme ce qui permet de *caractériser* les circonstances physiques *associées* à l'accélération. (On verra plus loin de quelle manière cette grandeur peut être construite à partir de cette définition).

Une formulation en terme de mise en relation permet ainsi d'amener l'idée de simultanéité entre un mouvement – considéré à un instant donné – et les circonstances physiques auxquelles ce mouvement est relié au même instant. Cela permet une première familiarisation à cette idée de manière qualitative, avant son introduction via le formalisme newtonien, via $\vec{F}(t) = m\vec{a}(t)$.

Même si cette observation ne prétend pas être suffisante vis-à-vis des problèmes d'apprentissage liés à des raisonnements s'appuyant sur une chronologie en dynamique, cela est du moins moins risqué qu'une formulation en termes de causalité (« la force comme cause de l'accélération »), nécessairement imprégnée d'une connotation chronologique.

Notion de « circonstances physiques » associées à une accélération

La formulation en termes de circonstances physiques est centrale dans cette approche. Elle vient du constat de son utilisation chez plusieurs auteurs, bien qu'elle ne soit jamais utilisée explicitement pour définir le concept de force, dans le cadre d'un enseignement de la dynamique.

« Force is any *circumstance* of which the consequence is motion, says Mach. » (Coelho, 2010) à propos de (Mach, 1885)

« In the *circumstances under which* the motion of an object deviates in some relevant way from the assumed influence-free motion, one will search for *recurring configurations* with which these deviations can be satisfactorily *correlated*. » (Klaassen, 2005) (emphase ajoutée)

L'explicitation du sens de la notion « d'action »

Le fait de considérer l'explication en termes de forces comme *la mise en relation entre l'accélération et certaines circonstances physiques de la situation*, permet d'expliciter au premier abord le sens empirique de la notion d'action. En effet, si l'on cherche par

exemple à définir concrètement ce que signifie « l'action » d'un aimant sur un clou, on sera conduit à expliciter qu'il s'agit du fait que *l'accélération du clou* soit liée à *la présence de l'aimant*. Ainsi la formulation proposée permet de définir le concept de force uniquement à partir de ces notions élémentaires : l'accélération et les circonstances physiques qui lui sont corrélées, circonstances très concrètes, telles les positions de l'aimant et du clou, leurs vitesses, et les matériaux dont ils sont composés¹⁹.

Cela permet d'éviter d'introduire le concept de force comme ayant un sens indépendant, généralisé à partir de la notion d'action, une approche particulièrement sujette à l'amalgame entre la définition physique et les idées intuitives sur les forces, comme cela a été développé dans la section 3.2.3 (p.81).

L'explicitation de l'expression « force exercée par »

De même que la notion d'*action*, celle d'*agent* peut être explicitée à partir de la formulation en termes de circonstances physiques. Cela permet de mettre en évidence que la signification physique de l'expression *la force exercée par* est plus complexe que son sens courant - tout à fait intuitif - ne le laisse penser²⁰.

Parler d'une force *exercée par* l'aimant *sur* le clou signifie que l'accélération du clou est liée à la présence de l'aimant (sans aimant, il n'accélérerait pas). Or parmi les circonstances physiques associées à cette accélération, figurent également :

- le matériau dont est constitué le clou (un clou en bois ne serait pas affecté),
- la position relative des deux objets (si l'aimant est trop éloigné, le clou ne se met pas en mouvement).

L'accélération *du clou* dépend donc à la fois des propriétés de *l'aimant* et du *clou lui-même*. Ainsi, l'expression « la force *exercée par l'aimant* sur le clou » désigne - parmi les circonstances associées à l'accélération - uniquement la circonstance *extérieure* au

19. Cette intention de clarification immédiate de la signification du concept est inspirée de la posture de Wittgenstein, pour qui notamment : « Le résultat de la philosophie n'est pas un nombre de "propositions philosophiques", mais le fait que des propositions s'éclaircissent. » (Wittgenstein, 1921), ou encore selon lequel « Le monde se décompose en fait ». Une telle recherche d'explicitation à partir de notions factuelles résonne également avec cette formule de Vaneigem : « port[er] la vieille expression "voir les choses en face" à son aboutissement logique : ne voir en face de soi que des choses » (Vaneigem, 1967).

20. L'absence de prise en compte de cette distinction est notamment critiquée par Klaassen (1995) : « It is a striking feature of common courses in mechanics that they do not take into account the above simple observation that it must be part of pupils' learning mechanics that they learn to use and understand, e.g., the expression 'to exert a force on' differently. It is not only the case that no attempt is made to indicate *how* this expression is used in mechanics (and why it is thus used), but it is not even indicated *that* in mechanics the expression is (going to be) used differently. » (Klaassen, 1995)

système dont est considérée l'accélération : la présence de l'aimant. Cette formulation permet d'identifier directement l'« autre système » tel que, s'il n'était pas là, aucune accélération ne serait observée, cependant cette condition nécessaire n'est pas suffisante pour rendre compte de cette accélération.

Cette formulation peut être généralisée : parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système A, lorsque celles *extérieures à ce système* sont relatives à un système B, on dit que B exerce une force (au sens de Newton) sur A.

Par exemple dans le cas de deux objets A et B chargés, l'accélération de A dépend à la fois de la charge de A et de B, ainsi que de leur distance relative. Parmi ces circonstances physiques, celle *extérieure* - ou *indépendante* - de l'objet A est uniquement la présence de l'objet chargé B. C'est ainsi que s'explique de manière factuelle l'expression : *B exerce une force sur A*.

Le fait que cette observation soit réciproque, à savoir que l'objet B accélère également, et que son accélération soit liée à la présence de l'objet A, est ce qui est désigné par la notion d'*interaction* : l'accélération de chacun des objets est liée à la présence de l'autre.

Cette explicitation peut sembler lourde relativement au caractère *a priori* intuitif des notions de « force exercée par » ou d'interaction. C'est cependant grâce à cette clarification de langage que va pouvoir être justifiée la notion d'*attraction terrestre*. Comme il a été vu plus haut, il n'est pas du tout évident - à la fois historiquement et pour les élèves - d'associer l'accélération de chute libre à la présence de la Terre. Celle-ci ne s'observant qu'à la surface de la Terre, elle pourrait être associée à d'autres circonstances physiques présentes uniquement à la surface de la Terre, comme la présence de l'atmosphère. C'est seulement lorsque un raisonnement aura explicitement permis de conclure que la présence de la Terre est la seule circonstance - *extérieure à l'objet considéré* - pouvant être associée à l'accélération de chute libre, qu'il deviendra légitime de parler de la force d'attraction *exercée par la Terre*²¹.

Une alternative à la formulation en termes de cause

Par ailleurs, la formulation en termes de circonstances physiques permet de se détacher entièrement de la notion de causalité, importante source de troubles épistémologiques, au delà de la question de la chronologie.

21. Ce raisonnement sera abordé dans le chapitre 4.

« Traditionally, forces are causes of a special sort. Forces have been conceived to be the direct or immediate causes of things. [...] But forces, so conceived, appear to be occult. They are mysterious, because we have no clear conception of what they are, as opposed to what they are postulated to do; and they seem to be hidden from direct observations. » (Bigelow et al., 1988)

Ces critiques sont également développées par Jammer (1957), exprimant la volonté positiviste de se débarrasser du concept de force afin de se débarrasser de la causalité dans la formulation de la théorie physique.

« [...] the concept of force became the main object of severe attacks from the quarters of positivism; for positivistic thought contended that the elimination of the concept of force from physics would lead to the emancipation of science as a whole from the bondage of causality, one of the "most obstinate remnants of prescientific fetichism." »²² (Jammer, 1957, p.15)

Sans être aussi radicale qu'une élimination totale, l'approche proposée permet de *redéfinir* la notion de force,

- en évitant d'en faire un concept indépendant,
- sans faire référence à la notion de causalité,
- tout en explicitant le sens empirique des notions d'action, d'interaction, et d'agent de la force.

3.2.5 Une formulation, deux idées

Les positionnements principaux pour la présentation de la dynamique ont été énoncés et argumentés.

- Le choix de l'interprétation logique, où le concept de force n'a pas de sens autonome mais est défini *par* les lois du mouvement.
- La formulation de la force en tant qu'explication du mouvement, comme ce qui permet de *mettre en relation* une accélération et certaines circonstances physiques.

22. Il s'agit notamment de la position de Poincaré : « Quand on dit que la force est la cause d'un mouvement, on fait de la métaphysique, et cette définition, si on devait s'en contenter, serait absolument stérile. Pour qu'une définition puisse servir à quelque chose, il faut qu'elle nous apprenne à mesurer la force; cela suffit d'ailleurs, il n'est nullement nécessaire qu'elle nous apprenne ce que c'est que la force en soi, ni si elle est la cause ou l'effet du mouvement. » (Poincaré, 1902, p.120)

Un fait remarquable est qu'il est possible d'exprimer ces deux idées avec une même formulation : celle d'explication²³

Parmi les partisans de l'interprétation logique, chez les philosophes (Ellis, 1965; Hanson, 1965; Toulmin, 1973) ou chez les didacticiens Hestenes (1992); Nersessian (1992); Rowlands et al. (1999); Klaassen (2005); Westra (2006); Coelho (2010), le terme de causalité reste fréquemment présent. On retrouve souvent le terme d'« explication causale », auquel une connotation chronologique est souvent associée.

Par exemple chez Ellis (1965), côté philosophie :

« [...] the behavior of a given system is considered to require **causal explanation** if and only if we feel that this behavior is not sufficiently explained by its subsumption under **a law of succession**. [...] A law of succession is any law that enables us to predict the future of any system (or given class of systems) simply from a knowledge of its present state, assuming that the conditions under which it exists do not change. » (Ellis, 1965)

Ou encore chez Westra (2006), côté didactique :

« What we want in a **causal explanation** of an event is information about the **history of the event**, from which it can be inferred that the event to be explained would follow. » (Westra, 2006, p.55) (emphase ajoutée)

Mais il est également possible de formuler l'idée commune de *dépendance de l'explication à une situation de référence*, en s'écartant de l'idée de causalité. Comme par exemple dans cet extrait de Toulmin (1973), à propos du principe d'inertie :

« Il nous fournit plutôt une norme pour déterminer en quoi le mouvement d'un corps nécessite explication, et quelles forces doivent apparaître comme imprimées à ce corps si nous voulons réussir à expliquer son mouvement. » (Toulmin, 1973)

23. Pour revenir succinctement le cheminement ayant permis d'en arriver là, ce point d'aboutissement n'aurait jamais pu être atteint sans l'aide des professeurs Ricardo Coelho et Laurence Viennot . Le premier aspect (l'interprétation logique) a pour origine une résonance entre une idée initiale et un article de Ricardo Coelho sur la dynamique (Coelho, 2010), ayant mené à l'élaboration d'une première approche. L'impulsion pour développer la seconde idée résulte des critiques de Laurence Viennot de cette première approche, en particulier vis à vis de la négligence du problème de la causalité (Viennot, 1993). Nos nombreux échanges à ce sujet m'ont progressivement permis de saisir en quoi cet aspect était effectivement essentiel, et m'ont mis sur la voie d'une adaptation de ma première proposition. En plus de ces critiques de la première tentative d'approche, celle ci était aussi en désaccord avec certains aspects des articles de Ricardo Coelho. Plusieurs jours d'intenses discussions avec celui ci, au cours d'un séjour à Lisbonne, ont finalement mené à trouver un accord commun sur les questions en jeu. La synthèse de nos débats se révéla être une proposition qui n'était ni sa position initiale, ni la mienne, mais une autre qui intégrait les problèmes que chacun soulevait chez l'autre. Ainsi cette recherche s'est vue considérablement enrichie grâce aux critiques et aux discussions avec ces deux chercheurs, pour qui la reconnaissance est entière.

Ainsi, la formulation de la dynamique uniquement en termes d'explication, sans lui associer l'idée de causalité, permet de laisser la place à la notion de mise en relation.

Les deux positionnements principaux pour l'approche proposée peuvent alors être introduits à partir de deux questions basiques vis-à-vis de l'acte l'explication d'un phénomène²⁴ : *qu'est-ce qu'on explique ?* et *comment on l'explique ?* :

- Ce que l'on cherche à expliquer est ce qui est *différent d'un état de référence* considéré comme ne nécessitant pas d'explication. L'explication est *relative* à cet état de référence qui aurait lieu de lui-même.
- Lorsque l'on explique, on *met en relation* ce que l'on veut expliquer avec quelque chose d'autre. Il peut s'agir d'une mise en relation entre deux aspects *simultanés*.

3.2.6 La possibilité d'introduire les idées centrales par des exemples de la vie courante

On a vu précédemment que l'idée d'explication comme mise en relation pouvait être mise en avant via des exemples relativement courants, par exemple l'explication de comportements, de l'extinction des dinosaures, ou des positions du lever et du coucher du Soleil.

Ce type d'entrée correspond à l'intention d'attirer l'attention sur la façon de penser de tous les jours, telle qu'elle existe à travers le langage courant²⁵, dans le but d'y trouver des points d'appui pouvant servir d'analogie pour appréhender les idées que nous proposons pour le cas de la dynamique.

Il est possible également d'utiliser des exemples de la vie courante pour amener l'idée de dépendance de l'explication à une situation de référence. Un travail très intéressant a été effectué à ce niveau par Westra (2006), approfondissant certaines idées de Klaassen (2005). Ces auteurs partagent également le choix de présenter le concept de force comme relatif à un choix de mouvement de référence, de même que (Coelho, 2010). Ils insistent sur le fait qu'il s'agisse d'un trait caractéristique de la « stratégie de l'explication », déjà présent pour d'autres types d'explication, dont en particulier les explications communes du mouvement. Leur proposition consiste à mettre en évidence ce schéma explicatif sur des exemples courants, afin de reconnaître ensuite celui-ci en dynamique.

24. Cette distinction rejoint celle de Hempel & Oppenheim entre *explanandum* et *explanans* Hempel and Oppenheim (1948). Cependant rentrer plus en détails dans leurs (très fines) analyses épistémologiques n'est pas nécessaire ici.

25. « Developing an awareness of everyday thinking ; Learning to refine everyday thinking » (Hammer and Elby, 2003)

« If in a given situation an object's motion deviates from the assumed influence free motion, this deviation must be attributable, via interaction theory, to influences exerted by other objects. This explanatory scheme for motion also allows for a variety of specific explanations of motion, each with a different assumption for the influence free motion, where the variety to some degree reflects the variety of explanatory interests we may happen to have. In this way the explanatory scheme of motion is provided with a solid backbone. It is then argued that two conditions need to be fulfilled if the explanatory scheme is to productively function in mechanics education : (1) Students' use of the scheme needs to be triggered and explicated and (2) Newton's use of the scheme needs to be made explicit. » (Westra, 2006, p.294)

Les situations proposées par Westra (2006) pour mettre en évidence la dépendance d'une explication à une situation de référence, ont été réutilisées dans ce travail. Notamment, il propose le cas du thé, dont on explique le maintien de la température par la présence du couvercle sur la théière. On cherche à expliquer le maintien de la température relativement à une situation de référence – le fait que d'elle-même la température a tendance à baisser – situation que l'on ne cherche pas à expliquer : « c'est ce qui se passe naturellement ».

Un autre exemple ajouté dans ce travail est celui de l'explication de comportements. Dans la vie quotidienne, les comportements (d'autrui ou de soi-même) que l'on cherche à expliquer sont ceux que l'on considère comme étranges, anormaux. Cela est donc relatif aux comportements qui dans les mêmes circonstances seraient considérés comme normaux.

Cette idée de dépendance à une situation de référence (ou de « normalité ») est en particulier valable pour le mouvement. Klaassen (2005) propose le cas de l'explication courante du maintien de la vitesse d'un vélo par le fait de pédaler. Cette explication repose également sur un état de mouvement de référence qui aurait lieu naturellement : le fait que sans rien faire, le vélo ralentit et s'arrête. Or dans la vie de tous les jours, on ne cherche pas d'explication à cette situation-là, qui est considérée comme normale.

L'idée et les exemples de Klaassen (2005) et Westra (2006) seront donc intégrés à la présentation proposée ici.

Positionnement relativement aux travaux de Klaassen (2005) et Westra (2006)

La forte proximité entre leur point de départ et celui de ce travail nécessite de se situer relativement au reste de leurs propositions. Sans chercher à détailler l'ensemble de leur recherche, les critiques concernent essentiellement les points suivants :

- la non considération du problème de la causalité, déjà mentionnée précédemment : le terme de cause continue d'être employé et l'ambiguïté avec la chronologie n'est pas prise en compte²⁶ ;
- l'absence de reconstruction explicite du formalisme de la dynamique, à partir de leur point de départ sur l'explication : celui-ci est vu comme une introduction à laquelle fait suite une présentation "traditionnelle" du sujet ;
- l'incompatibilité entre leur usage de la théorie de la gravitation et le point de vue sur son enseignement développé dans ce travail. La formule quantitative est déclarée sans arguments, afin d'être utilisée dans une comparaison de la mécanique céleste selon Newton et Kepler, comme exemple du schéma explicatif. L'idée d'unification entre phénomènes terrestres et célestes, dont l'intérêt sera développé dans le chapitre 4, n'est donc pas abordée dans leur approche.

3.3 Présentation de la séquence d'enseignement de la dynamique

D'autres positionnements face aux problèmes conceptuels de la dynamique

Nous avons vu dans la section 3.2.1 les problèmes dans les fondements conceptuels de la dynamique. En considérant la contrainte de devoir présenter le sujet d'une façon à la fois progressive et cohérente, nous concluons que le problème de circularité des définitions demande de faire des hypothèses face aux problèmes conceptuels en jeu. Ces positionnements consistent à « couper » le cercle des définitions, afin de rendre possible leur introduction étape par étape, à partir d'un certain point de départ.

Les deux réflexions développées précédemment vis-à-vis de la notion d'explication font partie de ces positionnements. Entreprendre de concevoir une séquence d'enseignement à partir de ces deux idées nécessite cependant d'autres choix relativement aux problèmes conceptuels de la dynamique. Afin d'éviter une redondance, ces choix seront indiqués

26. "What we want in a causal explanation of an event is information about the history of the event" (Westra, 2006, p.55)

et justifiés au fur et à mesure de l'exposition des étapes de la séquence. Il s'agit des positionnements suivants :

- la restriction au référentiel terrestre,
- la masse prise au sens de quantité de matière,
- une redéfinition pragmatique de la notion de référentiel galiléen,
- la décomposition en un système de force via l'utilisation d'autres expériences,
- l'introduction empirique de la troisième loi du mouvement.

Moyens mis en œuvre pour attirer l'attention et insister sur la définition du concept de force

Seront également commentés d'autres choix de présentation encore non abordés jusqu'ici, relatifs à l'intention de favoriser la distinction entre le sens physique et le sens commun de la notion de force. Il s'agit des trois éléments suivants :

- l'utilisation de la contradiction historique comme questionnement de la définition précise du concept newtonien de force,
- la considération de la légitimité de l'ancienne interprétation de la chute,
- l'utilisation de l'appellation « force au sens de Newton ».

3.3.1 Les étapes de la séquence

La séquence sera présentée de manière synthétique, en s'appuyant sur certains aspects ou exemples ayant déjà été développés dans ce chapitre. Les commentaires sur les différents choix de présentation évoqués ci-dessus seront faits dans les paragraphes décalés à droite (en italique).

1) Force et explication

◇ La base commune proposée comme point de départ pour la signification du concept de force est la suivante : « la force comme ce qui *explique* le mouvement ».

◇ Une première réflexion générale sur l'idée d'explication est abordée à partir d'exemples de la vie courante, visant à mettre en évidence :

- l'idée qu'*une explication dépend d'une situation de référence* (exemples du thé, des comportements),

- l'idée qu'une *explication* consiste en une mise en relation, pas nécessairement *chronologique* (exemples de l'extinction des dinosaures, du lever du Soleil associé à la rotation de la Terre,)
- ◇ Ces idées sont ensuite appliquées à l'explication du mouvement :
 - Celle-ci est relative à un mouvement naturel de référence qui ne nécessite pas d'explication (exemple du cycliste).
 - L'explication d'un mouvement consiste en sa mise en relation avec certaines circonstances physiques (exemple du clou et de l'aimant).

2) Force et mouvement naturel dans l'histoire des idées

◇ Après une première familiarisation avec l'idée de dépendance à une situation de référence, il s'agit de considérer de quelle façon cette idée se manifeste dans l'évolution des idées. Une façon de l'introduire est d'aborder, du point de vue de l'histoire des sciences, la question suivante : « Tous les mouvements nécessitent-ils d'être expliqués par une force ? ». La conception du mouvement d'Aristote est alors présentée, distinguant entre mouvement naturel – qui n'a pas besoin d'être expliqué en termes de forces – et mouvement violent – associé à une force. En particulier il est vu que la chute verticale des objets est considérée comme un mouvement naturel.

◇ Cette interprétation est appuyée en ajoutant qu'elle était encore partagée par Galilée, quasiment 2000 ans plus tard, pour qui la chute est pensée comme un mouvement naturel et non liée à une force. Cette distinction témoigne de l'omniprésence de l'idée de dépendance à une situation de référence dans une explication.

◇ Cela amène alors à préciser la définition du concept de force, comme ce qui permet d'expliquer un mouvement qui diffère du mouvement naturel de référence, ou encore l'écart au mouvement considéré comme naturel.

◇ Est considéré ensuite le fait que dans la théorie de Newton, seulement cinquante ans après Galilée, la chute verticale est associée à une force, « le poids ». Les élèves sont alors questionnés sur cette contradiction entre les deux interprétations du même phénomène (dont il est mentionné qu'elles s'appuient sur les mêmes observations). Il s'agit d'amener l'idée que *l'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter*²⁷. Une autre interprétation du même mouve-

27. On retrouve une formulation du problème de l'interprétation considéré dans le chapitre précédent, qui était alors énoncé ainsi : *Lorsque l'on dit quelque chose, le sens de ce que l'on dit dépend de la signification que l'on donne aux termes qu'on utilise pour le dire*, cf. 2.3 p.25.

ment signifie une autre définition de la force chez Newton. Or la définition du concept de force dépend du mouvement considéré comme naturel.

L'utilisation de la contradiction historique comme questionnement de la définition précise du concept newtonien de force. Il s'agit ici de s'appuyer sur le fait que les élèves savent en général que la chute libre est associée à la force de gravité, le poids, pour faire émerger la contradiction. La mise en évidence de la contradiction entre l'interprétation de la chute libre par Aristote et Galilée et celle de Newton a pour but d'amener à voir la nécessité de la question de la définition du concept de force dans la théorie de Newton.

3) Le concept de force au sens de Newton

◇ La première loi de Newton peut alors être introduite comme la redéfinition du mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) : le mouvement rectiligne uniforme (MRU). Ce choix est légitimé par la considération d'autres observations (mouvements horizontaux avec très peu de frottement).

La restriction au référentiel terrestre. 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 galiléen. En effet comme il a été vu en 3.2.1 (p.71), 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.

Commencer par établir les lois de Newton dans le référentiel terrestre permet d'éviter cette auto-référence, 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'accéléérations qui y sont observés, qui mènera à une certaine définition de référentiel galiléen, seulement à la fin de la présentation.*

◇ La force *au sens de Newton* est donc définie à ce stade comme ce qui permet d'expliquer un mouvement qui diffère du MRU, ou encore l'écart relativement au MRU.

L'utilisation de l'appellation « force au sens de Newton ». Un autre choix essentiel de cette approche est de se contraindre à spécifier, tout le long du cours, de parler de force « au sens de Newton ». En effet, si plusieurs définitions de la notion de force sont possibles, relativement à plusieurs choix de mouvement naturel de référence, la spécification du sens employé peut apparaître comme une nécessité pour clarifier le risque d'ambiguïté. De plus, le fait d'utiliser une appellation qui ne fait pas directement écho au sens commun peut permettre de maintenir la conscience que le concept a une définition bien précise. Cela dans le but de minimiser l'impression de « savoir de quoi on parle » lorsqu'on utilise le terme de force dans l'interprétation physique. En effet, alors qu'on peut facilement avoir des idées a priori sur la « force » en jeu dans une certaine situation, se questionner sur la force au sens de Newton peut conduire à se demander comment ce concept est défini.

4) Retour sur le cas de la chute libre

◇ Le choix du mouvement naturel étant posé, on peut alors revenir sur ce qui impose, par cohérence, de voir le mouvement de chute libre comme associé à une force au sens de Newton : le fait que ce mouvement soit accéléré.

◇ Une particularité de cette définition de la force est qu'il n'est pas nécessaire de pouvoir reconnaître directement les circonstances physiques associées au mouvement. En particulier la chute libre n'est *a priori* associée à aucune circonstance particulière. Il s'agit en effet d'un phénomène omniprésent dans l'expérience courante, ayant lieu partout, pour tout type d'objet, sans qu'il soit possible de le faire cesser (contrairement à l'attraction ou la répulsion d'aimants, dont l'éloignement suffit pour être stoppée). Il est ainsi légitime que la chute ait été considérée comme un mouvement naturel pendant si longtemps dans l'histoire des idées (jusqu'à Newton).

La considération de la légitimité de l'ancienne interprétation de la chute. Le fait de revenir sur la légitimité de voir la chute libre comme mouvement naturel a pour but de mettre en évidence le caractère construit du concept physique de force. La réaction recherchée est que si l'ancienne façon de voir est légitime, alors la nouvelle n'est pas une évidence directement induite de l'expérience. Se familiariser à la nouvelle représentation implique donc d'être attentif à la construction de la nouvelle définition en question.

5) Définition quantitative de la grandeur physique force

◇ Il s'agit à ce stade de revenir sur l'idée d'explication du mouvement comme mise en relation avec certaines circonstances physiques.

◇ Puisqu'il s'agit plus précisément d'expliquer l'écart au MRU, *le concept de force au sens de Newton est défini comme ce qui permet de caractériser les circonstances physiques associées à l'écart au MRU*, (ces circonstances étant la plupart du temps identifiables, mais pas nécessairement, cf. chute libre).

◇ Une analyse mathématique permet alors d'établir formellement la notion d'écart au MRU, par le vecteur accélération.

◇ Le concept de force au sens de Newton est donc défini comme caractérisant les circonstances physiques associées au vecteur accélération.

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton

◇ Une première étape consiste à caractériser quantitativement les circonstances physiques associées à l'accélération d'un mouvement, par le vecteur accélération lui-même. Par exemple dans le cas de l'accélération d'un clou en présence d'un aimant, avec différents aimants, on observe des accélérations différentes. Le « pouvoir attractif/répulsif de l'aimant » (à une certaine distance) se quantifie à partir de l'accélération. On dit qu'un aimant est deux fois plus « fort » ou deux fois plus « efficace » qu'un autre si l'accélération du clou est deux fois plus grande. La direction du vecteur accélération permet de plus de caractériser la direction du « pouvoir attractif/répulsif de l'aimant ».

◇ La seconde observation est que pour un même aimant, à une même position par rapport à celui-ci, l'accélération du clou dépend de sa masse.

La masse prise au sens de quantité de matière. La notion de masse utilisée ici est celle de quantité de matière. Pour un même matériau (par exemple du sable), la quantité de matière varie intuitivement comme le volume. La quantité de matière d'objets de densités différentes peut être comparée via un équilibre de balance. Cette conception de la notion de masse est également celle utilisée par Newton, et est la plus proche de l'intuition commune associée au terme de masse. Elles est cependant sujette à des critiques d'un point de vue épistémologique, voir (Hecht, 2006) ou (Coelho, 2011, p.16). Ce choix de conception de la notion de masse, sans échapper à ces critiques, a cependant été jugé non problématique dans le cadre de cette présentation, relativement aux autres positionnements face aux problèmes conceptuels.

◇ Il s'agit ensuite de s'appuyer sur la considération suivante : *pour que la grandeur physique force caractérise les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques.*

◇ Un exemple est alors proposé, conçu dans l'objectif de pouvoir mettre en évidence que pour les mêmes circonstances, on observe que l'accélération est inversement proportionnelle à la masse. L'exemple consiste en un chariot mobile contenant une certaine quantité de sable, auquel est accroché un aimant. Un autre aimant est fixé au sol plus loin, de manière à ce que le chariot soit attiré par celui-ci. On considère l'accélération pour une certaine masse, puis pour une masse double, obtenue en ajoutant du sable (figure 3.3.1) . Les circonstances physiques associées à l'accélération du chariot (les frottements au sol étant négligé) sont la présence des aimants et leur position relative.²⁸.

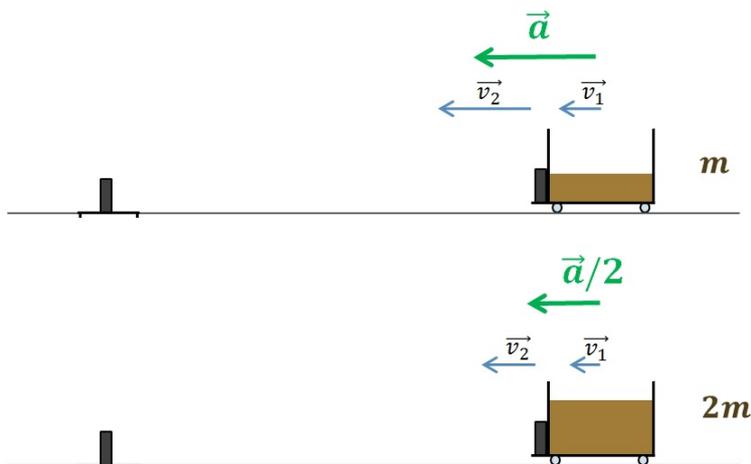


FIGURE 3.3.1 – Expérience des chariots de sable

28. Il s'agit de l'hypothèse la plus simple, dans la mesure où si l'un des aimants est retiré, aucune accélération n'est observée, quelque que soit la quantité de sable dans le chariot. Il serait cependant possible de supposer que le sable, lorsque qu'il est à proximité de l'aimant, ait une certaine influence sur son « pouvoir attractif », via un couplage entre les deux matériaux. Dans un tel cas, il figurerait parmi les circonstances associées à l'accélération, et la suite du raisonnement ne serait pas possible. Le but de cet exemple est en effet de considérer un cas où la masse ne fait pas partie des circonstances associées à l'accélération, afin de montrer la dépendance de l'accélération en la masse, *pour les mêmes circonstances physiques*. L'hypothèse d'un couplage entre l'aimant et le sable n'est donc pas abordée, pour ne pas ajouter plus de complexité au raisonnement. La situation proposée demande par ailleurs une certaine expérience de la physique pour être conçue, et a ainsi peu de chance d'être imaginée par les élèves.

La dépendance de l'accélération en la masse, $a \propto \frac{1}{m}$, implique que le produit $m \times a$ est invariant *pour les mêmes circonstances physiques associées à l'accélération* (mêmes aimants aux mêmes positions). Ce produit a donc même valeur pour les mêmes circonstances physiques, et peut donc être utilisé pour caractériser quantitativement celles-ci.

La caractérisation des circonstances physiques par le vecteur accélération d'une part, et par le produit $m \times a$, amène ainsi à introduire la 2ème « loi » de Newton comme la **définition quantitative de la grandeur physique force au sens de Newton**, relative à l'accélération \vec{a} du système considéré :

$$\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$$

◇ Cette définition de la force est ensuite reliée à la notion de « force exercée par », à partir de ce même exemple : la force exercée par l'aimant fixe sur le chariot.²⁹ Il s'agit d'observer que cette expression désigne uniquement - parmi les circonstances associées à l'accélération - la circonstance *extérieure* au système dont est considérée l'accélération : la présence de l'aimant fixe. L'expression est alors définie explicitement de manière générale : parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont relatives à un système A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B, notée : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt}$

◇ L'autre aspect abordé ensuite est le caractère instantané de la définition proposée. Le vecteur accélération étant défini à chaque instant t , la grandeur force est, de même, définie à chaque instant : $\vec{F}^{Newt}(t) := m \vec{a}(t)$

La grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt}(t)$ caractérise ainsi les circonstances physiques associées à l'accélération d'un objet, à l'instant t où l'on considère cette accélération : $\vec{a}(t)$. La force au sens de Newton ne correspond donc pas à quelque chose qui aurait été transmis plus tôt à l'objet, et pourrait ensuite maintenir le mouvement³⁰.

29. Ce passage correspond à la discussion du paragraphe « L'explicitation de l'expression *force exercée par* » p.90.

30. Ce passage fait directement écho au problème de la connotation chronologique du concept de force, en tant que cause du mouvement, pouvant être recherchée dans le passé de l'objet. Le caractère instantané de la relation peut être associé à d'autres exemples d'explication considérés précédemment, reliant deux faits ayant lieu simultanément (comme la position du levé du soleil et la rotation de la Terre).

6) La troisième loi du mouvement

◇ La troisième loi du mouvement est introduite à partir d'un exemple, reprenant la situation du chariot de sable utilisée précédemment, cette fois avec un second chariot (figure 3.3.2).



FIGURE 3.3.2 – Deux chariots de sable de masse variable

Cette exemple *a priori* assez intuitif permet d'illustrer la relation $\frac{a_B}{a_A} = \frac{m_A}{m_B}$, ainsi que la direction commune et le sens opposé des vecteurs accélérations. En ajoutant que ce constat se généralise pour beaucoup d'autres situations, la relation expérimentale exprimant la conservation de la quantité de mouvement peut alors être introduite : $m_A \vec{a}_A = -m_B \vec{a}_B$. Celle-ci étant valable dans le cas où les deux systèmes A et B sont en interaction *exclusive*, c'est-à-dire quand l'accélération de l'un est liée *uniquement* à la présence de l'autre.

Une introduction empirique de la troisième loi. Dans une approche selon l'interprétation logique, où le concept de force est défini à partir des deux premières lois (comme c'est le cas ici), la troisième loi est alors directement déduite de la conservation de la quantité de mouvement. Cela est en particulier exprimée par Hesse (1961) dans son analyse des deux interprétations des lois du mouvement, logique ou empirique : « [...] suppose the logical interpretation is adopted, then the acceleration of body may take place at any time with no apparent external cause, and nothing can follow from the law of inertia (which is now a mere definition) about the change of motion produced by parts of a body acting upon one another. It is then an empirical fact that single bodies and systems of bodies whose parts are interacting, satisfy the law of conservation of momentum. Thus with the logical interpretation of force, the third law is simply the law of conservation of momentum, and must in all cases be regarded as empirical. » (Hesse, 1961)

◇ Avec la définition de la grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$, cette relation s'écrit :

$$\vec{F}_A^{Newt} = -\vec{F}_B^{Newt}$$

◇ Cependant, puisque les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, les circonstances extérieures au système B sont seulement relatives au système A, on parle donc de la force exercée par A sur B, et réciproquement. On exprime cela par la convention de notation suivante :

$$\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$$

◇ Enfin, il peut être vérifié que l'égalité $m_A \vec{a}_A = -m_B \vec{a}_B$ est valable à chaque instant le long des trajectoires des deux systèmes. On peut donc écrire finalement :

$$\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt}(t) = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}(t)$$

7) Force et déformation

◇ Le point de départ de l'approche proposée se basait sur la notion de force pour expliquer le mouvement. Or dans le langage courant, la notion de force est également utilisée pour expliquer la déformation d'un objet ou d'un milieu. En effet en général, les circonstances physiques pouvant être associées à une accélération peuvent également être reliées à une déformation.

◇ Lorsque les circonstances physiques associées à une accélération impliquent dans un autre contexte une déformation, cela signifie que d'autres circonstances physiques sont en jeu, qui s'opposent à l'accélération qui aurait lieu en leur absence. Pour le cas de la chute, il s'agit de la résistance du sol.

8) De la force résultante à la décomposition en un système de forces

◇ La grandeur force associée à un vecteur accélération, \vec{F}^{Newt} , caractérise l'ensemble des circonstances physiques associées à cette accélération.

◇ Lorsque plusieurs types de circonstances physiques sont en jeu, on peut relier différentes composantes de l'accélération observée à différentes circonstances physiques, par l'intermédiaire d'autres expériences où certaines de ces circonstances sont absentes.

La décomposition en un système de force via l'utilisation d'autres expériences. Ce passage est lié à un problème se posant dans l'interprétation logique, soulevé par Coelho (2010) : « Kirchoff himself detected the following difficulty. If a system of forces acts on a body, it is impossible to determine that system only through that motion. Thanks to the observation of that motion, we achieve the resultant but not the components of force. There are, therefore, forces which cannot be subsumed by the theory » (Coelho, 2010)

Autrement dit, si la force est définie à partir de l'accélération, alors via l'accélération on ne peut obtenir que la force résultante. Comment peut-on alors obtenir ses différentes composantes si l'on sait que plusieurs forces sont en jeu ? L'approche adoptée ici reprend la solution proposée par Coelho (2010) : « If it is said that f [une composante de la force] was drawn from other experiments, it is not necessary to 'see' force there. In general, if it is taught that force is there, where the motion is accelerated, a student will try to find in motion and through the observation of it, what does not come from there. If it is taught that force were gained from other experiments, the student will understand it without difficulty. » (Coelho, 2010)

◇ En particulier, pour attribuer différentes circonstances physiques à une accélération nulle, par exemple dans le cas d'un parachutiste à sa vitesse limite $\vec{v} = \overrightarrow{\text{constanté}}$, il faut penser à l'autre mouvement qui *pourrait avoir lieu* avec les circonstances en présence, *si l'on fait abstraction de certaines d'entre elles* (la présence du parachute). On peut ainsi déterminer la valeur de la grandeur force caractérisant cette circonstance, sachant que la force totale associée à l'accélération est nulle (puisque $\vec{a} = \vec{0}$). Il faut donc que cette composante de la force compense celle associée à la chute libre, le poids \vec{P} , puisque la chute libre est le mouvement qui aurait lieu en l'absence du parachute. Ainsi la détermination de la composante de force associée au parachute nécessite d'avoir fait une autre expérience : ici l'expérience de chute libre³¹

9) Cas de la chute libre, circonstance associée à la déformation

◇ Lorsqu'un objet est lâché 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

31. dans une situation où le ralentissement lié à la présence de l'air pouvait être considéré comme négligeable.

circonstance physique associée à l'accélération de chute libre est la masse de l'objet en jeu.

◇ Puisque la notion de force (au sens de Newton) caractérise les circonstances physiques associées à une accélération, alors la force associée à l'accélération de chute, le « poids », dépend de la masse de l'objet en jeu.

◇ Formellement, on peut quantifier la force de poids à partir de l'expression $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$. Puisqu'ici $\vec{a} = \vec{g}$, en notant la force de poids par \vec{P} , on a simplement : $\vec{P} = m \vec{g}$, ce qui signifie que la grandeur force de poids est proportionnelle à la masse ³².

10) Extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels

◇ Jusqu'ici les trois lois du mouvement ont été établies uniquement dans le référentiel terrestre (à partir d'un certain mouvement naturel de référence, relativement au référentiel terrestre). Avant d'extrapoler ce formalisme à d'autres référentiels, la notion de relativité du mouvement au référentiel doit être abordée : la trajectoire, la vitesse, et l'accélération dépendent du référentiel dans lequel le mouvement est analysé. En particulier, 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.

◇ 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).

◇ La définition proposée de la notion de référentiel galiléen se base sur cette distinction, selon le type d'accélération observé.

32. Il s'agit d'un cas très particulier qui peut être assez déconcertant : l'accélération ne dépend pas de la masse, mais la masse fait partie des circonstances physiques associées à l'accélération. Une autre façon de comprendre ce fait (en plus de l'exemple intuitif du coussin), est de considérer l'observation à partir de laquelle la définition quantitative de la grandeur force a été construite (vu avec le cas du chariot de sable et des aimants), et sa contraposée logique. Si on a que [pour les mêmes circonstances physiques (A)], alors [pour différentes masses, l'accélération dépend de la masse (B)], cela implique que [si pour différentes masses, l'accélération ne dépend pas de la masse (Non B)], alors [les circonstances physiques associées sont différentes (Non A)]. Or puisque la seule chose qui change est la masse, finalement au moins une circonstance physique que l'on peut associer à l'accélération de chute libre, c'est la valeur de la masse elle-même.

Référentiel galiléen : 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 conserver la définition $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$, ainsi que la 3ème loi $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$.

Une redéfinition pragmatique de la notion de référentiel galiléen. Cette proposition de formulation permet d'éviter la circularité des définitions traditionnelles du référentiel galiléen, du principe d'inertie, et du concept de force (rappelée précédemment, 99). La restriction au référentiel terrestre pour la construction des lois du mouvement a permis de baser celles-ci sur des expériences, avant toute généralisation à d'autres référentiels, où l'expérimentation n'est pas possible (référentiel géocentrique, héliocentrique). L'utilisation de la notion élémentaire de circonstances physiques, permettant de distinguer les deux types d'accélération, rend possible une étape intermédiaire pour justifier l'extrapolation du formalisme ayant été construit à partir d'expériences sur Terre.

Une critique possible pourrait être la difficulté de discerner, dans certaines situations, les composantes d'accélération « uniquement attribuable au choix du système de référence pour décrire le mouvement ». Il s'agit d'une critique tout à fait valable, cependant cette difficulté est également problématique avec la définition traditionnelle d'un référentiel galiléen, ou la détermination du caractère non galiléen d'un référentiel est en pratique toujours délicate et difficilement argumentée.

◇ On peut remarquer en particulier que le référentiel terrestre, sur lequel on se base pour généraliser la définition d'un référentiel galiléen, n'est en fait lui-même pas strictement galiléen. Il y a en effet toujours dans ce référentiel une composante d'accélération liée à la rotation de la Terre sur elle-même, et qui n'est donc pas interprétable comme liée aux circonstances physiques en présence. La détermination de cette composante d'accélération permet de rectifier la part d'accélération associée à la masse. De fait, la composante d'accélération due à la rotation de la Terre est très faible relativement à l'accélération observée, qui est donc essentiellement attribuable à la masse.

Une façon de quantifier dans quelle mesure un référentiel est « plus ou moins » galiléen peut donc être de comparer la composante d'accélération liée au mouvement du référentiel à celle de la composante liée aux circonstances physiques. C'est donc parce que l'effet due à la rotation de la Terre est négligeable dans l'interprétation du mouvement de chute, que l'on peut considérer le référentiel terrestre comme galiléen.

3.3.2 Schéma de synthèse

Un schéma de synthèse permet de resituer l'ensemble des étapes principales de l'approche proposée de la dynamique (figure page suivante). Celui-ci a été originellement conçu dans le but d'une activité destinée aux élèves, et sera ainsi réutilisé au moment de présenter les activités (il n'a cependant pas été donné tel que présenté ici aux élèves).

Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton

Point de départ

La notion de force, au sens général : ce qui permet d'expliquer le mouvement.

On explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.

Exemples :
mouvement d'un clou ↔ présence et distance d'un aimant
vélo à vitesse constante ↔ le fait de pédaler

L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication.

1^{ère} « loi » de Newton (restreinte au référentiel terrestre) :
Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \text{cste}$), incluant le repos ($\vec{v} = \vec{0}$).
Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \text{cste}$).

Force (au sens général) : concept permettant d'expliquer un mouvement différent du mouvement considéré comme naturel, d'expliquer la « variation » du mouvement naturel.

Une autre définition de la notion de force pour Newton, donc une autre définition du mouvement considéré comme naturel.

Interprétation de la chute verticale :

D'Aristote (-300) à Galilée (1630) : mouvement naturel, pas de force.

Newton (1680) : mouvement associé à une force : le poids.

L'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter.

Expérimentalement, pour deux systèmes A et B en interaction exclusive, c'est-à-dire dont l'accélération de l'un est liée uniquement à la présence de l'autre, on observe que : $m_A \vec{a}_A = -m_B \vec{a}_B$

3^{ème} loi de Newton :

$$\vec{F}_{B \rightarrow A} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}$$

Puisque les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, les circonstances extérieures au système B sont seulement attribuables au système A, on parle donc de la force exercée par A sur B. Et réciproquement.

Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B, notée : $F_{A \rightarrow B}^{Newt}$

2^{ème} « loi » de Newton : Définition quantitative de la grandeur physique force au sens de Newton

$$\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$$

Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques mises en relation avec la variation du mouvement rectiligne uniforme.
Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, masse...).

Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques associées à $\vec{a}(t)$.

Définition mathématique de la variation du mouvement rectiligne uniforme en un point :
$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton, \vec{F}^{Newt}

Caractérisation par le vecteur accélération
Exemples : pour différents aimants, différents $\vec{a}(t)$.
Une première façon de quantifier l'« efficacité » de l'aimant (les circonstances physiques associées à l'accélération) est de poser $\vec{F}^{Newt} \propto \vec{a}$.
Une accélération plus grande sera associée à un aimant (plus efficace).

Constat expérimental :
Pour les mêmes circonstances physiques (par ex. les mêmes aimants aux mêmes positions), deux objets de masse différente n'ont pas la même accélération.

Pour que la grandeur physique force caractérisé les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques.

Or pour les mêmes circonstances, en un point donné, on observe pour différents objets : $a \propto 1/m$, donc le produit $m \times a$ est invariant pour les mêmes circonstances physiques associées à l'accélération. Ce produit peut donc être utilisé pour définir la grandeur force au sens de Newton.

3.4 Synthèse des choix principaux

Les choix principaux constituant la séquence ont été justifiés par des arguments de différentes natures. Certains choix sont des partis pris relativement aux problèmes conceptuels de la dynamique. Ils ont été justifiés soit par leur intérêt vis à vis des problèmes d'apprentissage, soit par la nécessité de cohérence de l'approche, relativement à des choix précédents.

Les trois problèmes d'apprentissage ciblés étaient les suivants (cf. section 3.1.3 p.64) :

- (1) la coexistence du sens commun et du sens physique de la notion de force,
- (2) l'ambiguïté de la notion de causalité,
- (3) la non évidence de l'idée d'attraction terrestre.

Les différents choix dépendent également des positionnements généraux sur l'enseignement, développés dans le chapitre 2.

Afin de visualiser ces différentes natures de justifications, celles-ci seront distinguées dans un tableau récapitulant les choix principaux de l'approche proposée.

<p>CHOIX PRINCIPAUX DE L'APPROCHE PROPOSÉE</p>	<p>RELATIONS</p> <ul style="list-style-type: none"> — aux problèmes d'apprentissage visés — <i>aux positionnements didactiques généraux</i> — *aux problèmes conceptuels de la dynamique
<p>Restriction dans un premier temps au référentiel terrestre pour construire les lois du mouvement.</p>	<p>*Un choix permettant d'introduire progressivement les concepts, en évitant le problème de circularité se posant dans le cadre de l'interprétation logique des lois du mouvement (cf. commentaire p.99).</p>
<p>L'idée de force vue comme <i>ce qui explique</i> le mouvement.</p>	<p><i>Une formulation se reliant facilement au sens commun.</i></p> <p><i>cf. L'intention d'ancrer la progression des étapes menant à une nouvelle idée à des faits ou significations partagés du langage courant et de l'expérience quotidienne (2.2.1 p.15).</i></p> <p>Permet d'éviter l'ambiguïté du terme de cause (2), fréquemment utilisée.</p> <p><i>cf. L'importance de la vigilance aux ambiguïtés possibles des mots que l'on compte utiliser, indépendamment de ce qu'on veut dire par eux, dans le contexte du contenu en jeu (2.3.3 p.30).</i></p>
<p>Mise en évidence via le cas de l'interprétation du mouvement de chute verticale de la dépendance de la notion de force à un mouvement naturel de référence.</p>	<p>Rendre nécessaire la question de la définition du concept de force dans la théorie de Newton, pour favoriser la distinction entre sens commun et sens physique de la notion de force (1) (cf. commentaire p.99).</p> <p><i>cf. L'importance de la compréhension par les élèves de la justification du vocabulaire introduit (p.45)</i></p>

<p>Concept de force <i>au sens de Newton</i> comme ce qui permet d'expliquer un mouvement qui diffère du mouvement rectiligne uniforme (1ère « loi »). Formellement, le vecteur accélération.</p>	<p>Utiliser une appellation qui ne fait pas directement écho au sens commun peut permettre de maintenir la conscience que le concept a une définition bien précise, distincte des idées du sens commun sur les force et le mouvement (1). (cf. commentaire p.100).</p> <p><i>La spécification du sens du concept est une manière de prendre en compte le problème de la polysémie et de l'ambiguïté (cf. 2.3.3 p.30).</i></p>
<p>Retour sur le cas de la chute verticale : associée à une force <i>au sens de Newton</i>, car mouvement accéléré.</p> <p><i>A priori</i>, pas évident d'associer des circonstances physiques particulières à cette accélération : phénomène omniprésent dans l'expérience courante (ayant lieu partout, pour tout type d'objet, sans qu'on puisse le faire cesser).</p> <p>Reconnaissance qu'il est légitime que la chute ait été considérée comme un mouvement naturel pendant si longtemps dans l'histoire des idées (jusqu'à Newton).</p>	<p>Un premier argument relativement à la non évidence de l'idée d'attraction terrestre (3), pour justifier ce qui conduit à parler de force dans le cas de chute. Cependant il n'y a toujours pas d'argument jusqu'ici pour justifier que cette accélération soit lié à la présence de la Terre. Celui-ci ne viendra qu'avec la cheminement menant à la théorie de la gravitation, traité au prochain chapitre.</p> <p>Le fait de montrer que l'ancienne représentation est légitime a pour but de faire prendre conscience que se familiariser à la nouvelle représentation demande d'être attentif à la construction de la nouvelle définition en question. Le caractère nouveau de la définition newtonienne met en évidence le fait qu'elle ne peut pas être simplement généralisée à partir de l'idée intuitive de force (à partir de l'idée d'action) (1) (cf. commentaire p.100).</p>

<p>Grandeur <i>force au sens de Newton</i>, notée \vec{F}^{Newt}, caractérisant les circonstances physiques associées au vecteur accélération. Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, masse...).</p>	<p>L'idée de mise en relation toujours présente dans cette formulation (les circonstances physiques <i>associées au</i> vecteur accélération) permet d'appuyer le caractère simultanée de cette mise en relation, relativement au problème de la chronologie (2).</p>
<p>A partir de cette définition, en considérant des expériences (en particulier le rôle de la masse), on construit : $\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$ (2ème « loi »)</p>	<p>* La notion de masse utilisée est celle de quantité de matière (cf. commentaire p.101). Le caractère simultanée de l'expression définissant la grandeur force découle alors de la formulation en terme de mise en relation (2) : « La grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt}(t)$ caractérise ainsi les circonstances physiques associées à l'accélération d'un objet, à l'instant t où l'on considère cette accélération : $\vec{a}(t)$ »</p>
<p>Lorsque plusieurs types de circonstances physiques sont en jeu, on peut relier différentes composantes de l'accélération observée à différentes circonstances physiques. (Par l'intermédiaire d'autres expériences où certaines de ces circonstances sont absentes).</p>	<p>*Une façon de prendre en compte la question de la décomposition de la force résultante en un système de force dans le cadre de l'interprétation logique (cf. commentaire p.106).</p>
<p>La conservation de la quantité de mouvement (empirique) se reformule comme : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$ (3ème loi).</p>	<p>*Une conséquence de l'interprétation logique (cf. commentaire p.104).</p>

Les lois du mouvement construites au départ dans le référentiel terrestre, sont ensuite généralisées aux référentiels où les accélérations observées peuvent effectivement être reliées aux circonstances physiques en présence, et non au mouvement du référentiel dans lequel elles sont déterminées, relativement à un autre référentiel.

Référentiel galiléen : référentiel où les accélérations observées peuvent être reliées aux circonstances physiques, et non au mouvement du référentiel dans lequel elles sont déterminées relativement à un autre.

*L'extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels, ayant lieu seulement après leur établissement dans le référentiel terrestre permet d'éviter le problème de circularité se posant dans le cadre de l'interprétation logique des lois du mouvement. Ce problème est contourné grâce à l'utilisation de la notion de circonstance physique (cf. commentaire p.108).

Chapitre 4

Une approche de l'enseignement de la théorie de la gravitation

4.1 Introduction

Dynamique et gravitation

Dans un cours d'introduction à la dynamique, l'un des premiers exemples de force présenté est celui du poids, assimilé à la force d'attraction terrestre. Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'idée d'une force exercée *par la Terre* est loin d'être évidente pour les élèves, qui voient fréquemment la chute libre comme un mouvement ayant lieu de lui-même (cf. le paragraphe « la non évidence de l'attraction terrestre » p.68). Cette interprétation rejoint une conception de la chute présente pendant quasiment 2000 ans de l'histoire des idées, d'Aristote à Galilée.

« Weight is [...] for Galileo a natural inclination of the body to come nearer to the center of the world. [...] By nature, he says, things are so constituted that the heavier bodies rest beneath the lighter bodies. » (Jammer, 1957, p.97)

Malgré le caractère fortement non évident du concept d'attraction terrestre, celui-ci se trouve pourtant présenté de manière déclarative dans de nombreux cours sur le sujet, au détriment de l'idée *qu'une connaissance soit accompagnée par des arguments permettant de la justifier*.

C'est le cas par exemple du cours de seconde proposé par le CNED (établissement public national à caractère administratif placé sous la tutelle du ministre de l'Éducation na-

tionale, de l'enseignement supérieur et de la recherche), introduisant l'idée d'attraction ainsi :

« Pourquoi cette gomme est-elle tombée ? Parce qu'elle est soumise à des actions mécaniques exercées par la Terre [...] on dira que la gomme est soumise à une force exercée par la Terre. » p.69¹

Une telle imposition par argument d'autorité est un sacrifice épistémologique auquel ne consent pas ce travail².

« Mieux vaudrait une ignorance complète qu'une connaissance privée de son principe fondamental. » (Bachelard, 2004, p.40)

L'utilisation de l'idée de mouvement naturel pour présenter la dynamique, en considérant l'évolution de l'interprétation du phénomène de chute, permet de justifier la raison pour laquelle celle-ci est interprétée en termes de force dans la théorie newtonienne (son caractère accéléré, relativement au choix du mouvement du référentiel). En même temps, la légitimité de l'interprétation de la chute en tant que naturelle est reconnue, par l'absence de circonstances particulières manifestes, associées à son accélération.

La présentation de la dynamique du chapitre précédent ne permet cependant pas de justifier le rôle de la Terre pour l'accélération de chute. C'est seulement en considérant l'élaboration de la théorie de la gravitation, en lien avec l'étude du mouvement des astres, que l'on peut trouver les arguments qui justifient l'idée d'attraction *terrestre*.

Le lien entre la construction de la dynamique et de la gravitation a une origine plus profonde encore, comme cela a été vu dans le chapitre 1, notamment avec cette citation de 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)

1. document officiel proposé par le CNED pour le cours de seconde, disponible sur le site de « Académie en ligne » : <http://www.academie-en-ligne.fr/Ressources/7/SP20/AL7SP20TEPA0111-Notions%20fondamentales-Physique.pdf>

2. cf. la conclusion du chapitre 2, « Ne jamais imposer la soumission à l'argument d'autorité » p.55.

Le contenu concerné

Formellement, le théorie de la gravitation peut se résumer à la formule de la force d'attraction s'exerçant entre tous corps deux à deux, de valeur proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. L'expression de cette force permet de rendre compte à la fois des phénomènes associés à la pesanteur, en particulier la chute, et des mouvements des planètes, décrits par les lois de Kepler. Elle permet également de relier le phénomène des marées au mouvement de la Lune.

La présentation de la proposition

En suivant la même démarche que pour le chapitre précédent, nous aborderons en premier lieu les idées des élèves sur les notions associées à la gravitation, pour en dégager le problème d'apprentissage majeur qui sera considéré ici. Face à ce problème, deux pistes de solutions seront proposées et développées, s'appuyant sur l'analyse du contenu et les positionnements généraux énoncés dans le chapitre 2, sur l'apprentissage et l'épistémologie.

La partie concernant l'analyse de contenu sera différente de celle de la dynamique, en raison de la différence de nature du contenu en jeu. En effet la présentation de la force de gravitation, en tant que cas particulier de force, dépend directement des choix faits pour introduire et formuler la dynamique.

L'analyse épistémologique des fondements de la dynamique, occupant une grande partie du chapitre précédent, n'aura pas d'équivalent ici, dans la mesure où les positionnements adoptés englobent le cas particulier de la gravitation. Ces prises de position resteront donc présentes en arrière plan, et feront partie des contraintes pour la présentation de la théorie de la gravitation.

Par ailleurs, l'étude et la prise en compte des critiques de la dynamique au niveau épistémologique ont poussé à s'éloigner de l'exposition historique des lois du mouvement par Newton, fortement controversée depuis le XVIII^e siècle. De l'étude de l'histoire des idées a été retenue essentiellement l'évolution de l'idée de mouvement naturel, sur une plus grande échelle de temps (Aristote, Galilée, Newton).

Nous verrons ici une motivation pour approfondir l'analyse historique de l'exposition de la gravitation par Newton. L'articulation des éléments menant à l'élaboration de cette loi est en effet dissociable de la manière dont est formulée la dynamique dans le texte

de Newton, et peut être utilisée à profit pour l'enseignement de la théorie, relativement au problème d'apprentissage visé.

Ainsi en résumé, l'approche proposée de la dynamique résulte d'un éclairage principalement épistémologique, tandis que l'approche de la gravitation qui va être présentée ici résulte d'un éclairage essentiellement historique.

4.2 Idées des élèves & problème d'apprentissage visé

Un revue globale des recherches (Kavanagh and Sneider, 2006a,b)

De nombreuses études ont mis en évidence des difficultés d'apprentissage des notions associées à la gravitation. Une revue relativement récente d'une grande partie de ces travaux a été effectuée par Kavanagh and Sneider (2006a,b).

Plutôt qu'une répartition par niveau d'enseignement, les auteurs proposent un classement thématique des conceptions³, notamment du fait que certaines d'entre elles observées chez les enfants se retrouvent plus tard, même jusqu'à l'université.

« Surprisingly, many high school and college students who can successfully solve numerical problems involving gravity hold qualitative misconceptions similar to those held by much younger students. » (Kavanagh and Sneider, 2006a)

La revue se divise en deux articles, le premier centré sur le mouvement de chute libre, synthétisant les résultats de 22 articles sur le sujet, et le second relatif aux mouvements de projectiles et aux orbites, synthétisant les contributions de 38 articles. Les recherches rassemblées présentent une grande diversité, à la fois au niveau des publics concernés (jeunes enfants, adolescents, étudiants à l'université et enseignants), de leur provenance (essentiellement Amérique du Nord, mais aussi Europe, Australie, Moyen Orient et Afrique) ainsi que des méthodologies de recherche utilisées.

Parmi les difficultés recensées par les auteurs, plusieurs reprennent celles déjà vues relativement à la dynamique (comme par exemple « le mouvement implique une force dans la direction du mouvement », la notion de « capital de force » ou encore l'idée que « la gravité est un mouvement ayant lieu de lui-même »). Celles ci ne seront donc pas reprises ici.

3. Les auteurs utilisent le terme « misconceptions » pour exprimer les idées des élèves, étudiants ou enseignants, problématiques pour l'apprentissage. Celui ci sera traduit ici par le termes de conception.

Nous nous arrêterons en particulier sur un premier groupe de conceptions, et nous reviendrons plus loin sur les autres. Il s'agit des suivantes :

- Les objets en orbite n'ont pas de poids, donc la gravité ne les affecte pas⁴ ;
- 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.

Première interprétation relativement au sens courant

Une première analyse de ces idées est celle de leur légitimité, du point de vue du langage courant et de l'expérience quotidienne, dans l'état d'esprit exprimé 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 - couramment présentes dans les médias - ce phénomène n'a manifestement pas lieu dans l'espace, où ils « flottent ». Ainsi l'idée qu'il n'y a 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 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 lui généraliser l'observation précédente : « il n'y a pas de *force de gravité* dans l'espace »⁵.

Cette conclusion peut même 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 deux autres conceptions citées ci dessus peuvent alors être interprétées comme une adaptation cohérente aux précédentes :

4. « Objects in orbits are weightless, so gravity does not affect them »

5. « [...] people hear such words in use and give them meaning and roles consistent with what they already think. » (Bliss and Ogborn, 1993)

- 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 ».

L'importance des relations entre conceptions (Galili, 1995a)

De tels liens logiques entre les différentes conceptions ont été mis en avant et questionnés par de nombreux chercheurs, dont notamment Galili (1995a) dans une recherche sur la compréhension du phénomène d'impesanteur. Il propose un schéma de raisonnements possibles, pour des élèves cherchant à rendre compte des relations entre l'état d'impesanteur, le poids et la gravitation (figure 4.2.1 ci dessous).

« It starts from the proposition students make in an actual observation (or adopting a standard teacher's claim) : "the reality inside a coasting satellite is called weightlessness", and "grows" through fallacious inferences to further related conclusions which are not valid from the point of formal physics, but are legitimate if the alternative understanding is adopted. » (Galili, 1995a)

On retrouve - formulées dans l'autre sens - les conceptions considérées précédemment :

- l'impesanteur est une propriété de l'espace vide,
- l'impesanteur résulte d'une grande distance de la Terre,
- l'impesanteur est due à l'absence d'air.

Ainsi que d'autres connexes :

- la pression atmosphérique est la cause du poids,
- le vide, même sur Terre, implique l'impesanteur.

Galili insiste sur l'importance de la connaissance de telles relations logiques entre les conceptions des élèves pour l'enseignement.

« This approach suggests that physics educators should consider the chain of logical deductions which could seem plausible to learners trying to make sense of their observations (TV-reports or science movies showing "floating" astronauts in a satellite or space) in terms of previously acquired knowledge with respect to the weight - gravitation phenomenon. All shown inferences from the mistakenly understood state of weightlessness terminate with wrong conceptions, like the causal role of the atmosphere in the weight-gravitational interaction, and/or spatial range of such interaction. It should

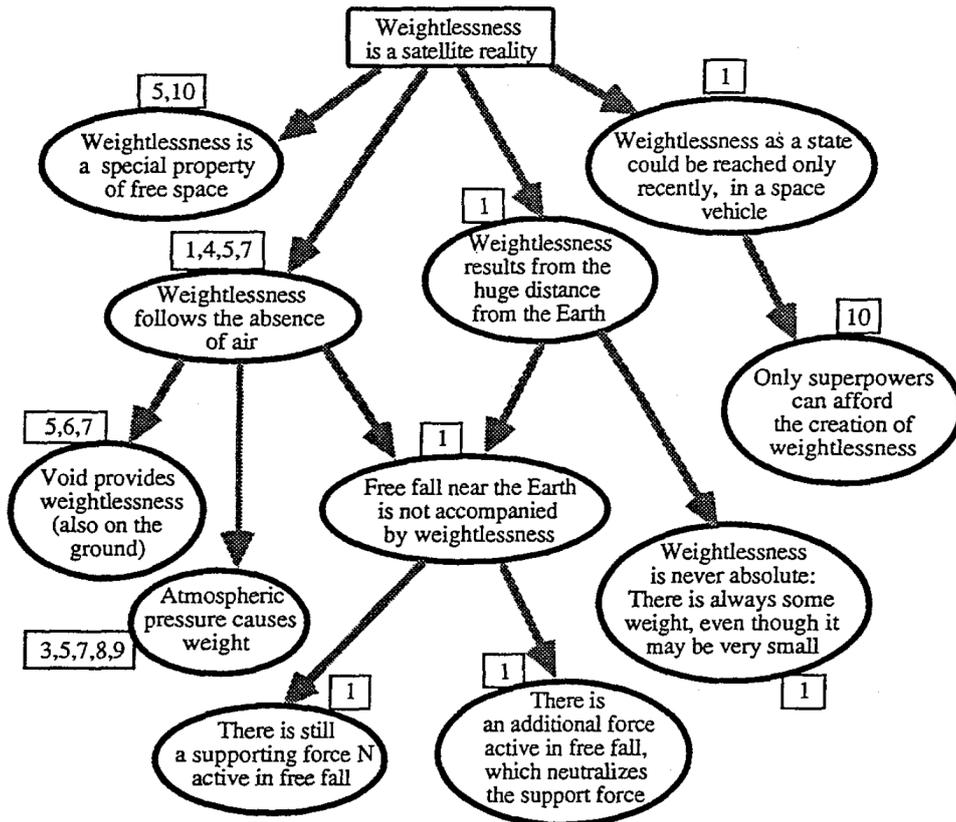


FIGURE 4.2.1 – « Students' "Tree of referential chains" which presents possible mistaken interpretations of the reality observed inside a coasting satellite. Numbers label information sources : 1 -the present study ; 2- Galili, 1993 ; 3 -Minstrel, 1982 ; 4- Watts, 1982 ; 5 - Ruggiero et al., 1985 ; 6 - Noce et al., 1988 ; 7 - Mayer, 1987 ; 8 - Kruger et al., 1990 ; 9 - Berg et al., 1991 ; 10 - classroom discussions followed the test of this study [level : intermediate, high school and college students]. » (Galili, 1995a)

be emphasised that these wrong inferences did not terminate and could stimulate further wrong conclusions which also seemed plausible if the previous idea had been assimilated. » (Galili, 1995a)

Une étude récente au niveau concerné (Williamson and Willoughby, 2012)

Les idées sur la gravité considérées jusque-là se répartissent sur différents niveaux. Elles se retrouvent en particulier dans une recherche plus récente de Williamson and Willoughby (2012), pour la tranche d'âge qui concerne ce travail : 17-19 ans (le « K-12 level » américain).

Cette étude se base sur plusieurs questionnaires distribuées à 312 étudiants en première année d'université, inscrits dans un cours d'introduction à l'astronomie. Le questionnaire est donné environ trois semaines après le cours sur la gravité. Une grande partie des étudiants inscrits dans ce cours sont des étudiants qui ne suivent pas une majeure scientifique, et il peut s'agir de leur seul cours de science. Après les questionnaires, 15 entretiens ont été menés, où il est demandé aux étudiants de lire à voix haute les questions et leurs réponses, en les clarifiant ou expliquant davantage lorsqu'ils le jugeaient nécessaire.

On peut voir dans les propos rapportés des entretiens des exemples des conceptions listées précédemment.

« [Student] : “Why do astronauts appear to float in their spacecraft ?” My response is “there is no gravity in space.”

[Interviewer] : Okay, and do you still agree with that ?

S : Yes, I do.

I : Okay, and what do you define as “space” ?

S : Anything outside of our gravitational pull.

I : So is there a boundary where something is in our gravitational pull and then not ?

S : I think it gradually decreases from Earth's surface to nothing at some elevation above earth. » (Williamson and Willoughby, 2012)

L'idée qu'il n'y ait pas de gravité dans l'espace apparaît à nouveau comme l'une des plus représentées.

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

Plus précisément, 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 existe 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%.

« Question B10 illustrates that most students (N = 71, 51.9%) understand that Earth's gravity diminishes with distance from the surface. Considering further distances from the surface of Earth, the majority of respondents to Question C17 (N=15, 46.9%) **assert that one simply must leave the Earth (and its atmosphere) to feel zero gravitational force from Earth.** This is a well document misconception (Watts 1982, Asghar and Libarkin 2010) and is supported by typical responses to Question A1 that assert **astronauts appear to float in their spacecraft because there is no gravity in space** (N = 72, 50.3%). » (Williamson and Willoughby, 2012)

Les auteurs poursuivent en indiquant qu'il puisse y avoir plusieurs façons de faire le lien entre l'absence de gravité dans l'espace et le rôle de l'atmosphère :

« In the “boundary” concept, there are many ways this could make sense : the atmosphere is the casing that holds gravity inside, or the extent of the atmosphere is simply an indicator of the presence of gravity. » (Williamson and Willoughby, 2012)

La seconde option est par exemple illustrée par la citation suivante :

« [Student] : Astronauts are able to float in their spacecraft because they've broken out of the atmosphere. . . once they've gotten past the point where earth is able to sustain any kind of atmosphere, then that's where gravity is weak enough for it [floating] to happen. I don't think it's a correlation in any meaningful sense. It's not like cause and effect or anything.

[Interviewer] : So it's not like the atmosphere is causing gravity ?

S : Where the atmosphere is, gravity is strong enough for there to be gravity.

I : Atmosphere is more of an indicator of where gravity is working ?

S : Yeah, that would be how it works. Yeah. » (Williamson and Willoughby, 2012)

Problème d'apprentissage visé : une distinction entre les 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 problème central visé dans cette étude, relativement à la compréhension du caractère universel de la loi de la gravitation.

Ce constat vis-à-vis des idées des élèves a fréquemment été rapproché des anciennes représentations du monde, comme en témoignent Kavanagh and Sneider (2006a) :

« 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 and Sneider, 2006a)

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 première piste développée dans ce travail. L'objectif de l'approche proposée est d'**avoir un impact sur les difficultés associées à la distinction entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace, en s'inspirant de l'histoire des idées ayant mené à leur unification.**

La seconde piste développée, distincte et complémentaire, consiste à **considérer en détail le cas de l'impesanteur, dans le but de mettre en évidence la compatibilité entre l'image de l'astronaute en flottage et la présence d'une force de gravitation.** Cela rejoint l'intention exprimée et approfondie par Launer (2014) :

« Les images d'astronautes qui « flottent » librement dans leur habitacle, appuyées de commentaires plus ou moins éclairés, défient les lois de la gravitation. . . La parole du professeur de physique affirmant, conformément au programme, que « La gravitation gouverne tout l'Univers » ne pèse pas lourd face à l'évidence visuelle. Ne pas aborder l'impesanteur avec nos élèves, c'est laisser les médias contredire, à chaque évocation du phénomène, le fait que la gravitation est universelle. C'est laisser planer l'idée que la gravité peut disparaître, quoi qu'ait pu en dire Newton. » (Launer, 2014)

4.3 L'utilisation d'un cheminement historique

4.3.1 Les motivations

La rôle de la théorie de la gravitation dans l'histoire des idées

L'unification « de la Terre et du Ciel », c'est-à-dire la possibilité d'une description commune des phénomènes terrestres et célestes, est régulièrement citée comme conférant son caractère révolutionnaire à la théorie newtonienne, d'un point de vue historique. On peut la trouver développée dans de nombreux travaux d'histoire ou de philosophie des sciences. Nous nous arrêterons sur son expression par Alexandre Koyré, dans son article *Sens et portée de la synthèse newtonienne* (Koyré, 1968).

« [...] nous savons que grâce à son invention du calcul [Newton] put démontrer l'identité des gravitations terrestre et céleste et découvrir la loi fondamentale de l'attraction qui lie [...] les corps les plus petits et les plus grands - atomes et étoiles - de l'Univers infini. »

« Attardons nous un peu sur cette révolution, l'une des plus profondes sinon la plus profonde des mutations et des transformations accomplies - ou subies - par l'esprit humain depuis l'invention du Cosmos par les Grecs deux mille ans plus tôt. »

« [...] je vais caractériser cette révolution par deux traits étroitement liés et même se complétant l'un l'autre.

- a) La destruction du Cosmos [...]
- b) La géométrisation de l'espace [...]

La disparition - ou destruction - du Cosmos signifie que le monde de la science, le monde vrai, n'est plus regardé ou conçu comme un tout fini et

hiérarchiquement ordonné, donc qualitativement et ontologiquement différencié mais comme un Univers ouvert, indéfini, unifié non par sa structure immanente mais seulement par l'identité de ses lois et de ses éléments fondamentaux ; un Univers dans lequel, en contraste avec la conception traditionnelle qui sépare et oppose les deux mondes du devenir et de l'être, c'est à dire de la Terre et des cieux, tous ses composants apparaissent situés au même niveau ontologique ; un Univers dans lequel la *physica caelestis* et la *physica terrestris* sont identifiées et réunies, dans lequel l'astronomie et la physique deviennent interdépendantes et unies par suite de leur commune soumission à la géométrie. »

Cette même idée est synthétisée de façon plus pragmatique par Vigoureux (2003) :

« Les découvertes de Kepler et de Galilée laissent la structure générale de l'univers inchangée : la Terre et le ciel demeurent irréductibles l'un à l'autre et soumis à des lois différentes ; les corps célestes ne tombent pas et tournent ; les corps terrestres ne tournent pas et tombent. Comme autrefois en Grèce, les lois du ciel et celles de la Terre sont en complète opposition. Isaac Newton (XVIIe-XVIIIe siècles) va pourtant réussir à en faire la synthèse en montrant qu'elles expriment deux aspects d'une seule et même loi : toutes les masses de l'univers s'attirent à distance et à travers le vide. » (Vigoureux, 2003)

Ce caractère révolutionnaire de la théorie de la gravitation pourrait déjà être un argument pour qu'il soit intégré dans son enseignement, relativement à la volonté d'aborder des aspects de la nature de la physique.

Retour sur les positionnements épistémologiques adoptés (cf. section 2.4 p.32)

Comme cela a été vu au chapitre 2, certains aspects épistémologiques ont été jugés conséquents pour l'enseignement et l'apprentissage de la physique. En plus de la valeur accordée à la familiarisation à l'image de la physique pour elle-même, en tant que composante de la culture, celle-ci peut également avoir une influence sur l'appropriation de ses concepts.

« Students holding more sophisticated epistemological views tend to approach learning more actively and tend to acquire a better conceptual understanding. » (Louca et al., 2004)

La théorie de la gravitation permet précisément d'illustrer l'un des points de vue épistémologiques majeurs mis en avant précédemment : le fait qu'un apport fondamental

d'une théorie physique soit les mises en relation qu'elle permette de révéler, ou autrement dit le fait qu'elle mette en évidence des liens entre plusieurs types de phénomènes, que l'on pensait distincts au départ⁶.

L'autre point de vue épistémologique développé dans le chapitre 2 concernait l'idée que *les concepts et théories physiques soient le résultat d'une construction, constituée d'allers-retours complexes entre réflexion théorique et expérience*. En particulier, cette construction se base sur certaines observations (*avant la réflexion sur les phénomènes, il y a la considération des phénomènes qui suscitent la réflexion*), et sur certaines questions (« *toute connaissance est une réponse à une question* » (Bachelard, 1938)).

A ce point de vue correspondaient deux critiques d'une présentation déclarative d'une théorie, où le contenu est exposé directement sous une forme synthétique.

- En premier lieu, ne pas faire apparaître les faits expérimentaux initiaux, le problème de départ et le cheminement menant à la théorie, implique le risque de faire passer comme un « coup de génie » impénétrable ce qui en fait repose sur une construction argumentée.
- D'autre part, l'absence de cette construction a tendance à masquer le caractère critiquable et provisoire de la théorie. L'explicitation d'une argumentation, s'appuyant sur des faits et hypothèses, permet de rendre plus accessible l'idée de sa remise en question, via un raisonnement qui prendrait en compte d'autres faits ou d'autres hypothèses.

Face à ces critiques d'ordre épistémologique, l'usage de l'histoire des sciences a été considéré pour la conception d'une approche d'enseignement (cf. 2.5.3 p.47), dans la mesure où l'étude de l'histoire des idées permet d'identifier les faits et problèmes initiaux à l'origine d'une connaissance scientifique, ainsi que les arguments contribuant à sa construction.

« If learning a scientific representation involves active construction of the representation in a problem-solving process, then understanding how scientific concepts were developed in the first place will aid the development of instructional strategies. » (Nersessian, 1989)

6. cf. section 2.4.2 *La physique comme mises en relation* (p.38). Un point de vue notamment revendiqué par Poincaré : « Maintenant qu'est-ce que la science? [...] c'est avant tout une classification, une façon de rapprocher des faits que les apparences séparaient, bien qu'ils fussent liés par quelque parenté naturelle et cachée. La science, en d'autres termes, est un système de relations. » (Poincaré, 1905, p.265)

Une intention présente dans l'institution

La valorisation de l'usage de l'histoire des sciences au niveau épistémologique se retrouve dans une grande part de la littérature en didactique des sciences (Matthews, 2014), et est également revendiquée dans les programmes actuels français de l'enseignement secondaire, comme le relèvent Hosson and Schneeberger (2011) :

« Selon les programmes de collège actuels « 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, p. 1). Dans les nouveaux programmes de lycées, la volonté affichée d'une présentation dynamique et culturelle de la science pose l'histoire des sciences comme un moyen de réconcilier les élèves avec la science. En première S, « l'enseignant peut utiliser l'approche historique comme démarche didactique destinée à mettre la science en contexte et en culture » (MEN, 2010b, p. 4). En classe de seconde, la « **mise en perspective historique** » (en tant qu'« **histoire de la construction de la connaissance scientifique** ») est posée comme une voie à privilégier pour approcher la nature et « **l'universalité** » des lois et des modèles et devient le témoin des qualités humaines sous-jacentes à l'activité scientifique : « **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. Elle est également une école d'humilité et de patience** » (MEN, 2010a). » (Hosson and Schneeberger, 2011)

Pour en revenir à l'enseignement de la théorie de la gravitation en particulier, l'idée d'aborder le cheminement historique menant à l'unification entre Terre et Ciel se retrouve dans les « High School Standards » du « Benchmarks for Science Literacy (BM) », ainsi que le rapportent Kavanagh and Sneider (2006a) dans leur synthèse de ces recommandations officielles américaines.

« 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 examples (star formation, tides, comet orbits, etc.) and

from the study of the history leading to this unification of the Earth and sky. » (Kavanagh and Sneider, 2006a) (emphase ajoutée)

Dans ce même document, Kavanagh and Sneider (2006a) relèvent de plus que celui-ci privilégie la prise en compte des conceptions sur le sujet, plutôt que la formule quantitative de la force de gravitation.

The "inversely proportional to the square" aspect is not a high priority for literacy. Much more important is escaping the common adult misconceptions that the Earth's gravity does not extend beyond the atmosphere or that it is caused by the atmosphere (BM grades 9–12; 96) » Kavanagh and Sneider (2006a)

L'approche qui va être développée ici est dans la continuité de ces intentions, en cherchant à utiliser un cheminement historique menant à l'unification des mondes terrestre et céleste, dans le but d'avoir un impact sur les difficultés impliquant une distinction entre phénomènes sur Terre et dans l'espace.

4.3.2 Analyse de l'exposition par Newton de la théorie de la gravitation

L'utilisation de l'histoire des idées pour une approche d'enseignement nécessite une étude approfondie de celle-ci. 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, 2005).

Une synthèse de la logique de cette présentation est proposée ici. Son exposition permettra ensuite de discuter des éléments qui pourraient ou non être intéressants à utiliser dans le cadre de la conception d'une séquence d'enseignement.

Le livre troisième débute par une liste de règles méthodologiques et de phénomènes sur lesquels va s'appuyer le raisonnement. Celui-ci est ensuite constitué d'un certain nombre de propositions, dont ne seront considérées ici que les sept premières, les plus fondamentales pour la construction de la théorie. Les suivantes portent sur des situations ou problèmes particuliers, qui ne sont pas nécessaires si l'on s'intéresse seulement à l'établissement de la loi de la gravitation.

« Règles qu'il faut suivre dans l'étude de la physique »

En premier lieu, Newton explicite des principes méthodologiques sur lesquels il va s'appuyer pour l'élaboration de la théorie.

« **Règle I** [parcimonie]

Il ne faut admettre de causes, que celles qui sont nécessaires pour expliquer les phénomènes. [...]

Règle II [simplicité]

Les effets du même genre doivent toujours être attribués, autant qu'il est possible, à la même cause. [...]

Règle III [généralisation]

Les qualités des corps qui ne sont susceptibles ni d'augmentation ni de diminution, et qui appartiennent à tous les corps sur lesquels on peut faire des expériences, doivent être regardées comme appartenantes à tous les corps en général. [...]

Règle IV [induction]

Dans la philosophie expérimentale, les propositions tirées par induction des phénomènes doivent être regardées malgré les hypothèses contraires, comme exactement ou à peu près vraies, jusqu'à ce que quelques autres phénomènes les confirment entièrement ou fassent voir qu'elles sont sujettes à des exceptions. [...] » (Newton 2005, p.471-473) ⁷

« Phénomènes »

Après avoir consacré les deux premiers livres à mettre en place le cadre théorique (notion de force, de masse, lois du mouvement...) et mathématique (cinématique, géométrie, calcul des fluxions...), le troisième livre sur « le système du monde » démarre par les observations expérimentales sur lesquels s'appuie la construction de la théorie. Les phénomènes considérés sont suivis de commentaires sur les observations, leurs auteurs, leurs valeurs numériques et le contexte expérimental.

« **Phénomène I**

Les satellites de Jupiter décrivent autour de cette Planète des aires proportionnelles aux temps, et leur temps périodique (en supposant que les

7. Toutes les citations de cette partie seront tirées du livre troisième *Du système du monde* des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, traduits par la Marquise du Chastellet, à Paris en 1759.

étoiles fixes soient en repos) sont en raison sesquiplée de leurs distances au centre de cette Planète. [...]

Phénomène II

Les satellites de Saturne, décrivent autour de cette Planète des aires proportionnelles aux temps; et leur temps périodique, (les étoiles fixes étant supposées en repos) sont en raison sesquiplée de leurs distances au centre de Saturne. [...]

Phénomène III

Les cinq principales planètes, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne enferment le Soleil dans leurs orbites. [...]

Phénomène IV

Les temps périodiques des cinq principales planètes autour du Soleil, et celui de la Terre autour du Soleil ou du Soleil autour de la Terre, (en supposant les étoiles fixes en repos) sont en raison sesquiplée de leur moyenne distance au Soleil. [...]

Phénomène V

Si on prend la Terre pour centre des révolutions des planètes principales, les aires qu'elles décrivent ne seront point proportionnelles aux temps; mais si on regarde le Soleil comme le centre de leurs mouvements, on trouvera alors leurs aires proportionnelles aux temps. [...]

Phénomène VI

La Lune décrit autour de la Terre des aires proportionnelles aux temps. [...]

On retrouve dans ces six phénomènes une partie des lois de Kepler, à l'origine formulées pour les planètes, ainsi que des observations analogues pour d'autres systèmes, comme Jupiter et ses satellites, ou le système Terre-Lune. Pour la suite, labellisons les lois de Kepler généralisées (LKG) ainsi :

- LKG1 : Orbite elliptique
- LKG2 : Lois des aires : aires balayées proportionnelles aux temps de parcours sur l'orbite
- LKG3 : Relation entre la période T et la distance moyenne au foyer r : $T \propto r^{3/2}$

On peut alors ré-exprimer les phénomènes de Newton de façon simplifiée :

- **Phénomène I** : LKG 2 et 3 pour le système de Jupiter et ses satellites.
- **Phénomène II** : LKG 2 et 3 pour le système de Saturne et ses satellites.
- **Phénomène III** : Vécacité du système héliocentrique, (prouvé selon Newton par les phases des planètes).

- **Phénomène IV** : LKG 3 pour les planètes.
- **Phénomène V** : LKG 2 pour les planètes, dans un référentiel héliocentrique.
- **Phénomène VI** : LKG 2 pour le système Terre-Lune.

Le fait que les observations concernant différents systèmes puissent être décrites selon la même structure, celles des lois de Kepler, témoigne déjà d'une certaine unité dans le monde céleste, et donc de l'importance de ces lois. Une remarque cependant, Newton ne fait à aucun moment référence à la première loi de Kepler. En effet dans le phénomène III : « Les cinq principales planètes enferment le Soleil dans leurs orbites », il ne précise pas la forme elliptique de leur orbite, pourtant déterminée par Kepler.

« Propositions »

Les sept premières propositions du livre seront rapportées. Le contenu de chaque proposition sera résumé de façon simplifiée entre parenthèses, et une idée de sa justification sera synthétisée ensuite. Le raisonnement articule des éléments de différentes natures :

- les « règles qu'il faut suivre pour étudier la physique » énoncées au début du livre,
- les six phénomènes listés précédemment, ainsi que des observations expérimentales supplémentaires,
- les trois lois du mouvement proposés dans le premier livre,
- des résultats mathématiques établis géométriquement dans le premier livre.

Parmi les propositions mathématique du premier livre, ne sera repris que le contenu qui sera directement utilisé. Celui-ci sera exprimé directement dans le formalisme analytique actuel.

Proposition I – Théorème I (Jupiter centre des forces centripètes s'exerçant sur ses satellites, force en $1/r^2$)

« Les forces par lesquelles les satellites de Jupiter sont retirés perpétuellement du mouvement rectiligne et retenus dans leurs orbites, tendent au centre de Jupiter et sont en raison réciproque des carrés de leurs distances à ce centre. » (p.480)

Le principe d'inertie est utilisée dans l'interprétation du mouvement circulaire : une force est nécessaire puisqu'il ne s'agit pas d'un mouvement rectiligne uniforme.

La base empirique est le phénomène I, c'est-à-dire les LKG 2 et 3 pour le système de Jupiter et ses satellites.

La loi des aires (LKG2) pour les satellites implique que la force centripète soit toujours dirigée vers le centre de la trajectoire c'est-à-dire ici Jupiter (Livre1, proposition II).

Pour le cas d'une orbite circulaire, la force centripète est proportionnelle à v^2/r (Livre 1, prop IV, cor 1 et 6). En exprimant la vitesse en fonction de la période, $v = 2\pi r/T$, et en utilisant $T = Cr^{3/2}$ (LKG 3), on obtient la dépendance de la force en fonction de la distance r :

$$F = K \times v^2/r = K \times (4\pi^2 r^2/T^2) \times 1/r = K \times (4\pi^2 r^2/Cr^3) \times 1/r = (4K\pi^2/C) \times 1/r^2$$

Donc $F \propto 1/r^2$.

Newton généralise ensuite directement au cas analogue de Saturne et ses satellites.

Proposition II – Théorème II (Soleil centre des forces centripètes s'exerçant sur les planètes, force en $1/r^2$)

« Les forces par lesquelles les planètes principales sont perpétuellement retirées du mouvement rectiligne, et retenues dans leurs orbites, tendent au Soleil, et sont réciproquement comme le carré de leur distance à son centre.
» (p.480)

Il s'agit du même raisonnement que précédemment, à partir des lois de Kepler (phénomène IV et V). La force centripète proportionnelle à v^2/r se généralise à des trajectoires autres que circulaires (Livre 1, prop IV, cor 8)⁸.

Proposition III – Théorème III (Terre centre de la force centripète s'exerçant sur la Lune, force en $1/r^2$)

« La force qui retient la Lune dans son orbite, tend vers la Terre, et est en raison réciproque du carré de la distance des lieux de la Lune au centre de la Terre. » (p.480)

Ce cas est plus subtil dans la mesure où il n'y a qu'un seul corps en orbite autour de la Terre, donc pas de comparaison possible avec d'autres corps à d'autres distances. L'observation en jeu est le « mouvement très lent à l'apogée lunaire », c'est-à-dire lorsque

8. Newton n'utilise pas ici un autre argument mathématique menant à la même conclusion : les trajectoires elliptiques impliquent également une force en $1/r^2$ avec r la distance au foyer (prop XI du livre I). Cela rejoint le fait qu'il n'expose pas la première loi de Kepler dans la liste des phénomènes qu'il compte utilisait. Ce fait étonnant n'a pas été élucidé dans ce travail (mais ne posera pas de problème particulier).

la Lune est la plus éloignée de la Terre, par rapport à son rayon moyen. Dans le livre I est étudié « le mouvement des apsides dans des orbites qui approchent beaucoup des orbites circulaires » (prop 45). Il est montré que si la force centripète est une puissance du rayon, on peut trouver cette puissance par le mouvement des apsides (cor 1). Avec r la distance Terre-Lune centre à centre, Newton trouve $1/r^{2+4/243}$, soit presque $1/r^2$. Quantitativement, par le corollaire 2 de la même proposition, il est possible de déterminer l'action qui s'ajoute à une force centripète en $1/r^2$ par le mouvement des apsides, et réciproquement. La petite différence (l'exposant $4/243$) est attribuée à l'action du Soleil sur la Lune.

Newton commence à introduire la suite dans le corollaire de cette proposition. Il suggère en effet que s'il y a une petite décroissance en $1/r^2$ de la force centripète s'exerçant sur la Lune, au niveau de son apogée, alors en extrapolant cette décroissance à plus grande échelle, on peut calculer la valeur de cette force centripète à la surface de la Terre.

« on aura la force centripète de la Lune près de la surface de la Terre, en supposant que cette force, en descendant vers la surface de la Terre, augmente continuellement en raison doublée inverse de la hauteur. » (p.481)

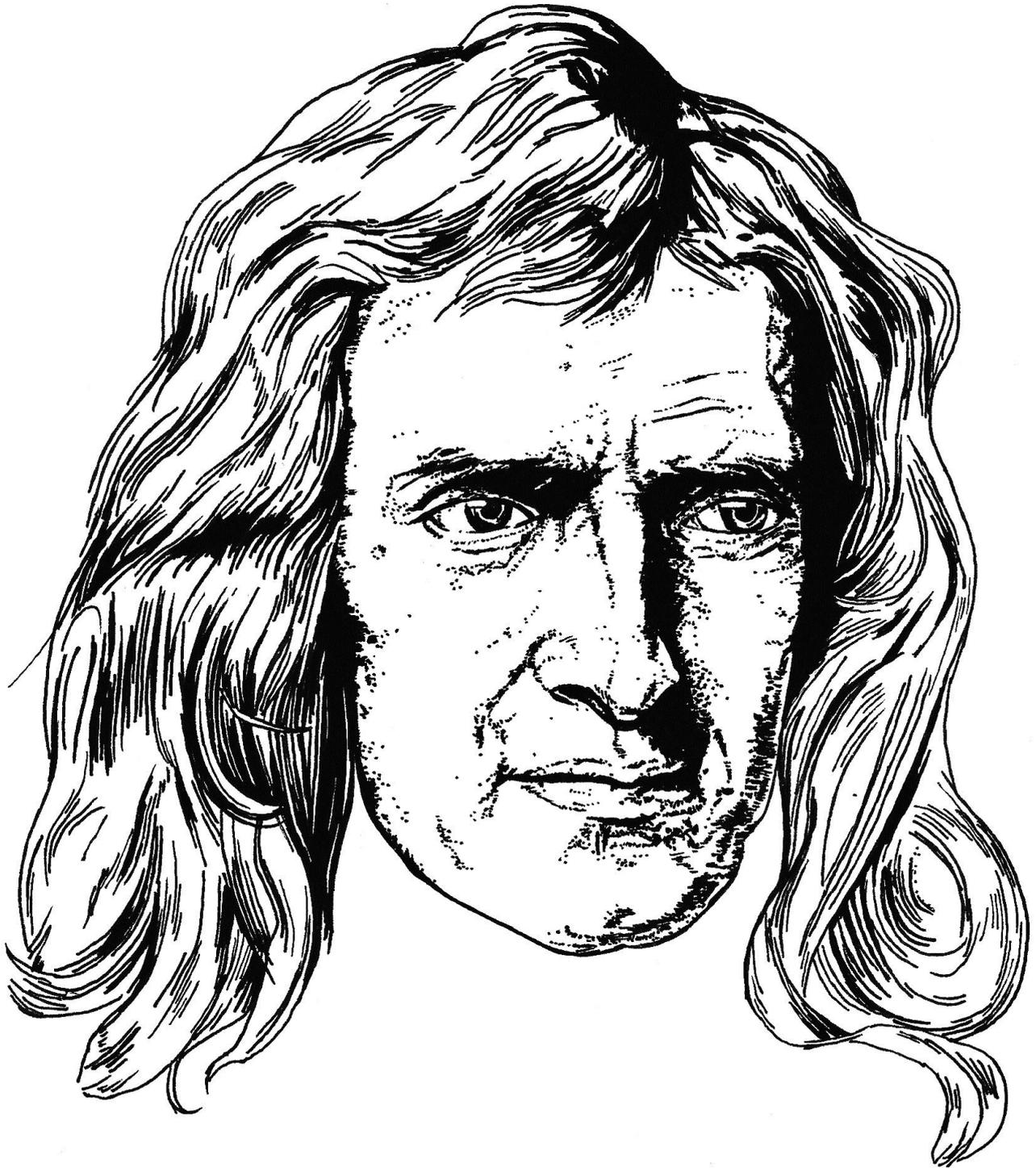
Il s'agit là d'un élément fondamental d'un point de vue épistémologique : l'idée, appliquée à un cas précis et quantitatif, de la continuité d'une loi entre le ciel et la Terre.

Proposition IV – Théorème IV (La force centripète en $1/r^2$ agissant sur la Lune est la gravité terrestre)

« La Lune gravite vers la Terre, et par la force de la gravité elle est continuellement retirée du mouvement rectiligne et retenue dans son orbite. » (p.481)

A partir de la distance et de la période de la Lune, on peut calculer de combien celle-ci descend vers la Terre, c'est-à-dire de combien elle s'écarte d'une trajectoire rectiligne, par unité de temps. En supposant que la force centripète croît en $1/r^2$ en s'approchant de la Terre, on obtient la valeur de cette force à la surface de la Terre ($D_{Terre-Lune} = 60R_{Terre}$, donc il s'agit de multiplier par 60^2). Or ce facteur doit se répercuter sur la distance de descente par unité de temps. En multipliant cette distance pour le cas de la Lune sur son orbite par 3600, on trouve une valeur très proche de la distance de chute par unité de temps à la surface de la Terre.

« Donc la force par laquelle la Lune est retenue dans son orbite, serait égale à la force de la gravité ici-bas, si la Lune était près de la surface de la Terre. » (p.482)



Isaac Newton

Par principe de parcimonie et de simplicité (règles 1 et 2), Newton en conclut qu'il s'agit de la même force : la gravité.

Il ajoute à cela une considération simple : si cette force centripète était d'une autre nature que la gravité, alors elle devrait s'ajouter à celle-ci :

« Car si cette force était autre que la gravité, les corps en s'approchant de la Terre par ces deux forces réunies descendraient deux fois plus vite, [...] ce qui est entièrement contraire à l'expérience. » (p.483)

L'hypothèse sous-jacente reste la continuité de la loi trouvée pour l'orbite de la Lune jusqu'à la surface de la Terre.

Newton propose une autre justification, via une expérience de pensée. Il imagine qu'il y ait d'autres satellites de la Terre en plus de la Lune, comme c'est le cas pour Jupiter ou Saturne. Par induction ces satellites devraient suivre également la troisième loi de Kepler (LKG3) et donc le rapport de leur force centripète serait en $1/r^2$. En imaginant que l'un de ces satellites soit très proche de la surface de la Terre, au niveau du sommet des montagnes, la valeur de sa force centripète serait égale à celle de gravité, par le calcul précédent. On retombe alors sur la même conclusion :

« Donc, puisque ces deux forces, c'est-à-dire, celles des corps graves et celles de ces petites Lunes, sont dirigées vers le centre de la Terre, et qu'elles sont égales et semblables entre elles, ces forces sont les mêmes et par conséquent elles doivent avoir (Règles 1 et 2) une même cause. » (p.484)

Proposition V – Théorème V (toutes les forces centripètes en $1/r^2$ vues précédemment sont en fait la force de gravité)

« Les satellites de Jupiter gravitent vers Jupiter, ceux de Saturne vers Saturne, et les planètes principales vers le Soleil, et c'est par la force de leur gravité que ces corps révolvants sont retirés à tout moment de la ligne droite et qu'ils sont retenus dans des orbites curvilignes. » (p.484)

Il s'agit de la généralisation de la proposition précédente⁹, par la similarité de ces différents phénomènes célestes, « du même genre que celui de la révolution de la Lune autour de la Terre » (p.484) :

— « ces révolutions tendent au centre » (p.484)

9. cf. règle 2 : « Les effets du même genre doivent toujours être attribués, autant qu'il est possible, à la même cause. »

— « ces forces décroissent dans la même raison, dans laquelle la force de la gravité décroît en s'éloignant de la Terre. » (p.484)

Dans le premier corollaire de cette proposition, il tire une déduction directe de cette identification. Ce qu'on appelle gravité sur Terre correspond au poids des objets. Donc en étendant la force de gravité aux planètes, cela revient à leur donner un poids également. Sans le préciser encore à ce niveau, cela commence à introduire la présence de la masse, désignée plutôt par « quantité de matière », dans la formulation généralisée de la force de gravité. En effet, dans la mesure où il s'agit du facteur qui intervient dans le poids pour la gravité terrestre, si la force centripète qui maintient les planètes est également la gravité, alors elle dépend elle aussi de la quantité de matière. Il cite aussi dès ce corollaire l'argument qui mènera à prendre en compte les deux masses en jeu dans le système.

« Et comme toute attraction est mutuelle par la troisième loi du mouvement, Jupiter doit graviter vers tous ses satellites, Saturne vers tous les siens, la Terre vers la Lune, et le Soleil vers toutes les planètes principales.»
(p.484)

Proposition VI – Théorème VI (extrapolation de la dépendance en la masse de la force de gravité)

« Tous les corps gravitent vers chaque planète, et sur la même planète quelconque leurs poids, à égale distance du centre, sont proportionnels à la quantité de matière que chacun d'eux contient. » (p.485)

Qualitativement, il s'agit de la généralisation du poids pour toutes les planètes, introduit par le corollaire précédent.

Indépendance de la nature de la matière

Newton ne conclut cependant pas directement. En effet, bien que l'on puisse calculer l'accélération centripète des planètes, on ne sait pas a priori quels sont les facteurs liés à l'intensité de la force de gravité qui y sont associés. Par identification avec la force de gravité sur Terre, on est conduit à penser à la masse (quantité de matière). Mais ne connaissant des exemples de chute libre que dans le cas de la Terre, il se peut qu'il y ait d'autres paramètres en jeu, mais constant sur Terre. En particulier, il pense à la nature de la matière, qui a priori est différente entre les autres corps célestes et la Terre. Afin de tester cette hypothèse, Newton conçoit et réalise lui-même une petite expérience. Il fait osciller des pendules de bois creux identiques remplis de différents matériaux (or,

argent, plomb, verre, sable, sel, bois, eau et froment), dans des quantités telles que tous les pendules aient le même poids (comparaison par l'équilibre d'une balance). Obtenant des oscillations identiques, il en conclut que la gravité ne dépend pas de la nature des matériaux, puisqu'il s'agit du seul paramètre qui varie¹⁰.

Newton en induit alors que quel que soit la nature de la matière dont sont faits les corps célestes :

« Il n'y a donc aucun doute que la nature de la gravité ne soit la même dans les planètes et sur la Terre. »

Dépendance quantitative de la matière

Pour le système de Jupiter et ses satellites, ou du Soleil et des planètes, la dépendance en $1/r^2$ de la force centripète a été déterminée sans considération de la masse des systèmes en jeu. Cela implique quelle que soit la quantité de matière des satellites de Jupiter ou des planètes, la force centripète ne dépend que de la distance au centre de révolution, et pas de la masse. Par exemple s'ils se retrouvaient sur la même orbite, ils auraient tous la même accélération et pourraient rester sur cette même orbite, malgré leur masse différente.

De même que pour le cas de la chute libre sur Terre, cette indépendance des accélérations observées en la masse implique que la force associée soit proportionnelle à la masse (puisqu'elle est quantifiée par le produit de l'accélération par la masse, $F = ma$).

« Or les forces qui accélèrent également des corps inégaux sont comme ces corps, c'est-à-dire, que les poids des corps sur les planètes sont comme la quantité de matière qu'ils contiennent. » (p.486)

S'agissant d'une étape décisive, Newton explicite plus en détail le cas des satellites de Jupiter.

« De plus, les poids de Jupiter et de ses satellites sur le Soleil sont proportionnels à leur quantité de matière, c'est ce qui est prouvé par le mouvement très régulier des satellites de Jupiter ; car si l'un de ces satellites était plus attiré que les autres vers le Soleil, parce qu'il contient plus de matière, le mouvement des satellites serait dérangé par cette inégale attraction. » (p. 486)

10. Cette étape fait particulièrement sens avec la formulation du concept de force proposé dans le chapitre précédent, comme caractérisant les circonstances physiques associées à l'accélération. Newton cherche en effet si la nature du matériau utilisé est une des circonstances de la situation pouvant être reliée à l'accélération de la chute, via la période du pendule. Puisque ce n'est pas le cas, la grandeur force associée ne prendra en compte que la masse.

Par ailleurs, il insiste sur la généralisation dans le corollaire 2, revenant sur le poids pour les corps sur Terre.

« Tous les corps qui sont autour de la Terre pèsent sur la Terre, et leurs poids, lorsqu'ils sont également éloignés de son centre, sont comme la quantité de matière que chacun d'eux contient. C'est ce que les expériences ont fait voir dans tous les corps sur lesquels on a pu en faire. Ainsi, par la troisième règle, on doit affirmer la même chose de tous les corps en général. »
(p.488)

Newton fait référence à une ancienne hypothèse pour la force qui tient les planètes en orbite, celle du magnétisme¹¹, qui se trouve infirmée par sa proposition :

« La force de la gravité est d'un autre genre que la force magnétique. Car l'attraction magnétique n'est point comme la quantité de matière attirée. »
(p.489)

Proposition VII – Théorème VII (la force de gravité s'exerce entre tous corps deux à deux et est proportionnelle au produit de leur masse)

« La gravité appartient à tous les corps, et elle est proportionnelle à la quantité de matière que chaque corps contient. » (p.489)

L'argument est ici la troisième loi du mouvement « c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et dans des directions contraires. » (Livre 1, p. 61) Par symétrie du raisonnement précédent avec le deuxième corps en jeu dans l'interaction, il est nécessaire que sa quantité de matière intervienne également dans l'intensité de la force, de la même façon que celle du premier corps. D'où la proportionnalité en la masse de chacun des corps.

Cette proposition appuie à nouveau le caractère général de la loi de gravité. En effet, elle suggère que la force de gravité se manifeste dans n'importe quelle situation où deux masses sont en présence, sans même considérer un centre comme la Terre ou le Soleil. Deux objets quelconques s'attirent avec une intensité proportionnelle à chacune

11. Il s'agit d'une idée notamment soutenue par Kepler, influencé par les travaux de Guibert, qui pense que les forces à l'œuvre pour le mouvement des astres sont de nature magnétique, émises par le Soleil en rotation.

« Je suis très occupé par la recherche des causes physiques. Mon but est de montrer que la machine céleste ne doit pas être considérée comme un dispositif divin mais plutôt comme un mouvement d'horlogerie... dans la mesure où tous les mouvements sont engendrés par une seule force magnétique très simple comme dans le cas d'une horlogerie où tous les mouvements sont provoqués par un simple poids.» Kepler, Lettre à Herwart, 1605

de leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance entre leur centre. Il s'agit d'une généralisation très forte, dans la mesure où on ne voit aucune manifestation de cette force entre les objets courants. Newton anticipe la critique et l'explique qualitativement :

« Si quelqu'un objecte que selon cette loi tous les corps d'ici-bas devraient graviter les uns vers les autres, et que cependant cette gravité mutuelle n'est pas sensible : je répondrai, que cette gravité mutuelle des corps étant à leur gravité vers la Terre, comme la masse de ces corps à la masse de la Terre, elle n'est pas à beaucoup près assez forte pour pouvoir être aperçue. » (p.489)

4.3.3 Les éléments préalables nécessaires pour une reconstruction de la théorie de la gravitation

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.

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.

La première de ces intentions fait écho à plusieurs positionnements abordés précédemment :

- 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, avait été jugée déterminante (cf. section 2.5.2 *La motivation des élèves et la « problem posing approach »*¹² p.44).
- D'un point de vue épistémologique, une construction progressive et argumentée permet d'éviter de faire passer la forme finale du savoir comme un « coup de génie » du physicien. Elle laisse de plus apparaître le caractère critiquable et

12. « 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 and Klaassen, 2004)

provisoire de la théorie (du moins relativement à une présentation déclarative du contenu final, cf. section 2.4.1 p. 33).

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 connaissance plus grande encore. Il s'agit donc d'appliquer un principe de parcimonie pour la sélection des éléments à considérer¹³.

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 proposée. En particulier, les points suivants sont cruciaux :

- Le fait que les lois de Newton aient été définies dans le référentiel terrestre ;
- La formulation du concept de force, comme caractérisant les circonstances physiques associées à une accélération ;
- La formulation de la notion de référentiel galiléen, comme un référentiel dans lequel les accélérations observées peuvent être reliées aux circonstances physiques (et non au mouvement du référentiel dans lequel elles sont déterminées, relativement à un autre).

La distinction entre Terre et Ciel

L'objectif de la séquence d'enseignement est d'aboutir à la formule de la force de gravitation. L'utilisation d'un cheminement de reconstruction a pour but de mettre en évidence l'unification qu'elle implique entre phénomènes terrestres et célestes.

Saisir pleinement la portée de cette unification requiert de pouvoir la re-situer le contexte historique antérieur, où - au contraire - la distinction entre Terre et Ciel était une caractéristique essentielle des représentations du monde.

Beaucoup pourrait être dit sur ce sujet au niveau culturel¹⁴. Pour se limiter au minimum, le point de vue de la physique peut suffire pour justifier la distinction entre mondes terrestre et céleste. L'argument central se joue au niveau des mouvements considérés

13. « Les entités ne doivent pas être multipliées par-delà ce qui est nécessaire », également connu sous le nom de rasoir d'Ockham.

14. voire par exemple le chapitre « Le Ciel et la Terre » de (Vigoureux, 2003). « [...] cette distinction de deux mondes, céleste et terrestre, complètement disjoints, irréductibles l'un à l'autre, dépasse largement la seule question de la représentation du Ciel ou de l'explication des causes du mouvement. Elle constitue une base culturelle essentielle de la vision que chacun a de lui-même et du monde. » (Vigoureux, 2003) p.79

comme naturels, c'est-à-dire ayant lieu par eux-mêmes. Il s'agit sur Terre de mouvements verticaux, la chute, 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. 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 Feu.

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'Air¹⁵.

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 mondes terrestre et céleste s'est maintenue jusqu'au moyen âge, 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

15. Ces exemples sont repris de (Lindemann, 1999).

l'on a admis que les mouvements célestes et les mouvements sublunaires dépendaient d'une même Mécanique. » (Duhem, 1906) cité par (Jammer, 1957) p.53

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.

Après avoir présenté le contexte historique de la dualité Terre Ciel, il est donc également nécessaire d'amener les premiers arguments de sa remise en question. Sans reprendre la genèse complète de l'idée d'unité, il est possible de se restreindre aux éléments majeurs remettant en question cette distinction. 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).
- La fait que plusieurs centres de révolution soient effectivement possible avec la découverte des satellites de Jupiter, donnant du crédit au point de vue héliocentrique (Galilée).
- 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).
- La disparition d'une étoile (explosion d'une supernova), remettant en question l'immuabilité du monde céleste (Tycho Brahe).
- L'observation de montagnes et de vallées sur la Lune, la rapprochant du monde terrestre (Galilée).
- L'observation de tâches sur le Soleil, remettant en cause son caractère parfait (Galilée).

Le problème de Newton

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 système héliocentrique, les mouvements naturels des objets sur Terre et des astres, chute verticale et révolution, restent distincts.

Cela pose alors 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 d'amener 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 mouvements, il faut d'abord disposer d'une manière suffisamment précise et efficace d'analyser le mouvement. C'est ce que vont permettre les lois de mouvement de la dynamique newtonienne.

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

Une fois le contexte, le problème, et le cadre théorique posés, il s'agit d'analyser séparément les deux types de mouvement dont on cherche à montrer l'unification. Il faut pour cela avoir à disposition les éléments expérimentaux à la base de leur description.

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, indépendante de la masse de l'objet.

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, $T^2 = Cr^3$, relation permettant d'arriver à la loi en $1/r^2$.

En considérant le recoupement des différents éléments nécessaires, ces derniers constituent le plan de la première partie de la séquence sur la gravitation, 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)

Une fois tous les éléments réunis, le problème peut être posé, et la construction de la théorie peut commencer.

4.3.4 Inspiration et écarts avec la présentation de Newton

Les grandes lignes de l'argumentation de Newton, exposées précédemment, ont servi de base à la conception de la séquence. 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 rappeler la logique de la démarche de Newton.

Résumé de la logique de l'exposition

Le première étape est l'analyse du mouvement de révolution des astres, décrit par les lois de Kepler, à partir des lois du mouvement. Il obtient une force centripète variant avec la distance au centre comme $1/r^2$.

Ce raisonnement peut également s'appliquer également aux satellites de Jupiter et de Saturne.

D'une façon un peu plus compliquée, Newton conclut d'après les petites variations de l'orbite de la Lune que la force centripète s'exerçant sur elle varie également en $1/r^2$.

En faisant l'hypothèse que cette force 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 centripète s'exerçant sur les astres à la force de gravité terrestre.

La considération des caractéristiques des deux forces qui viennent d'être unifiées permet d'obtenir la formule quantitative générale de la force de gravitation. La dépendance en $1/r^2$ vient de la force centripète s'exerçant sur les astres, la présence de la masse vient du poids sur Terre, et la présence des deux masses est due aux principes 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 Poincaré¹⁶.

Pour des raisons à la fois épistémologiques et didactiques (cf. 3.2.2 p. 74 & 3.2.3 p.81) les critiques du XIXe siècle ont été prises en compte dans la présentation de la dynamique proposée ici. Il a été choisi 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. En effet, dans le cadre d'une première présentation du sujet à des élèves, cette hypothèse - à l'échelle du système solaire - peut difficilement être reliée à l'expérience.

Les lois du mouvement nécessitent d'identifier le lien entre masse et accélération, l'accélération dépendant du référentiel. Dans le référentiel héliocentrique, il est impossible d'avoir accès aux masses des planètes sans la théorie de la gravitation, or elle-même nécessite les lois du mouvement pour être construite. Ainsi le lien entre masse et accélération ne peut être expérimenté que sur Terre, et donc pour le référentiel terrestre. La volonté d'une construction progressive et justifiée incite alors plutôt à suivre cette voie, plutôt que celle d'une définition dans l'espace absolu, qui se particularise (de manière assez imprécise) au cas de la Terre.

L'introduction de la notion de « circonstances physiques » associées à une accélération, permet une autre approche pour l'extrapolation des lois du mouvement, via une autre formulation d'un référentiel galiléen. Celui-ci a été défini comme un référentiel *où les accélérations observées peuvent être reliées aux circonstances physiques, et non au mouvement du référentiel dans lequel elles sont déterminées relativement à un autre.*

Ainsi, plutôt qu'être postulé, 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, la présence d'un astre au centre de la trajectoire, dans la direction du vecteur accélération - alors par analogie avec le

16. Leur critique sont directement en lien avec les problèmes de fondements de la dynamique abordés dans le chapitre précédent, section 3.2.1 p.70. Par ailleurs, l'impossibilité de l'espace absolu, et les problèmes que posent cette impossibilité, sont également l'une des origines principales de la théorie de la relativité.

référentiel terrestre, il est légitime d'extrapoler la manière de caractériser les circonstances physiques utilisée sur Terre, via les lois du mouvement. 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 de la séquence, 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 pour ces mouvements.

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 la formule 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 compliquée.

Cette formule est cependant nécessaire pour passer de la troisième loi de Kepler, $T^2 = Cr^3$, à la proportionnalité en $1/r^2$ de l'accélération centripète (voir p.135), 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 de $a = v^2/r$ peut se faire de façon beaucoup plus simple, géométriquement, en utilisant le théorème de Thalès (cf. première de l'annexe D p.363).

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, car elles ne sont par

conséquent pas directement utiles dans le cheminement. 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.

Par principe de parcimonie, les deux premières lois de Kepler peuvent être restreintes à une compréhension intuitive, dans un langage simple, économisant ainsi les difficultés potentielles liés à l'introduction de la définition formelle de l'ellipse, et à l'explication de la loi des aires. 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.

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.

L'analogie avec les satellites de Jupiter

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. Ayant même direction, il est légitime et simple de comparer leur valeur.

Par ailleurs il est très simple d'obtenir la valeur de l'accélération de la Lune dans la mesure où l'on a démontré l'expression 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 très 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 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. Cependant son évocation rapide reste cependant intéressante, appuyant la généralité des lois de Kepler, et ainsi la crédibilité de l'analogie pour la Lune.

4.3.5 Comparaison à d'autres séquences d'enseignement

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 and Teyssandier (1983), Giancoli (1993), Lindemann (1999), Hecht (2003), Vigoureux (2003), Séguin et al. (2010) et Develaki (2012). Ces cours manifestent également une volonté de reconstruction progressive et argumentée de la théorie - en opposition aux présentations déclaratives - et certaines d'entre elles ont constitué une inspiration forte pour l'orientation de cette recherche. Le désaccord avec certains points a par ailleurs été une motivation pour approfondir le sujet et développer d'autres propositions.

Ces séquences introduisant la théorie de la gravitation viennent de sources de différentes natures.

- (Giancoli, 1993), (Hecht, 2003) et (Séguin et al., 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 and 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*.

Une analyse détaillée de chacune de ces présentations a été effectuée, mais ne sera pas reprise ici exhaustivement, pour aller directement à l'essentiel. Seuls seront présentés

les aspects permettant de situer les choix faits pour la séquence, qu'ils reprennent ou qu'ils soient en opposition avec ceux faits dans les différentes séquences ci-dessus.

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 and 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 principe de parcimonie, 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, $T^2 = Cr^3$, contraignant la formule générale de l'accélération centripète, $a = v^2/r$.

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 décrits, 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)
(emphase ajoutée)

De même dans (Penot and 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'écarter 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 and Teyssandier (1983) (p.12) (emphase ajoutée)

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

Le poids identifié dès le départ à la force gravitationnelle

Dans la plupart des présentations analysées (Hecht, 2003; Séguin et al., 2010; Lindemann, 1999; Giancoli, 1993; Penot and 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 and 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 and Teyssandier, 1983) (p.6)

Ou encore dans (Séguin et al., 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 » (Séguin et al., 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 la formule 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 sera *au départ* restreinte à la force associée à la chute, sans anticiper de lien avec la notion de force gravitationnelle. Celle 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.

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 la formule de la force de gravitation, après avoir traité diverses autres applications. En particulier, le calcul classique consiste à utiliser la formule 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 la formule 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 restera fidèle à l'ordre présenté par Newton sur ce point, 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 Séguin et al. (2010) et Develaki (2012), qui est également évoqué par Vigoureux (2003) et Penot and Teyssandier (1983) (mais uniquement au discours indirect).

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 (synthétisée p.141), pour laquelle Newton prend soin d'anticiper la critique qu'une telle attraction entre deux corps terrestres n'a 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; Séguin et al., 2010; Lindemann, 1999; Giancoli, 1993; Penot and Teyssandier, 1983; Develaki, 2012), aucune d'entre elles 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.

« Nor could the equation/law of universal attraction, [...] be inferred simply from the empirical data available and the measurements possible in those days. » Develaki (2012)

La discussion de la légitimité de l'extrapolation de la force gravitationnelle à tous les corps sera abordée dans l'approche proposée. Elle constitue un passage nécessaire entre le point d'aboutissement du cheminement présenté (la formule 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.

Le statut des aspects épistémologiques dans la séquence

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 la formule 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 (cf. 2.4.1 p.33), et le fait que la théorie construite implique une unification, incarne le rôle et la valeur des mises en relation en physique (cf. 2.4.2 p.38).

4.3.6 Présentation de la séquence d'enseignement de la gravitation

Dans la section 4.3.3 (p.142) ont été vus les éléments préalables nécessaires pour la construction de la théorie de la gravitation. Le plan de la première partie, intitulée, « La compréhension du monde avant Newton » avait alors été donné (p.146). Après avoir introduit le contexte de la distinction entre mondes terrestre et céleste, ses remises en question ont été abordées, menant au problème de Newton :

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 ?

Ce problème permet de situer et motiver l'étude allant mener à la force de gravitation¹⁷.

17. cf. la section 2.5.2 p.2.5.2 : *La motivation des élèves et la « problem posing approach »*, ainsi que

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 disposer d'une manière suffisamment précise d'analyser le mouvement. 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 (p. 148). 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).

Les étapes de la séquence

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 (de manière géométrique, cf. la première page de l'annexe D p.363). Est obtenue alors 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.

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 va-

- d'un point de vue épistémologique - la phrase de Bachelard : « Toute connaissance est une réponse à une question » (Bachelard 1938).

lable pour les satellites de Jupiter, un calcul directement analogue au précédent permet d'obtenir la dépendance de l'accélération en $1/r^2$.

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 .

$$a_L = \frac{v^2}{r_L}, \quad v_L = \frac{2\pi r_L}{T_L}, \quad a_L = 2,7 \cdot 10^{-3} m/s^2$$

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 (cf. paragraphe *L'analogie avec les satellites de Jupiter* p.150).

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 au sens de Newton 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.

5) Quelles sont les circonstances physiques associées à ces accélérations ?

L'établissement de la formule 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, quelle que soit les types de matériau. 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 $F_{\text{Terre/corps}}$.

- 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 : $a \propto 1/r^2$. Il s'agit donc d'une circonstance physique essentielle associée à ces accélérations. Avec la définition quantitative de la grandeur force $F = ma$, on a donc :

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

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

Pour le cas de la chute libre, $\vec{P} = m\vec{g} \propto m$, puisque \vec{g} ne dépend pas de 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 :

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

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

D'après la troisième loi, 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 :

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

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

7) 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 est à la fois de même nature :

- 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, puisque toutes ces accélérations sont finalement des cas particuliers d'un même type de phénomène.

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 qui n'a - à l'époque de Newton - jamais été observée sur Terre en tant que tel. 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.

8) Interprétation

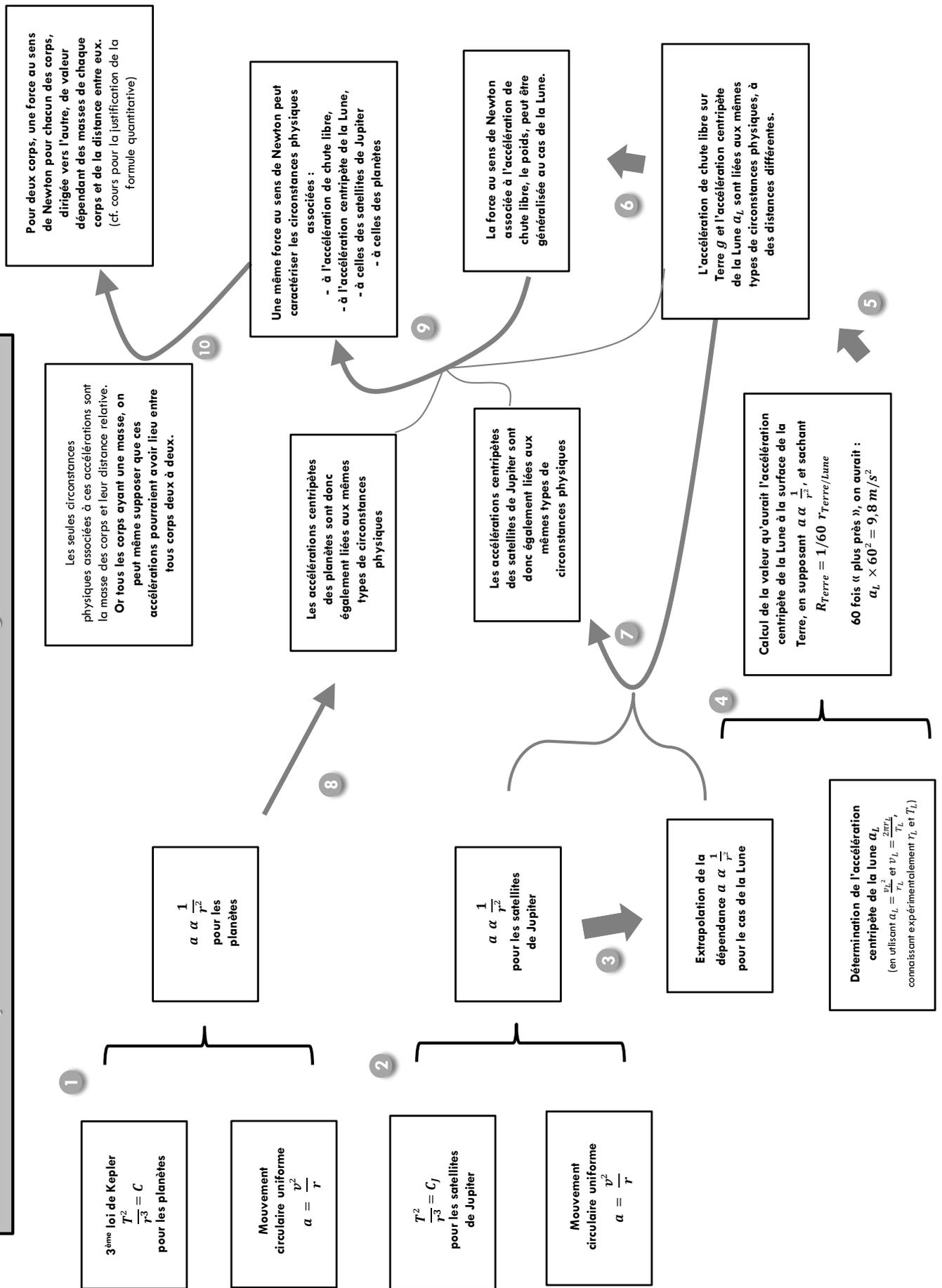
La compréhension du caractère révolutionnaire de la conclusion obtenue demande de replacer celle-ci dans le contexte historique, celui de la distinction entre mondes terrestre et céleste. Bien que cette remise en question ait été pensée avant la théorie newtonienne, aucun argument décisif permettant de relier explicitement les deux mondes n'avait été énoncé. La théorie de Newton acte pour la première fois leur unification, de manière irréversible.

Le système du monde peut donc 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.

Un schéma de synthèse

De même que pour la partie dynamique, un schéma de synthèse du cheminement a été réalisé, conçu en premier lieu comme support à une activité. Celui-ci (cf. figure suivante) permet ici de résumer les étapes présentées ci-dessus.

Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle



4.3.7 Une motivation globale : la justification de l'héliocentrisme

On a vu que l'étude de la dynamique était motivée par la volonté d'obtenir une description du mouvement suffisamment précise, dans le but de pouvoir traiter le problème du lien entre les mouvements terrestres et célestes. La motivation pour aborder cette question, allant mené à la théorie de la gravitation, est justifiée par l'étude du contexte historique antérieur : la distinction Terre Ciel et ses remises en question.

En amont de ces considérations, un élément supplémentaire a été ajouté afin d'introduire et de motiver l'intérêt pour ce sujet dans son ensemble¹⁸. Il s'agit du questionnement de la légitimité de la représentation héliocentrique du système solaire.

Ce questionnement est amené par la présentation du modèle de Tycho Brahe, postérieur à celui de Copernic, système hybride où le Soleil tourne autour de la Terre, et les planètes tournent autour du Soleil (figure 4.3.1).

L'objectif est ensuite de montrer la légitimité d'un tel modèle, en mettant en évidence la dépendance de la description du mouvement au référentiel choisi. Le logiciel d'astronomie Celestia est utilisé dans cette optique. Celui-ci permet la navigation dans le système solaire et l'observation des mouvements des astres en choisissant le système de référence. Les outils utilisés sont uniquement l'accélération du temps, de façon à pouvoir observer les mouvements à notre échelle de temps, et le changement de point fixe, de façon à changer de référentiel.

Sont présentées successivement deux situations. La première est l'observation du mouvement des planètes avec le Soleil comme référence fixe : on visualise alors les mouvements tels que dans le modèle héliocentrique (en temps accéléré). Ensuite, en gardant le même angle de vue, on revient au temps réel, immobilisant ainsi les planètes. On change alors de référentiel en prenant la Terre comme fixe, puis on accélère le temps à nouveau. Se dessine ainsi des trajectoires très ressemblantes de celles des modèles géocentriques, à celles du modèle de Tycho Brahe.

La spécificité intéressante est de pouvoir observer les astres à la fois en mouvement et à distance, plutôt que depuis la surface de la Terre. Cela procure à cette visualisation

18. Cette intention correspond l'état d'esprit de la « problem-posing approach » revendiquée par Klaassen (1995) (cf. section page) : « Another essential ingredient of a problem-posing approach is that [the student's] process [of science learning] is provided, at appropriate stages, with a global point, e.g. by making them see a connection with existing interests, or by bringing them in such a position that they themselves come to pose a main problem that they intend to work on. A global point is to induce a (more or less precise) outlook on the direction that their process of science learning will take, and thus to increase their involvement in the further development of the process with respect to content. » (Klaassen, 1995)

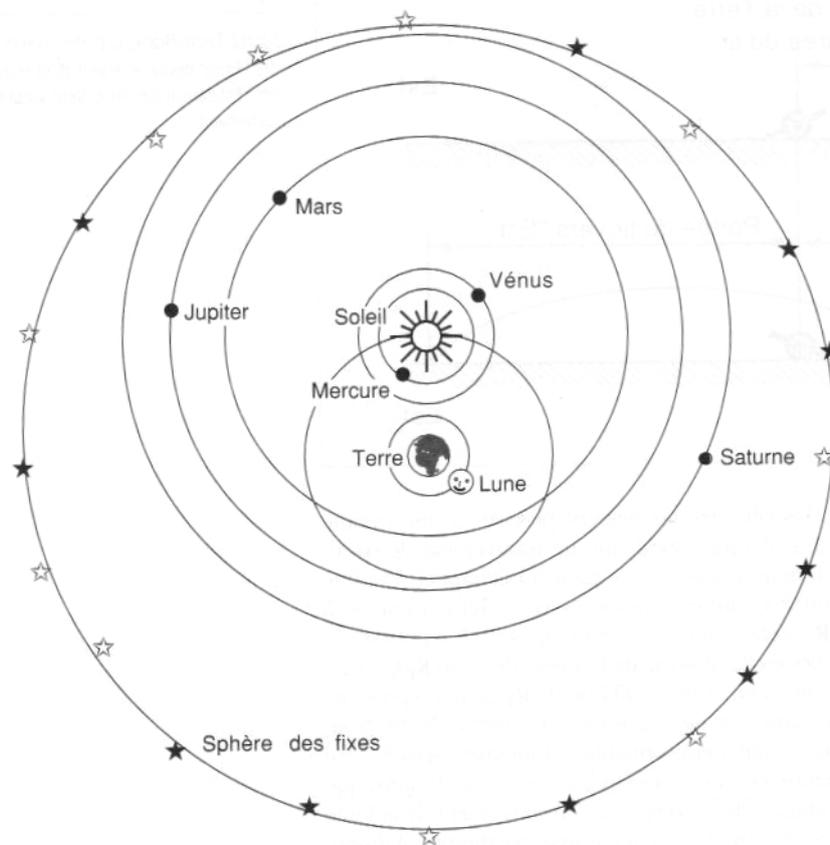


FIGURE 4.3.1 – Système de Tycho Brahe (extrait de (Lindemann, 1999))

une plus grande impression d'objectivité, relativement aux observations terrestres familières, que l'on concède plus volontiers de notre point de vue particulier, en tant qu'« apparences ».

La question qui se pose alors est celle des raisons qui font privilégier le modèle héliocentrique, si d'après ces observations il est équivalent au modèle géocentrique par simple changement de référentiel.

Cette équivalence a pour but de déstabiliser les élèves, pour qui il s'agit en général d'une certitude très ancrée. Sa remise en question amène à réfléchir sur les arguments qui pourraient permettre de justifier cette idée, en l'absence desquels elle n'aurait que le statut de croyance.

A ce stade, il est déclaré que l'argument décisif pour l'héliocentrisme allait venir de la théorie de la gravitation¹⁹, donnant ainsi une motivation pour s'intéresser à celle-ci.

Retour sur la question de l'héliocentrisme à la fin de la séquence

Par cohérence avec l'introduction proposée, il s'agit de revenir à cette question une fois le cheminement historique exposé. Une considération épistémologique est alors présentée et discutée explicitement : celle de l'importance des mises en relation qu'une théorie physique permet de révéler²⁰ (cf. section 2.4.2 p.38). Ce point de vue permet de donner un critère pour comparer différentes théories :

« Une théorie physique, avons-nous dit, est d'autant plus vraie, qu'elle met en évidence plus de rapports vrais. [...] si l'une nous révèle des rapports vrais que l'autre nous dissimule, on pourra néanmoins la regarder comme physiquement plus vraie que l'autre, puisqu'elle a un contenu plus riche. »
(Poincaré, 1905, p.272)

Dans cette perspective, le modèle héliocentrique peut être considéré comme *plus vrai*, dans la mesure où il permet l'élaboration de la théorie de la gravitation, établissant un rapport explicite entre phénomènes terrestres et célestes, un tel lien n'étant pas visible dans le modèle de Tycho Brahe.

19. « It should be pointed out unambiguously that physicists prefer the heliocentric model because it is consistent with the mechanistic explanation of the planetary motions—gravitational force—and it leads to a much simpler formulation of that explanation. The historical development and its implication may be ignored in astronomy education, which results in that people accept either one of the theories by rote memory or following authority. » (Shen and Confrey, 2010)

20. notamment synthétisée par Poincaré : « Maintenant qu'est-ce que la science? [...] c'est avant tout une classification, une façon de rapprocher des faits que les apparences séparaient, bien qu'ils fussent liés par quelque parenté naturelle et cachée. La science, en d'autres termes, est un système de relations. » (Poincaré, 1905, p.265)

4.4 Le cas de l'impesanteur

4.4.1 Rappel du contexte

Le problème d'apprentissage central visé dans cette étude est celui de la distinction entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace. Il se manifeste par les idées, très répandues chez les élèves, 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.

La première piste développée consistait à reconstruire un cheminement historique menant à l'unification entre phénomènes terrestre et céleste, dans le but de rendre explicite les arguments justifiant que la force de gravité s'applique effectivement au delà de la Terre, et qu'elle n'est pas liée à la présence de l'air.

La seconde piste développée, distincte et complémentaire, consiste à considérer en détail le cas de l'impesanteur, dans le but de mettre en évidence la compatibilité entre l'image de l'astronaute en flottement et la présence d'une force de gravitation ²¹.

D'un point de vue conceptuel, l'objectif est de **passer de la notion d'impesanteur associée à une absence de gravité, à la compréhension du lien entre l'impesanteur et le référentiel d'étude du mouvement.**

Un problème a été conçu pour aborder cette idée, en partenariat avec Thomas Berger, stagiaire au LDAR durant l'été 2014. Le but de ce problème est la réalisation d'un appartement dans lequel on soit en impesanteur.

4.4.2 Les étapes du problème proposé

La précision du vocabulaire

Une première étape nécessaire concerne la mise au point sur le sens du vocabulaire utilisé, en premier lieu relativement à l'existence des deux termes, apesanteur et impesanteur. Ceux-ci sont considérés comme synonymes, mais le second est retenu simple-

21. Cela rejoint en particulier l'intention exprimée et approfondie par Launer (2014) : « Les images d'astronautes qui « flottent » librement dans leur habitacle, appuyées de commentaires plus ou moins éclairés, défient les lois de la gravitation... La parole du professeur de physique affirmant, conformément au programme, que « La gravitation gouverne tout l'Univers » ne pèse pas lourd face à l'évidence visuelle. Ne pas aborder l'impesanteur avec nos élèves, c'est laisser les médias contredire, à chaque évocation du phénomène, le fait que la gravitation est universelle. C'est laisser planer l'idée que la gravité peut disparaître, quoi qu'ait pu en dire Newton. » (Launer, 2014)

ment pour des raisons phonétiques, comme le mentionne la note d'un arrêté relatif à la terminologie des sciences et techniques spatiales de 1995.

« impesanteur, n.f [...] : État d'un corps tel que l'ensemble des forces gravitationnelles et inertielles auxquelles il est soumis possède une résultante et un moment résultant nuls. Note : Le terme apesanteur est déconseillé pour éviter, dans le langage parlé, une confusion entre l'apesanteur et la pesanteur » cité dans (Launer, 2014)²²

Plutôt qu'une telle définition théorique, celle choisie ici sera phénoménologique, basée sur le sens courant du terme de pesanteur. Celui-ci désigne le fait que les objets tombent au sol (la chute libre), et le fait qu'ils appuient sur le support sur lequel ils sont posés (ou qui les retient) ou qu'ils le déforment. Le terme d'impesanteur est alors pris comme désignant l'absence de ces phénomènes : **le fait que les objets ne tombent pas, « flottent », n'appuient pas sur un support, ni ne le déforment.**

Le problème global

Le problème proposé est le suivant : **est-ce possible de construire un appartement dans une tour sur Terre dans lequel on soit en impesanteur ? Si oui, comment ?**

Le but est de réfléchir sur la possibilité d'une telle idée d'un point de vue théorique, sans s'occuper des questions de faisabilité technique. Une façon de mettre en scène le problème pour amener ce point de vue est de proposer aux élèves d'imaginer être une équipe d'ingénieurs, face à une telle demande, de la part d'un multimilliardaire. Le budget du projet est considéré comme illimité (de même que la prime de l'équipe si elle parvient à trouver une solution).

Discussion du cas d'une tour dépassant l'atmosphère

Une proposition possible est celle d'une tour plus haute que l'atmosphère, par exemple à 500 km de haut, soit au delà de l'altitude de la station spatiale ISS (budget illimité). La présence d'impesanteur dans cette situation peut être justifiée par l'analogie avec

22. « Arrêté du 20 février 1995 relatif à la terminologie des sciences et techniques spatiales (version consolidée au 29 mars 1995) : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000187248> Version en vigueur au 17 mars 2014. » (Launer, 2014)

l'intérieur de la station spatiale, l'absence d'air, ou par la distance au sol, suffisamment grande pour que la gravité soit négligeable.

Cette proposition peut être faite par les élèves, ou bien peut leur être amenée. Son intérêt est de mettre en œuvre la conclusion du cheminement exposé auparavant : l'universalité de la force de gravitation, et son indépendance à la présence de l'air. Le raisonnement correct attendu - ou présenté - est alors le suivant : puisque l'accélération de chute libre sur Terre est de même nature que l'accélération centripète de la Lune, elle devrait s'observer à toutes les altitudes entre les deux, et donc encore au delà de l'atmosphère. Ou encore : puisque la force de gravitation est valable à la fois sur Terre et pour la Lune, il y a une accélération liée à cette force dirigée vers le centre de la Terre, même au delà de l'atmosphère. Donc du haut d'une tour dépassant l'atmosphère, si on lâche un objet, il va tomber vers la Terre.

Cette situation permet également d'amener le premier élément allant permettre de résoudre le problème.

Premier élément : la rotation de la Terre et la déviation vers l'Est

Une information supplémentaire est alors apportée : le fait que du haut d'une tour (exemple la tour Eiffel), un objet ne tombe pas tout à fait à son aplomb (environ 2 cm d'écart pour la chute d'une bille du haut de la tour Eiffel). L'explication peut alors être demandée aux élèves pour les faire réfléchir sur cette observation. Pour les mettre sur la voie, il peut être rappelé que dans un système en rotation (un manège par exemple), plus on s'éloigne de l'axe de rotation, plus la vitesse est grande.

Le phénomène de déviation vers l'Est peut alors être expliqué, en le reliant à la rotation de la Terre. Plus on s'éloigne du sol, et donc de l'axe de rotation, plus la vitesse communiquée au moment du lâcher, en haut de la tour, est grande. L'objet prend donc d'autant plus « d'avance » par rapport au sol, puisque sa vitesse horizontale est plus grande que celle du sol. La rotation de la Terre s'effectuant d'Ouest en Est, il s'agit d'une déviation vers l'Est relativement à la trajectoire verticale.

Les seuls lieux non affectés par cette déviation sont les pôles, situés dans l'axe de rotation. Cette remarque est l'occasion d'une question subsidiaire : *pour un appartement dans une tour au pôle, à une hauteur d'un rayon terrestre, quelle serait la valeur de l'accélération de chute libre ?*

La considération de la décroissance en $1/r^2$ suffit y pour répondre. Deux fois plus loin qu'à la surface de la terre, l'accélération est donc divisée par quatre, soit environ

$2,5 \text{ m/s}^2$. Ainsi un objet lâché dans un appartement en haut d'une tour de 6400 km au Pôle Nord, tombe également en chute libre, mais plus lentement. Ce constat permet de montrer explicitement que la valeur de l'accélération gravitationnelle n'est pas du tout négligeable, même aussi loin de la Terre.

Deuxième élément : plusieurs mouvements pour un même vecteur accélération

Le constat précédent conduit à la question suivante : *si à n'importe quelle altitude on a une accélération gravitationnelle vers le centre, même dans l'espace. Comment se fait-il qu'il puisse y avoir des mouvements de révolution circulaire (comme ceux des satellites) ?*

Est alors introduit l'importance de la vitesse initiale : une trajectoire est déterminée par le vecteur accélération **et** le vecteur vitesse initiale. Cela est mis en évidence en considérant l'exemple d'un objet lancé horizontalement. Plus la vitesse à laquelle il est lancé est grande, plus il retombe loin. Si on l'envoie suffisamment loin relativement à la courbure de la Terre (cf. figure 4.4.1), on ne peut plus considérer qu'elle se déplace dans un champ gravitationnel uniforme et parallèle (la force de gravitation étant dirigée vers le centre de la Terre). La trajectoire théorique dans ce cas (en l'absence d'air) n'est alors plus une parabole mais une ellipse, dont un des foyers est le centre de la Terre. Il s'agit en effet d'une situation analogue au cas des planètes autour du soleil (ou des satellites de Jupiter), où on considère le mouvement d'un « petit » corps dans le référentiel d'un autre beaucoup plus massif. Comme énoncé dans les lois de Kepler, le petit corps a une trajectoire elliptique dont le plus gros est un des foyers. Ainsi, de la même façon que pour les planètes, la trajectoire que fait l'objet est une ellipse, mais elle vient rencontrer la surface de la Terre avant de pouvoir compléter sa révolution. L'objet vient donc percuter la surface de la Terre, c'est ce qu'on appelle une chute. S'il pouvait arriver que l'ellipse entoure la Terre sans la toucher, l'objet deviendrait alors un satellite de la Terre.

En conclusion, **le mouvement dépend :**

- **de l'accélération, liée à la présence de la Terre ($a = GM_{Terre}/R^2$),**
- **de la vitesse initiale.**

Troisième élément : comment interpréter l'impesanteur ?

Les deux premiers éléments étant introduits, il s'agit de revenir au problème de départ : comment construire un appartement dans une tour sur Terre dans laquelle on puisse

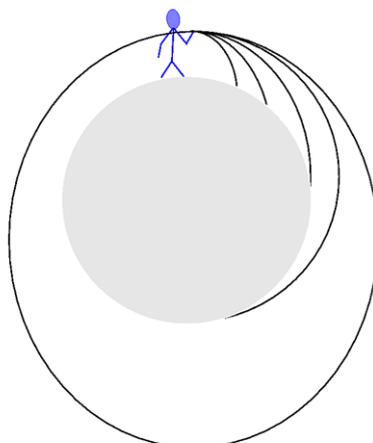


FIGURE 4.4.1 – De la chute au sol à la révolution

être en impesanteur ? Cette question demande de réfléchir sur les situations où s'observe ce phénomène de « flottement ». Une manière de l'aborder est de mettre en avant le fait que l'accélération de chute libre ne dépend pas de la masse. Cela implique que si l'on se laisse tomber du haut d'une tour avec des petits objets, puisque chacun aura la même vitesse initiale, et que l'accélération sera la même pour tous (ne dépendant pas de la masse, et dans la mesure où on néglige l'influence de l'air), alors notre mouvement et celui de chacun des objets seront identiques. De notre point de vue, pendant le temps de la chute, relativement aux objets « en flottement » à côté de nous, nous serions en impesanteur.

Ce raisonnement peut être étendu au cas d'un avion en vol parabolique et d'une station spatiale en orbite. Dans l'une ou l'autre de ces navettes, le mouvement correspond à un mouvement dépendant uniquement de l'accélération gravitationnelle (artificiellement pour le vol parabolique). L'accélération étant la même pour la personne à l'intérieur (puisque'elle ne dépend pas de la masse), ainsi que la vitesse initiale (puisque'elle est à l'intérieur), le mouvement est le même pour le contenu comme le contenant, qui « flotte » donc à l'intérieur.

En conclusion, on peut dire qu'**on est en impesanteur relativement à un système, lorsqu'on est immobile, en « flottement », par rapport à celui-ci, et donc que relativement à un autre référentiel, on a le même mouvement que ce système.**

Démarche de résolution

L'objectif est d'être en impesanteur dans un appartement dans une tour. Il faut donc avoir le même mouvement que la tour, c'est-à-dire un mouvement circulaire uniforme dans le référentiel géocentrique, étant donné la rotation de la Terre.

Le mouvement d'un objet lâché du haut de la tour, à une certaine hauteur h , dépend :

- de l'accélération : l'accélération gravitationnelle à cette hauteur $a = GM_{Terre}/r^2$ (où $r = R_{Terre} + h$)
- de la vitesse initiale.

L'idée pour la résolution est alors la suivante : utiliser la rotation de la Terre pour fournir une vitesse initiale à l'objet. En se plaçant à l'équateur, où on est perpendiculaire à l'axe de rotation, la vitesse sera proportionnelle à la hauteur (cf. déviation vers l'Est). On peut donc choisir la vitesse en fonction de la hauteur : plus on monte haut, plus la vitesse sera grande.

Pour une distance donnée r au centre de la Terre, quelle serait la vitesse initiale à fournir à l'objet pour que son mouvement soit circulaire uniforme ? Si l'objet a un mouvement circulaire uniforme alors mathématiquement on sait que son accélération est reliée à sa vitesse v et son rayon par $a = v^2/r$. Donc pour une distance r , avec l'accélération $a = GM_{Terre}/r^2$, pour que le mouvement soit circulaire uniforme, il faut que la vitesse soit telle que

$$\frac{GM_{Terre}}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

Or sur la tour, on peut choisir l'altitude h , et donc $r = R_{Terre} + h$, pour avoir la vitesse voulue, $v = \frac{2\pi r}{T}$. Ces deux équations permettent ainsi de déterminer r , et donc h .

Le calcul donne $r = 42200 \text{ km}$, et donc $h = 35800 \text{ km}$. En conclusion, dans un appartement construit au niveau de l'équateur, en haut d'une tour de 35800 km , soit environ trois diamètres terrestres, on pourrait théoriquement être en impesanteur.

Comparaison avec la même tour au Pôle Nord

Une question supplémentaire consiste à comparer avec une tour de la même hauteur construite au Pôle Nord (par exemple). De même que dans le cas d'une tour d'un rayon terrestre au pôle (vu précédemment), en l'absence de vitesse initiale relativement au sol, un objet lâché dans un appartement au haut de cette tour tomberait au sol.

Dans les deux situations, il s'agit exactement des mêmes circonstances physiques : la même distance à la Terre en dessous, ainsi la force et l'accélération gravitationnelle sont

identiques dans le deux cas. Cela permet de mettre en évidence que l'impesanteur est ici entièrement due à la rotation de la Terre, c'est-à-dire au référentiel dans lequel on observe le mouvement :

- le référentiel géocentrique pour le cas de la tour au Pôle Nord,
- un référentiel en rotation relativement au centre de la Terre pour la tour à l'équateur.

4.5 Synthèse des choix principaux

4.5.1 Des motivations multiples pour la reconstruction de la théorie de la gravitation

L'approche de la gravitation développée s'appuie sur plusieurs types de motivation. Les différentes intentions qui vont être distinguées ici sont à la fois indépendantes, dans leurs objectifs, et liées dans leurs conséquences, c'est-à-dire au niveau des choix qui ont résulté de l'ensemble de ces motivations conjointes.

Une approche complémentaire à celle de la dynamique

L'approche proposée est en premier lieu complémentaire de celle développée pour la dynamique, avec comme enjeu de légitimer l'idée d'une force *exercée par la Terre*, pour l'interprétation de la chute. Il a été en effet mis en avant que l'idée d'attraction terrestre est un aspect particulièrement non évident, à la fois historiquement et pour les élèves (cf. p.68). La force associée, le poids, est cependant omniprésente dans l'enseignement des lois du mouvement, d'où l'importance d'une approche prenant en compte cette difficulté.

La volonté de justifier la notion d'attraction terrestre est liée au positionnement exprimé dans le chapitre 2, sur l'importance de l'explicitation des aspects non évidents pour le sens commun²³ (cf. 2.5.1 p.43). Cette posture exprimait la résolution d'éviter, autant que possible, d'imposer un savoir par argument d'autorité (cf. p.55).

23. « La volonté de ne pas faire passer pour allant de soi certaines choses qui ne sont ni évidentes, ni intuitives, et dont la compréhension demande une certaine justification ou reconstruction, via des arguments explicites. »

Une stratégie face à un problème d'apprentissage majeur

Indépendamment de la dynamique, l'étude des difficultés d'apprentissage des notions associées à la gravitation a mené à formuler un problème central : celui de la distinction entre la façon de considérer les phénomènes sur Terre et dans l'espace²⁴.

La première piste ayant été investie face à ce problème consiste à reconstruire un cheminement historique menant à l'unification entre phénomènes terrestre et céleste. Cela a pour but de rendre explicite le raisonnement permettant d'établir des liens entre phénomènes sur Terre et dans l'espace, remettant ainsi en question la tendance à dissocier les deux.

Ce cheminement permet en particulier de pointer les arguments précis conduisant à associer la chute verticale à une attraction par la Terre, et non à d'autres circonstances, comme la présence de l'air.

La possibilité de mettre en évidence des aspects épistémologiques fondamentaux

La reconstruction d'un cheminement menant à la théorie de la gravitation permet par ailleurs d'illustrer plusieurs aspects épistémologiques ayant été jugés particulièrement importants.

- En premier lieu, l'idée que les concepts et théories physiques soient le résultat d'une construction, articulant réflexions théoriques et expériences (cf. 2.4.1 p.33).
- En particulier, le fait que cette construction émerge d'un problème²⁵ basée sur la considération de certains phénomènes initiaux (cf. « Le problème de Newton » p.145).
- Enfin, l'idée qu'un apport fondamental d'une théorie physique soit les mises en relation qu'elle permet de révéler (cf. 2.4.2 p.38). Le cas de la gravitation permet la première grande unification de la physique, mettant en évidence un lien explicite entre phénomènes terrestre et céleste (cf. p.127).

4.5.2 La présentation explicite du cas de l'impesanteur

La seconde piste développée, distincte et complémentaire du cheminement historique, consiste à considérer en détail le cas de l'impesanteur, dans le but de mettre en évidence

24. 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.

25. « Toute connaissance est une réponse à une question. » (Bachelard, 1938)

la compatibilité entre l'image de l'astronaute « en flottement » et la présence d'une force de gravitation.

La focalisation sur cet aspect est due à son rôle jugé central quant à l'origine de l'idée, chez les élèves, que la gravitation ne s'applique pas dans l'espace.

Le problème proposé de la tour d'impesanteur vise à passer de la notion d'impesanteur associée à une absence de gravité, à la compréhension du lien entre l'impesanteur et le référentiel d'étude du mouvement.

4.5.3 Des motivations pour l'étude de la théorie newtonienne

Parmi les positions générales avancées dans le chapitre 2 figurait l'importance, pour la motivation des élèves, qu'ils puissent comprendre la justification du déroulé logique présenté (cf. 2.5.2 p.44)²⁶. Il était question à la fois de motivation locale, justifiant le passage d'une étape à une autre, et également d'une motivation globale, justifiant l'intérêt pour le sujet abordé. Cette posture a orienté deux choix majeurs pour la structuration de la séquence.

Le problème de Newton comme motivation pour l'étude de la dynamique

En premier lieu, la réflexion sur le mouvement a pu être introduite et motivée comme une étape nécessaire pour avancer sur la question des liens entre la chute sur Terre et la révolution des astres. La recherche de tels liens était elle-même justifiée par les éléments de remise en question de la distinction entre monde céleste et monde terrestre, présenté en amont²⁷.

Une motivation globale pour l'étude de la théorie newtonienne

L'intérêt pour la dynamique est donc justifié à partir de l'intérêt pour la gravitation. Un autre élément a été ajouté dans le but de motiver l'intérêt global pour le thème de la

26. « The emphasis of a problem posing approach is thus 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 and Klaassen, 2004)

27. cf. le problème de Newton p.145 : « 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 ? [...] Puisqu'il s'agit de chercher un lien entre des mouvements, il faut d'abord disposer d'une manière suffisamment précise et efficace d'analyser le mouvement. C'est ce que vont permettre les lois du mouvement de la dynamique newtonienne. »

gravitation lui-même. Il s'agit du questionnement de la légitimité de la représentation héliocentrique du système solaire, par sa comparaison au modèle hybride de Tycho Brahé, et la visualisation du changement de référentiel via une simulation informatique (cf. 4.3.7 p.165).

L'équivalence cinématique visualisée entre les deux points de vue a pour but de déstabiliser les élèves, pour qui l'héliocentrisme est en général une certitude très ancrée. Sa remise en question amène à réfléchir sur les arguments qui pourraient permettre de justifier cette idée.

A ce stade, il est déclaré que l'argument décisif pour l'héliocentrisme allait venir de la théorie de la gravitation, donnant ainsi une motivation pour s'intéresser à celle-ci.

La conclusion de la séquence, revenant sur cette question d'introduction, permet d'insister sur un aspect épistémologique déjà abordé plusieurs fois au cours de la séquence : celui de la valeur accordée aux mises en relation qu'une théorie physique permet de révéler (cf. p.167).

Chapitre 5

Questions de recherche et méthodologie

Dans les deux chapitres précédents, des propositions d'approches de la dynamique et de la gravitation newtonienne ont été développées. Il s'agit de propositions de manières de présenter, de reconstruire et de formuler le contenu de ces théories. Les motivations et justifications pour ces approches ont articulé des éléments de différentes natures :

- la considération de certains problèmes d'apprentissage,
- des analyses épistémologiques et historiques du contenu,
- des positionnements généraux relativement à la didactique et l'épistémologie.

Un processus de développement itératif

En plus de ces justifications théoriques, les propositions présentées ont été retravaillées ou ajustées via plusieurs stades d'expérimentation intermédiaire, au cours du processus de conception ¹.

Deux principales expérimentations ont été effectuées. La première dans le cadre d'un mémoire de recherche de Master 2, précédant ce travail de thèse (Maron, 2012). Celui-ci

1. Une telle démarche itérative, courante lors du développement d'une approche d'enseignement, est notamment revendiquée dans le « Model of Educationnal Reconstruction » : « Of course, this process starts from a preliminary analysis of content structure, which includes a first attempt at clarification of subject matter content structure, identification of the elementary (key) concepts, and an examination of their educational significance. In an iterative process following the preliminary analysis, the content structure is further elaborated. » (Duit et al., 1997) L'importance de l'interaction entre la réflexion théorique et des expérimentations intermédiaires est également présente dans le cadre américain de « Design-Based Research » : « We define design-based research as a systematic but flexible methodology aimed to improve educational practices through iterative analysis, design, development, and implementation [...]. » (Wang and Hannafin, 2005)

portait sur l'enseignement de la théorie de la gravitation, mais sans approfondir son lien avec la dynamique. La séquence conçue a été expérimentée avec une classe de Terminale S.

La seconde expérimentation a eu lieu avec des étudiants de première année d'université (inscrits dans une filière scientifique). Douze entretiens individuels ont été conduits, afin d'évaluer une première version de l'approche de la dynamique, basée sur le lien entre mouvement naturel et force, et leur évolution². Une présentation de cette première version, ainsi que de la méthodologie utilisée, est présentée dans (Maron and Colin, 2014).

Ces deux travaux intermédiaires - (Maron, 2012) et (Maron and Colin, 2014) - ne seront pas repris ici, étant donné leur obsolescence.

La nécessité d'activités

Les étapes de chacune des approches proposées ont été détaillées dans les chapitres 3 et 4. Il s'agit maintenant de questionner leur compréhension par les élèves, ainsi que leur efficacité relativement aux problèmes d'apprentissage visés, en explicitant précisément en amont les *types* de compréhension et d'efficacité recherchés.

Cependant les approches proposées sont jusqu'ici uniquement des propositions de *présentation* du contenu. Or c'est un fait globalement consensuel qu'une présentation essentiellement expositive nécessite d'être complétée par des activités permettant de s'approprier son contenu. De telles activités ont été conçues, avec en tête l'intention de pouvoir utiliser les productions d'élèves pour avoir un retour sur la séquence proposée, selon différents axes de questions de recherche qui vont être définis ci-dessous.

Ainsi les activités développées jouent un double rôle, elles sont d'une part nécessaires pour que les élèves puissent prendre du recul sur la présentation, afin de favoriser son assimilation, et d'autre part les résultats de ces activités seront utilisées pour évaluer l'ensemble de la séquence. Il s'agira donc d'une évaluation commune du cours *et* des activités. Ces deux aspects resteront indissociables, dans la mesure où l'appropriation du cours ne peut pas faire l'économie des activités, et que les activités n'auraient pas de sens sans le cours.

2. Il s'agit de la première idée développée dans le chapitre 3, antérieure à la réflexion sur la notion de d'explication, relativement au problème de l'ambiguïté entre causalité et chronologie. Le terme de cause était encore utilisé à ce stade pour la définition de la force.

Une étape dans un processus itératif de développement

Le stade auquel la séquence est présentée dans ce travail, cours et activités, représente une étape dans le processus de développement. L'ensemble de retours qui vont être obtenus lors de l'expérimentation permettra à nouveau de questionner, modifier ou affiner les différents aspects utilisés, autant pour la présentation du contenu que pour la conception des activités.

5.1 Questions de recherche

Deux des questions de recherche, à propos de la compréhension et de la perception des approches proposées, sont relativement simples à formuler. Une autre plus spécifique fait le lien avec l'hypothèse générale ayant orienté la conception de la séquence sur l'explicitation d'aspects non évidents.

Compréhension de la logique globale du cours

En amont de l'efficacité relativement aux problèmes d'apprentissage visés, une première question de recherche concerne l'accessibilité de la séquence conçue. Elle peut être énoncée ainsi :

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 proposée ? (QR1)

Justification des aspects non évidents

La seconde question de recherche concerne « l'efficacité » de la séquence. Dans le chapitre 2, cette notion a été définie de manière générale par la *capacité à permettre l'appropriation d'un certain contenu*. Une hypothèse centrale avait alors été retenue :

Le degré d'efficacité d'une séquence d'enseignement est reliée de manière significative à l'explicitation plus ou moins forte d'aspects non évidents pour le sens commun.

Cette posture a fortement orienté la démarche de conception - la formulation des problèmes d'apprentissage visés, ainsi que les propositions de solution - en soulignant l'importance

- de *détecter* autant que possible les aspects du contenu potentiellement non évidents pour le sens commun,
- de chercher des moyens pour *explicitier* le plus possible ces aspects.

Ce travail ayant été effectué, il s'agit désormais d'évaluer dans quelle mesure les solutions proposées - incarnant cette intention d'explicitation - permettent effectivement de favoriser l'*appropriation* des aspects du contenu non évidents pour le sens commun. Cette idée d'appropriation, ou de compréhension, sera assimilée ici à *la capacité à identifier les arguments permettant de justifier en quoi une proposition est correcte ou non, relativement à la théorie.*

Une telle recherche d'arguments est distincte d'une justification qui consisterait en une déduction à partir d'une conclusion générale de la théorie. Par exemple à la question « pourquoi la chute libre ne nécessite-elle pas la présence de l'air ? », une réponse du type « parce que la gravitation est universelle » n'est pas considérée comme suffisante pour pouvoir juger de l'appropriation de cette idée (l'indépendance de la chute à la présence d'air). En effet si cet aspect de la théorie demande une justification relativement au sens commun, alors la proposition utilisée, plus générale encore, n'est *a priori* pas évidente non plus. Cela reviendrait donc uniquement à déplacer la question de départ : « qu'est-ce que signifie que la gravitation soit universelle, et pourquoi peut-on penser cela, sachant qu'on observe seulement la chute sur Terre, en présence d'air ? ». Un argument attendu, pour cette question, serait l'évocation de la démarche permettant de faire lien entre l'accélération centripète de la Lune et l'accélération de pesanteur, via la décroissance en $1/r^2$. Si ces deux accélérations sont reconnues comme liées aux mêmes types de circonstances physiques, alors l'accélération de chute libre ne peut plus être associée aux circonstances physiques présentes uniquement à la surface de la Terre, comme la présence de l'air.

Ainsi la deuxième question de recherche, concernant l'efficacité de la séquence vis à vis de justification des aspects non évidents, peut être formulée ainsi :

Dans quelle mesure la séquence permet-elle aux élèves d'identifier les arguments permettant de justifier certains aspects du contenu, *a priori* non évidents pour le sens commun ? (QR2)

Pour la partie dynamique de la séquence, les aspects non évidents reprennent les trois problèmes d'apprentissage visés :

1. La coexistence du sens commun et du sens physique de la notion de force. *Il n'est pas évident que les idées intuitives sur les forces et le mouvement (lien*

à la vitesse, idée de capital de force) ne puissent pas s'ajouter à la définition newtonienne du concept.

2. L'ambiguïté de la notion de causalité. *Il n'est pas évident de penser la relation entre la force et l'accélération comme simultanée.*
3. La non évidence de l'idée d'attraction terrestre. *Il n'est pas évident d'associer la chute libre à une force, plutôt qu'un mouvement ayant lieu de lui-même. Il n'est pas évident que cette force soit exercée par la Terre.*

Pour la partie gravitation, le problème d'apprentissage central considéré était la distinction entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace. Celui-ci rassemblait plusieurs idées pouvant être également exprimées sous forme d'aspects de la théorie *a priori* non évidents pour le sens commun :

- Il n'est pas évident de voir qu'il y ait un lien entre le mouvement de chute libre et celui de révolution.
- Il n'est pas évident de penser que la chute verticale puisse avoir lieu hors de l'atmosphère, sans la présence de l'air.

Perception du cours

Enfin, en plus de l'accessibilité de la séquence et son efficacité pour la justification, une troisième question concerne ce que pensent les élèves de l'approche développée, notamment la démarche globale de reconstruction des lois et formules, l'utilisation d'un cheminement historique, ou d'autres aspects plus locaux.

Comment les élèves perçoivent-ils les différentes approches proposées, en particulier relativement à leur expérience passée des cours de physique? (QR3)

5.2 Activités proposées

Comme il a été mentionné précédemment, les activités ont été conçues avec un double rôle, à la fois la volonté de favoriser l'assimilation de la présentation proposée, et également l'intention de pouvoir utiliser les productions d'élèves pour avoir un retour sur la séquence, relativement aux questions de recherche.

5.2.1 Activités de recherche de passages dans une synthèse du cours

Le premier type d'activité proposé concerne la seconde question de recherche considérée. Il s'agit d'évaluer la capacité des élèves à identifier les arguments permettant de justifier certaines propositions de la théorie, *a priori* non évidentes. L'activité conçue à cette fin consiste en un travail sur une synthèse écrite de la séquence. Il est demandé aux élèves de trouver dans le texte les passages précis contenant les arguments permettant de répondre à plusieurs questions, reprenant les non évidences rappelées précédemment. La consigne donnée aux élèves est la suivante :

Quelqu'un qui ne connaît pas ou peu la théorie newtonienne peut se poser certaines questions à son sujet. Pour chacune des questions suivantes, rechercher dans la synthèse les passages précis où il y a les arguments suffisants pour y répondre. Pour chaque question, il peut y avoir plusieurs passages concernés. En particulier, lorsque vous pensez à un passage, demandez-vous s'il n'y en a pas un plus tôt ou plus tard (dans l'ordre du cours) qui apporte un autre élément de réponse.

La dernière phrase a pour but d'éviter que les réponses données se limitent aux conclusions générales de la théorie, pour la raison qui a été développée précédemment. Une première synthèse est donnée (cf. annexe B p.353) à la suite de la partie du cours sur la dynamique, où se situe une première activité de ce type. Les questions posées sont alors les suivantes :

- a) Pourquoi parle-t-on de force pour la chute libre des objets alors que c'est un mouvement qui a lieu tout seul, de lui-même ?*
- b) Comment se fait-il que dans la théorie de Newton la force ne soit pas dans la direction du mouvement de l'objet considéré (c'est-à-dire la direction de son vecteur vitesse) ?*
- c) Pourquoi la force au sens de Newton à un moment donné ne pourrait pas correspondre à une force communiquée à l'objet antérieurement, responsable de son mouvement ?*

A la suite de la synthèse de la seconde partie du cours, sur la théorie de la gravitation (cf. annexe D p.363), le même type d'activité est proposé, avec les questions suivantes :

- d) Les mouvements de chute libre sur Terre et de révolution des planètes semblent a priori très différents. Quels liens peut-on voir entre les deux ?*

e) *Pourquoi ne peut-on pas considérer, comme dans l'Antiquité, que les lois de la physique ne concernent que les phénomènes sur Terre et ne s'appliquent pas aux phénomènes dans l'espace ?*

f) *Peut-on dire que la chute libre soit due à la pression atmosphérique, puisqu'elle a lieu seulement dans l'atmosphère, où il y a de l'air ?*

g) *Pourquoi peut-on dire à propos de la force s'exerçant sur un objet en chute libre qu'il est attiré par la Terre ? C'est tout de même étonnant d'associer un phénomène aussi courant que la chute des objets, à quelque chose d'aussi énormément plus gros que ces objets : la planète Terre elle-même.*

5.2.2 Activité de reconstitution de la logique de la séquence : les puzzles de cheminement

Le second type d'activité proposé a pour but d'évaluer la compréhension de la logique globale de la séquence. L'idée consiste à faire reconstruire le cheminement par les élèves, en replaçant les différentes étapes sur un schéma de la structure de ce cheminement. Ces schémas, développés à l'origine pour ces activités, ont été réutilisés dans ce manuscrit, comme synthèse des chapitre 3 et 4 (cf. p.109 et p.163).

La première activité concerne le cheminement permettant d'aboutir aux lois du mouvement (figure 5.2.1), et la seconde celui menant à la gravitation universelle (figure 5.2.2).

Cette activité a été placée après celle de recherche de passages dans la synthèse écrite, de façon à ce que la lecture et le travail sur la synthèse permette une première prise de recul sur l'ensemble de la séquence, suite à sa présentation en cours.

Résolution individuelle

Dans une première phase, il est demandé aux élèves de faire le puzzle individuellement :

Positionner chacun des éléments ci-dessous dans le schéma de façon à reconstituer le cheminement du cours. Les numéros correspondent à l'ordre des étapes dans le cheminement (une étape par flèche). Essayer d'abord sans utiliser la synthèse du cours. Puis, si vous en avez besoin vous pouvez l'utiliser. Indiquer par une astérisque () les éléments que vous avez positionnés en utilisant la synthèse du cours.*

Degré de confiance

Une fois les éléments positionnés, est demandé aux élèves de renseigner leur niveau de confiance pour chaque étape, ou pour des éléments en particulier, de la façon suivante :

- *Pour chaque étape (pour chaque flèche), indiquer si vous êtes à peu près sûr ou pas vraiment de vos choix d'éléments pour cette flèche, en encadrant ou entourant le numéro correspondant.*
- *Si vous avez un doute sur un élément en particulier, indiquer le par un point d'interrogation sur le côté.*
- *Si vous hésitez à intervertir deux éléments, indiquer le par une flèche entre les deux avec un point d'interrogation.*

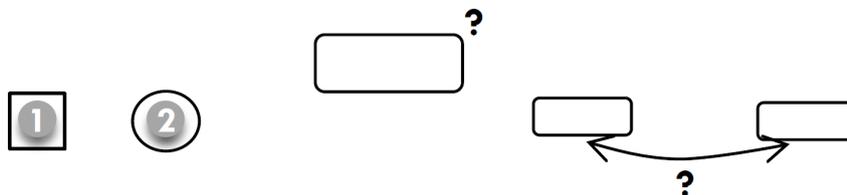


Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton

Point de départ

La notion de force, au sens général : ce qui permet d'expliquer le mouvement.

L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu de naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication.

On explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.
Exemples :
mouvement d'un clou ↔ présence et distance d'un aimant
vélo à vitesse constante ↔ le fait de pédaler.

1^{ère} (« loi ») de Newton (restreinte au référentiel terrestre) :
Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \text{cste}$), incluant le repos ($\vec{v} = \vec{0}$).
Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \text{cste}$).

2

Interprétation de la chute verticale :

D'Aristote (-300) à Galilée (1630) : mouvement naturel, pas de force.
Newton (1680) : mouvement associé à une force : le poids.

3^{ème} loi de Newton :
$$\vec{F}_{B \rightarrow A}^{\text{Newt}} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{\text{Newt}}$$

6

Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B, notée : $\vec{F}_{A \rightarrow B}^{\text{Newt}}$

2^{ème} (« loi ») de Newton : Définition quantitative de la grandeur physique force au sens de Newton
$$\vec{F}^{\text{Newt}} := m\vec{a}$$

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton, \vec{F}^{Newt}

Caractérisation par le vecteur accélération
Exemples : pour différents aimants, différents $\vec{a}(t)$.
Une première façon de quantifier l'« efficacité » de l'aimant (les circonstances physiques associées à l'accélération) est de poser $\vec{F}^{\text{Newt}} \propto \vec{a}$.
Une accélération plus grande sera associée à un aimant « plus efficace ».

Constat expérimental :
Pour les mêmes circonstances physiques (par ex. les mêmes aimants aux mêmes positions), deux objets de masse différente n'ont pas la même accélération.

5

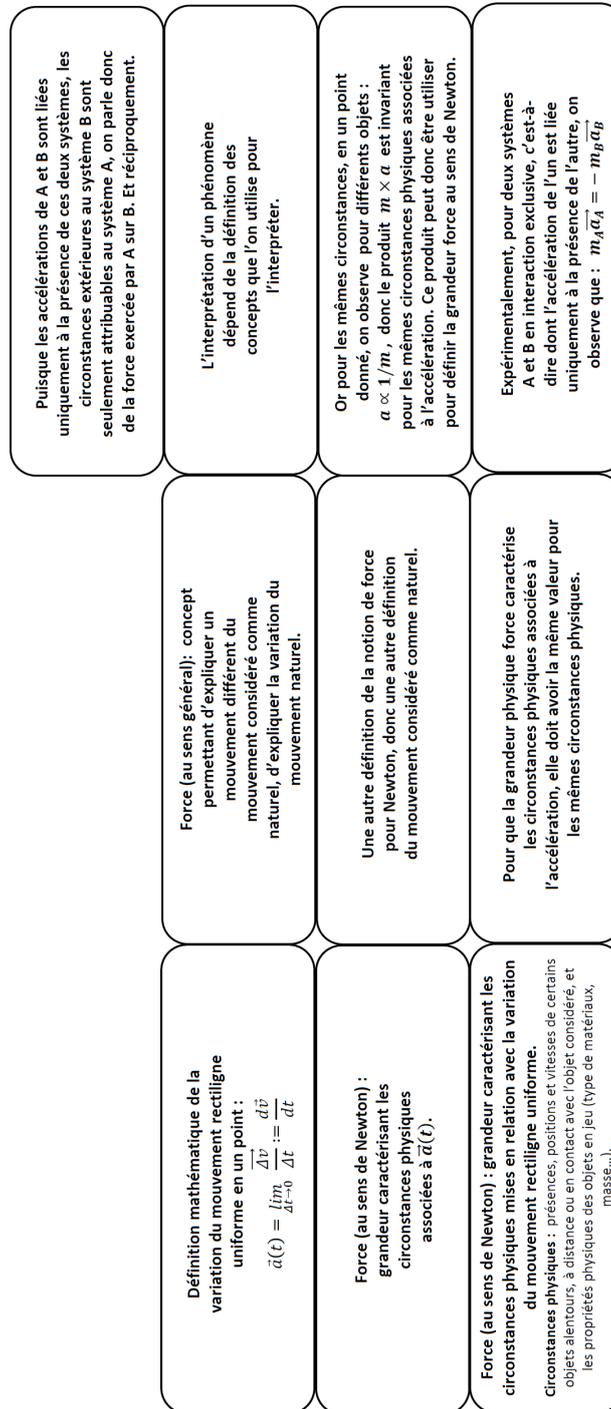
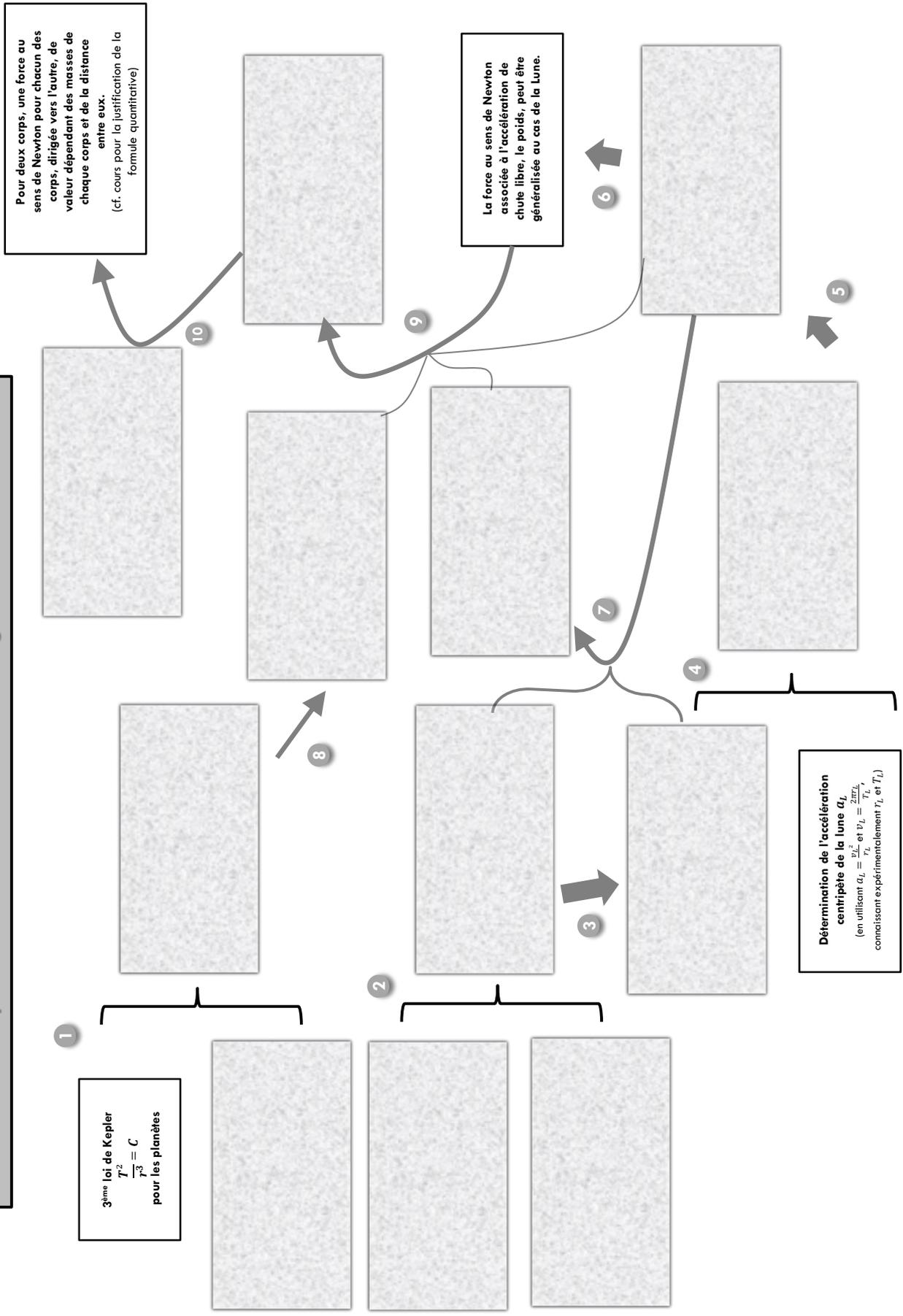


FIGURE 5.2.1 – Activité 2 - Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton et éléments correspondants

Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle



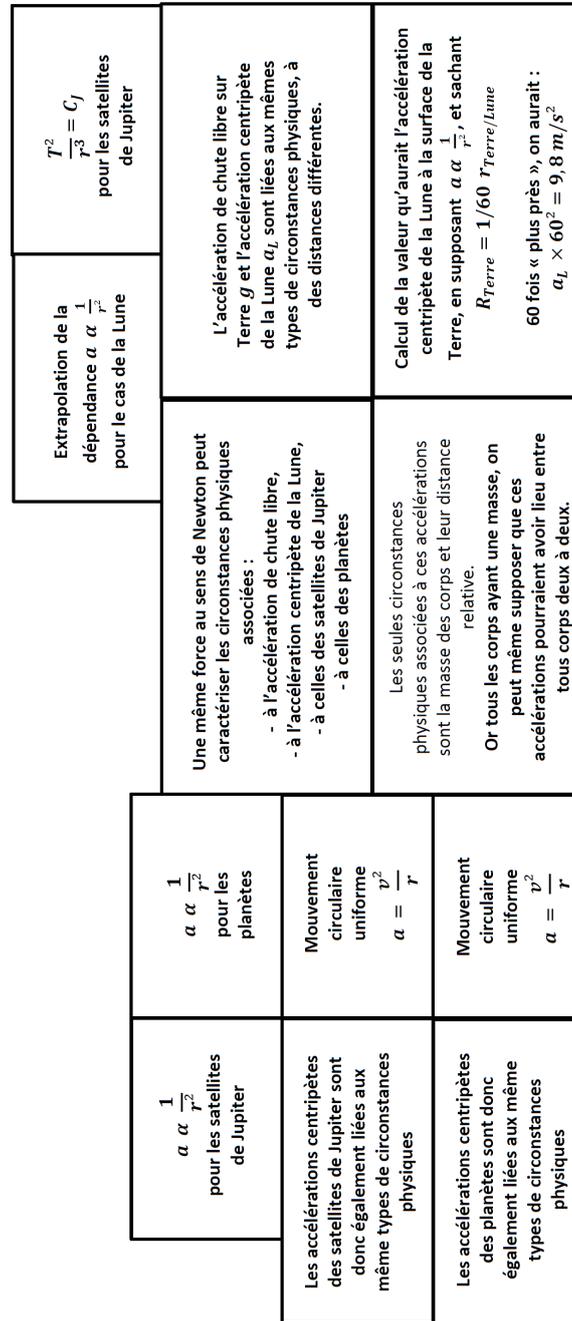
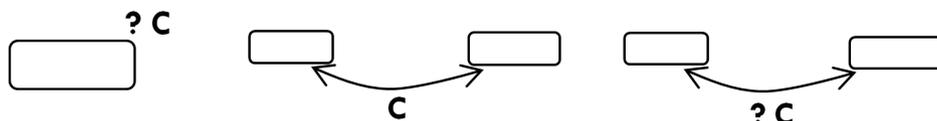


FIGURE 5.2.2 – Activité 4 - Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle et éléments correspondants

Comparaison des puzzles en binômes

Après la première phase de résolution individuelle, il est demandé aux élèves de constituer des binômes et de comparer leurs puzzles respectifs.

Une fois terminée l'évaluation personnelle de ce que vous avez fait [les degrés de confiance], comparez votre schéma avec quelqu'un d'autre ayant terminé aussi, et repérez les éventuelles différences entre eux. Argumentez chacun sur vos choix. Si après discussion vous êtes convaincus par certains choix que propose l'autre, indiquez le par une flèche annotée de la lettre C (comme convaincu). Si un élément ou une interversion sur lesquelles vous hésitez auparavant se précisent, indiquez le également par la lettre C.



Cette activité a pour but de faire exprimer les arguments que donnent les élèves pour justifier leurs choix, ainsi que ceux qui permettent de les convaincre lors de la discussion (pour une réponse correcte ou non). Les discussions de chaque binôme ont été enregistréé avec des dictaphones individuels. En pratique, les enregistrements sont cependant difficilement utilisables, à cause du brouhaha général d'une part (plusieurs binômes discutant en même temps). D'autre part - et surtout - les discussions s'appuient sur les puzzles que les élèves ont sous les yeux, ce qui les rend souvent très difficile à interpréter³.

5.3 Perception du cours et des activités

Des informations sur la perception de la séquence par les élèves ont été recueillies à trois temps différents :

- pendant le cours, « à chaud »,
- à la suite du cours via un questionnaire,
- *a posteriori* à partir de la synthèse écrite du cours.

3. Il aurait fallu un enregistrement vidéo de chaque binôme, mais un tel dispositif n'a pas été techniquement possible. Choisir seulement certains binômes était également problématique, dans la mesure où l'on ne peut pas savoir à l'avance les discussions susceptibles d'être intéressantes (les élèves se regroupaient lorsque deux avaient finis). Cependant une alternative pour de futures expérimentations est de prévoir une coupure entre les deux parties - la résolution individuelle et la comparaison des puzzles - afin de regarder rapidement les productions, et regrouper en binômes certains élèves ayant des réponses particulièrement différentes. La discussion de ceux-ci serait alors filmée.

Réactions pendant le cours

Afin d'obtenir un aperçu de la manière dont sont perçus les différents éléments du cours au moment où ils sont présentés, un tableau est donné aux élèves, où ils peuvent facilement consigner leur réaction, selon trois possibilités :

- « surpris »
- « pas tout à fait sûr de comprendre »
- « bien compris »

Pour chaque diapositive du support de la séquence (cf. annexe A p.309), il leur est possible d'indiquer leur réaction lorsqu'elle correspond à l'une des trois proposées. Un espace est laissé pour préciser succinctement l'aspect par lequel ils ont été interpellés (cf. figure 5.3.1). Il leur est de plus expliqué qu'il ne s'agit pas nécessairement de remplir le tableau de manière systématique, mais essentiellement lorsque leur avis sur le moment est suffisamment clair pour eux.

N° diapo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Votre réaction (possible d'en cocher plusieurs)	 surpris	 surpris	 surpris	 surpris	 surpris	 surpris	 surpris	 surpris	 surpris
	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre	 pas tout à fait sûr de comprendre
	 bien compris	 bien compris	 bien compris	 bien compris	 bien compris	 bien compris	 bien compris	 bien compris	 bien compris
A propos de quoi en particulier ? (idée/formule/...)	Quoi ? (idée/formule)	Quoi ? (idée/formule)	Quoi ? (idée/formule)						

FIGURE 5.3.1 – Tableau de réactions (extrait)

Perception du cours à partir de la synthèse écrite

Avant de commencer l'activité de recherche de passages dans la synthèse du cours, il est demandé aux élèves de lire une première fois le texte, avec la consigne suivante :

Lire la synthèse du cours en identifiant (simplement par des numéros sur le côté) les passages :

- 1) *qui vous ont le plus aidés à comprendre.*
- 2) *Ceux où vous êtes le moins sûr d'avoir bien compris.*
- 3) *Les plus intéressants pour vous.*

Questionnaire à la suite du cours

Pour chacune des activités, il est demandé si elles ont été perçues comme plutôt faciles ou difficiles, et comme plus ou moins utiles pour l'appropriation du cours.

Vis à vis du cours, une première question concerne les différences ou points communs avec les autres cours de physique suivis :

Y a-t-il pour toi des différences majeures entre la façon d'aborder la physique dans ce cours et les autres cours de physique que tu as eus, au lycée ou à l'université ? Si oui, lesquelles ? Si non, quels aspects trouves-tu en commun ? Peux-tu donner ton avis au sujet de ces différences ou points communs ?

Une autre question porte sur l'état d'esprit de la séquence :

Si tu devais expliquer à quelqu'un l'état d'esprit global du cours, quels aspects principaux évoquerais-tu ?

Ces deux questions ont pour but de déterminer dans quelle mesure les spécificités des approches proposées ont été perçues.

Une autre question aborde la perception de l'image de la physique :

Penses-tu que ce cours t'ai apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?

Ces questions seront précisées plus loin lors de l'analyse, car elles se spécifient selon la population concernée (lycéens ou étudiants à l'université).

5.4 Expérimentations

La séquence a été expérimentée avec les deux populations suivantes :

- des étudiants volontaires en première année de physique à l'université,
- des élèves volontaires de lycée, en première ou terminale S⁴.

Pour chacun des cas, la séquence a été conduite par l'auteur de cette recherche. Ce choix permet d'éviter la difficulté supplémentaire de la formation d'un enseignant à l'approche proposée. Cette étape, nécessaire pour la suite du développement de cette approche, demande une certaine maturité de la séquence, qui requiert des expérimentations préalables pour l'évaluer et l'affiner, avant de considérer sa transposition par

4. Dans toute la suite, le terme « d'élèves » sera utilisé au sens général, pour qualifier indifféremment les lycéens et les étudiants, lorsqu'il ne sera pas spécifié qu'il s'agit des élèves de lycée.

d'autres enseignants. La présentation de la séquence par son auteur permet de plus de constituer une référence pour cette étape future de transposition.

Étudiants en première année de physique (noté dans la suite L1Phy)

Les étudiants en première année d'université sont des étudiants de l'Université Paris 7, inscrits dans un parcours de physique. L'expérimentation s'est déroulée en octobre 2014, après leur cours de mécanique du premier semestre sur les lois de Newton⁵. 17 étudiants ont participé à l'ensemble de la séquence. Afin de s'adapter aux disponibilités de chacun des étudiants (venant de groupes différents), quatre sessions du cours ont eu lieu. Le cours a consisté en trois séances de 2 heures.

Élèves de première ou terminale S (noté dans la suite Lycéens, 1S ou TS)

La seconde expérimentation a eu lieu avec des élèves de lycées d'Ile-de-France, ayant reçu la proposition du cours via leur professeur de physique (ceux-ci ayant été contactés via leur lien avec le master de didactique de l'université Paris 7). Le cours a eu lieu pendant les vacances d'avril 2015 à l'université Paris 7, avec 13 élèves volontaires, 10 élèves de 1^{ère}S, et 3 élèves de Terminale S. Il s'est réparti sur une demi journée (3h) et sur une journée (4h30). La durée plus longue pour ce groupe est liée à essentiellement trois raisons.

- Un temps supplémentaire a été passé à l'introduction du formalisme mathématique pour la description du mouvement (pour aboutir au vecteur accélération)⁶.
- Plus de temps a également été passé à certains calculs (notamment la démonstration de la formule $a = v^2/r$).
- La lecture de la synthèse de la seconde partie du cours, a été effectuée pendant la durée du cours, alors que pour les étudiants de L1, elle a eu lieu chez eux.

5. L'une des questions du questionnaire concerne les points communs et différences perçus entre l'approche suivie dans leur module de physique et celle proposée dans cette expérimentation.

6. Les éléments ajoutés peuvent être trouvés dans la synthèse de la première partie du cours, version lycéens, dans l'annexe C p.403. Il s'agit des paragraphes dont le numéro est précédé par la lettre L (L1, L2, L3...).

5.5 Plan de la séquence complète dynamique et gravitation

Les différents types d'activité ayant été présentés, la structure complète de la séquence peut être exposée.

Le plan reprend l'intitulé des parties et des paragraphes de la synthèse du cours, de façon à ce que le contenu de chaque partie puisse être retrouvé facilement en se référant à celle-ci, disponible dans les annexes B (p.353) et D (p.363) .

PLAN DE LA SÉQUENCE COMPLÈTE	Découpage L1 physique	Découpage Lycéens
<p>0 - Introduction par la remise en question de l'héliocentrisme (cf. 4.3.7 p.165)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Présentation du modèle de Tycho Brahe. — Visualisation du mouvement des astres dans le référentiel terrestre via une simulation informatique. 	<p><i>Début</i> <i>séance 1</i> ~10 min</p>	<p><i>Début</i> <i>séance 1</i> ~15 min</p>
<p>I - La compréhension du monde avant Newton (cf. 4.3.3 p.142)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Les arguments justifiant la distinction entre monde terrestre et céleste, pendant l'Antiquité. — Éléments remettant en question la séparation entre monde terrestre et céleste. — Le problème de Newton. 	<p>~20 min</p>	<p>~30 min</p>

<p>II - Dynamique (cf. 3.3.1 p.97)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Force et mouvement naturel de référence — Le concept de force au sens de Newton — Retour sur le cas de la chute libre — Définition quantitative de la grandeur physique force — La troisième loi du mouvement — Force et déformation — De la force résultante à la décomposition en un système de forces. — Étude du mouvement circulaire uniforme — Extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels, notion de référentiel galiléen 	<p>~1h30 <i>Fin séance</i> 1 (~2h)</p>	<p>~2h15 <i>Fin séance</i> 1 (~3h)</p>
<p><i>Lecture de la synthèse de la première partie du cours par les élèves</i> <i>(indication des passages plus ou moins compris et ceux les plus intéressants)</i> <i>A faire chez eux pour la séance suivante</i></p>		
<p>Activité A1 : Synthèse dynamique Recherche d'arguments dans la synthèse écrite du cours (cf. 5.2.1 p.184) individuelle</p>	<p><i>Début</i> <i>séance 2</i> ~30 min</p>	<p><i>Début</i> <i>séance 2</i> ~30 min</p>
<p>Activité A2 : Puzzle dynamique Reconstitution de la logique menant aux lois de Newton (cf. 5.2.2 p.185, figure 5.2.1) individuelle (~20 min) puis comparaison des puzzles en binôme (~10 min)</p>	<p>~30 min</p>	<p>~30 min</p>
<p><i>Questionnaires sur la perception des activités et de la première partie du cours</i></p>	<p>~5/10 min</p>	<p>~5/10 min</p>
<p>III - L'analyse de la révolution des astres selon les lois du mouvement (cf. 4.3.6 p.157)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Le mouvement des planètes — Les satellites de Jupiter 	<p>~10 min</p>	<p>~10 min</p>

<p>IV - La grande synthèse de Newton (cf. 4.3.6 p.157)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rappel du problème — Comparaison du cas de la Lune à la chute libre sur Terre — Extrapolation de la dépendance en $1/r^2$ de l'accélération des satellites de Jupiter à la Lune. — Quelles sont les circonstances physiques associées à ces accélérations ? — Des accélérations liées à la présence de la Terre — Des accélérations liées à la distance au centre de la Terre — 3ème loi du mouvement et lien à la valeur de la masse de la Terre — Généralisation — Interprétation 	<p>~50 min <i>Fin séance</i> 2 (~2h)</p>	<p>~1h min <i>Fin séance</i> 2 (~2h15)</p>
<p><i>Lecture de la synthèse de la première partie du cours par les élèves</i> <i>(indication des passages plus ou moins compris et ceux les plus intéressants)</i> <i>A faire chez eux pour la séance suivante</i></p>		<p><i>Début</i> <i>séance 3</i> ~15 min</p>
<p>Activité A3 : Synthèse gravitation Recherche d'arguments dans la synthèse écrite du cours (cf. 5.2.1 p.184) individuelle</p>	<p><i>Début</i> <i>séance 3</i> ~30 min</p>	<p>~30 min</p>
<p>Activité A4 : Puzzle gravitation Reconstitution de la logique menant à la gravitation universelle (cf. 5.2.2 p.185, figure 5.2.2) individuelle (~20 min) puis comparaison des puzzles en binôme (~10 min)</p>	<p>~30 min</p>	<p>~30 min</p>
<p><i>Questionnaire sur la perception des activités et de la seconde partie du cours</i></p>	<p>~5/10 min</p>	<p>~5/10 min</p>

Problème sur l'impesanteur (cf. 4.4.2 p.168)	~50 min <i>Fin séance</i> 3 (~2h)	~50 min <i>Fin séance</i> 3 (~2h15)
---	---	---

Chapitre 6

Résultats concernant la dynamique

6.1 Retour d'élèves sur les choix principaux de l'approche de la dynamique

Sont présentés ici les retours d'élèves concernant certains des aspects centraux de l'approche proposée. Au niveau qualitatif, les retours obtenus proviennent des enregistrements des différentes sessions de présentation de la séquence.

Des informations quantitatives seront également données concernant la perception par les élèves des différentes notions abordées. Il s'agit d'une part des proportions obtenues sur la perception du cours en temps réel. Pour chaque diapositive (cf. annexe A p.309), les élèves pouvaient cocher parmi les items suivants :

- surpris,
- pas tout à fait sûr de comprendre
- bien compris (cf. Tableau de réaction, figure 5.3.1 p. 192).

Seront donnés également les résultats sur la perception a posteriori de la séquence. Lors d'une première lecture de la synthèse écrite, après la fin de la première partie du cours (cf. annexe B p.353), les élèves pouvaient indiquer les passages :

- les ayant aidés à comprendre,
- qu'ils ne sont pas sûrs d'avoir bien compris,
- qu'ils ont trouvés les plus intéressants.

Pour le passage de la synthèse correspondant à une certaine notion, et à la diapositive correspondante pendant le cours, seront considérées les proportions obtenues pour les différentes catégories.

Un premier aperçu global des résultats sur la perception de l'approche de la dynamique peut être donné dès à présent, avec le tableau 6.1. Il s'agit des nombres de diapositives ou de paragraphes ayant été mentionnés dans l'une des catégories proposées, pour les différentes populations.

Statistique globale pour la perception de la partie dynamique		L1 phy (17) <i>(ramené sur 8)</i>	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapositives (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	107	67	40
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	11	21	0
	<i>Surpris</i>	3	10	0
Synthèse (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	82	30	1
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	16	92	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	27	34	14

TABLE 6.1 – **Statistique globale pour la perception de la partie dynamique.** Nombres de mentions obtenues pour les diapositives correspondantes (17 à 48) et les passages (§5 à 34) de la synthèse, ramenés au nombre de 8 élèves pour les L1 physique.

On peut observer des proportions similaires du nombre total de passages de la synthèse indiqués comme parmi les plus intéressants. Au niveau de la compréhension, pendant le cours, plus de diapositives ont été indiquées comme bien comprises par les étudiants de L1 que par les lycéens (du moins avec les 1^{ère}S, les terminales S étant trop peu nombreux pour permettre la comparaison).

Cela se retrouve au niveau des passages de la synthèse indiqués comme ayant aidé à la compréhension (4^{ème} ligne) : un nombre total près de trois fois plus important pour les étudiants de L1. Au contraire, les passages indiqués comme « pas sûr d'avoir bien compris » sont plus de 5 fois plus nombreux chez les 1^{ère}S que chez les L1 de physique.

Il ne s'agit ici que d'une statistique globale, une analyse spécifique aux différents points importants de la séquence va être présentée dans la suite.

6.1.1 L'idée de dépendance de l'explication à une situation de référence

Réception pendant le cours

Cet aspect n'a pas semblé poser problème aux élèves dans la plupart des groupes lors de sa présentation. Cependant dans l'une des sessions, une étudiante a exprimé sa

perplexité vis-à-vis de l'idée d'un état qui ne nécessiterait pas d'explication, révélant des difficultés importantes. Elle réagit à la présentation des deux exemples : celui du maintien de la vitesse du vélo relativement au fait que de lui-même, il ralentisse, et l'exemple du thé dont on explique le maintien de la température dans un récipient fermé, en référence au fait que de lui-même, sa température va diminuer.

L2.1 - Mais ces deux états-là on peut les expliquer aussi, parce que dans le premier cas c'est les frottements et dans le second cas c'est juste la thermodynamique, donc c'est pas vraiment des états naturels, enfin...

(Alice - L1Phy - D&G2 - S1 - 1 :10 :35)¹

Cette remarque montre une ambiguïté possible du terme d'explication. Il semble pour l'élève que peut être considéré comme *expliqué* tout ce qui est décrit dans le cadre de la physique. Par exemple le refroidissement du thé, « c'est juste la thermodynamique ». Ainsi le point difficile à réaliser semble être que *même dans le cadre de la physique*, certains phénomènes sont considérés comme *ayant lieu d'eux même*². Une façon d'appuyer cet aspect est d'insister sur le rôle de mise en relation de l'explication : le refroidissement du thé n'est pas *expliqué* au sens où, même dans la théorie physique, il n'est pas *relié* à quelque chose d'autre : à des circonstances particulières qui *l'expliqueraient*³. L'idée de mise en relation a cependant été développée *après* celle de la dépendance à un état naturel de référence. Son utilisation suggère ainsi une inversion de l'ordre des deux idées, afin de pouvoir expliciter l'absence de mise à relation pour les phénomènes jugés comme « ayant lieu d'eux mêmes ».

L'étudiante exprime plus loin sa frustration vis à vis de cette idée :

L2.1 - C'est un peu frustrant parce que ça veut dire qu'il y a des questions qu'on ne se pose pas, ou alors carrément des phénomènes que, enfin, que ouais pour lesquels on n'a pas de description. C'est comme des questions sans réponses.

(Alice - L1Phy - D&G2 - S1 - 1 :13 :37)

Cela se poursuit par une recherche d'un compromis dans l'utilisation mixte de plusieurs niveaux d'explication, avec plusieurs situations de référence différentes. Par exemple le fait que pour l'explication *commune* du cas du vélo, la situation de référence soit

1. A fin d'anonymat, les prénoms des élèves ont été interverti. Les références correspondent au fichier de la séance concernée. L'ensemble des enregistrements sont disponibles à la demande.

2. Il s'agit précisément de l'idée de Toulmin (1963) sur « la conception idéale de l'ordre naturel » développée dans le chapitre 3, p.79.

3. La seconde loi de la thermodynamique n'est qu'une façon d'exprimer et de généraliser ce phénomène. Cependant une difficulté de cet exemple peut venir du manque de connaissance des élèves sur ce sujet.

le ralentissement jusqu'à l'arrêt, mais que l'explication *mécanique* de cette situation fasse intervenir les forces de frottements. Ce cas semble laisser penser à l'élève qu'il y a toujours une autre façon d'expliquer la situation de référence par un autre type d'explication.

L2.1 - Une fois qu'on a l'explication pour le phénomène, on pourrait justement inverser les choses et se poser la question pour le phénomène qu'on a pris en phénomène de base. [...] Pour le vélo, par exemple, on se demande pourquoi il continue à avancer et après pourquoi il ralentit quand il pédale plus.

L0 – Ouais, ouais. Mais tu vas voir que même quand on fait ça, quand tu déplaces la question, t'as encore mis un état de référence.

L2.1 – Ouais mais comme on a les deux, c'est réciproque en fait, l'un engendre l'autre, et l'autre engendre la première et donc du coup ...

(Alice - L1Phy - D&G2 - S1 - 1 :14 :07)

Il s'agit d'une idée pertinente, témoignant de la compréhension que plusieurs types d'explication sont possibles. Elle montre cependant la difficulté de comprendre que même pour cet autre type d'explication (celle du ralentissement), une autre situation de référence est *implicitement* considérée (le mouvement rectiligne uniforme).

Cette difficulté révèle que les élèves ne conçoivent généralement pas le mouvement rectiligne uniforme comme une situation de référence. Son explicitation peut donc être attendue comme surprenante, ce qui est positif relativement à l'intention de mettre en évidence et de souligner la spécificité de la définition du concept newtonien de force.

Suite aux explications ajoutées pour l'étudiante précédente, un autre étudiant du groupe reformule l'idée, semblant ainsi montrer sa compréhension :

L2.2 - Et ça veut dire quoi, que fatalement n'importe quel modèle qu'on prendra y aura toujours des choses qu'on pourra pas expliquer, parce qu'on prend toujours quelque chose en référence, on considère toujours qu'il y a quelque chose ayant lieu de lui-même.

(Alexis - L1Phy - D&G2 - S1 - 1 :16 :20)

Aperçu quantitatif sur la perception

Cet aspect n'a été mentionné comme incompris pendant la séquence par aucun des étudiants de L1 et des élèves de terminale⁴. Dans la synthèse, le passage correspondant est indiqué 11 fois comme ayant aidé à comprendre, soit le nombre maximal obtenu

4. Celle indiquant être « surprise » est l'étudiante dont les propos ont été rapportés précédemment, Alice.

pour un paragraphe (pour les trois catégories confondues, pour les L1). La moyenne pour l'ensemble des paragraphes est de 5 (L1). Plus de difficultés ont été ressenties dans le groupe de lycéens - la moitié des 1^{ère} S - bien qu'elles n'aient pas été exprimées ou développées à l'oral.

Le tableau 6.2 donne les proportions obtenues des différentes catégories pour la diapositive essentielle où se situe l'idée de dépendance de l'explication du mouvement à un mouvement de référence. Dans le diaporama de support du cours, il s'agit de la diapositive 20 (cf. annexe A p.309+10). Dans la synthèse écrite, le passage correspondant est le paragraphe 7 (cf. annexe p.+).

		L1 phy (17)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapo 20 (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	8	1	2
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	0	4	0
	<i>Surpris</i>	1	0	0
Synthèse § 7 (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	11	2	0
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	3	1	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	4	1	0

TABLE 6.2 – Perception du passage sur *la dépendance de l'explication du mouvement à un mouvement de référence*

Ces chiffres doivent être situés relativement à l'ensemble des diapositives ou des paragraphes de la synthèse. Le nombre maximal obtenu pour une diapositive (les trois catégories confondues) est de 12/17 pour les L1 physique, et 12/13 pour les lycéens. Pour la synthèse, le maximum obtenu pour un passage (les trois catégories confondues) est de 11/17 pour les L1 physique, et de 8/13 pour les lycéens (cette fréquence a lieu seulement pour un passage, ensuite le maximum est de 4).

6.1.2 L'utilisation de la contradiction historique pour questionner la définition précise du concept de force

Réception pendant le cours

Après avoir vu la notion de dépendance d'une explication à une situation de référence, cette idée est considérée pour le cas du mouvement, puis dans l'histoire des sciences, via la notion de mouvement naturel. Une réaction intéressante plusieurs fois observée

consiste à penser que cette idée ne s'applique plus à la physique actuelle. C'est le cas notamment dans le groupe de lycéens.

L0 - Donc quand on voit que cette idée-là elle est présente pendant 2000 ans d'histoire des sciences, il y a quelques chose qu'on peut se dire, c'est qu'on peut préciser notre notion de force en tant qu'explication du mouvement, on peut dire que la force c'est ce qui permet d'expliquer un mouvement qui est différent d'un mouvement naturel. Pas tous les mouvements, mais un mouvement qui diffère du mouvement de référence. Ou autrement dit, ce qui varie du mouvement naturel, donc la variation du mouvement naturel.

L9.1 - Mais ça c'était à l'époque au final, ça c'est plus valable de nos jours ?

L0 - Alors, on va voir. Pourquoi ce serait plus valable de nos jours ?

L9.1 - Parce que le mouvement naturel n'existe pas.

(Guillaume - TS - D&G9 - S1- 1 :36 :00)

Cette tendance forte va se retrouver à plusieurs reprises dans la suite, vis-à-vis de l'interprétation de la chute libre comme un mouvement naturel chez Aristote et Galilée.

L0 - Qu'est-ce qui vous choque là-dedans, par rapport à ce que vous savez ?

[diapo 22] [...]

L9.2 - Le fait que ça ne nécessite pas de force.

L9.1 - Que ça ne nécessite pas de force.

L9.2 - Alors que maintenant on sait que ça nécessite une force.

L0 - Qui ? Quoi qui nécessite une force ?

L9.2 - Le mouvement qu'il considère naturel, la chute libre,

L9.1 - La chute que vous montriez avec la craie.

L0 - Qu'est-ce que vous savez là-dessus ?

L9.2 - La gravitation.

L9.3 - En fait le truc qui dérange, je pense c'est que, il est dit que le mouvement naturel c'est le mouvement naturel qui ne nécessite pas de force pour l'expliquer. Or en mouvement naturel entre guillemets, il cite la chute libre. Sauf que le problème de la chute de libre, c'est que la chute libre c'est un objet qui est soumis uniquement à la force et cette force est son poids, et donc s'il est soumis à une force pour faire son mouvement mais que c'est un mouvement naturel qui n'est pas soumis à une force, ce n'est pas logique.

(9.3 : Paul - TS - D&G9 - S1 - 1 :38 :10)

Ces réactions correspondent très bien à l'intention d'attirer l'attention sur la contradiction entre les différentes interprétations de la chute libre, qui était alors formulée ainsi (p.99) :

L'utilisation de la contradiction historique comme questionnement de la définition précise du concept newtonien de force. Il s'agit ici de s'appuyer sur le fait que les élèves savent en général que la chute libre est associée à la force de gravité, le poids, pour faire émerger la contradiction. La mise en évidence de la contradiction entre l'interprétation de la chute libre par Aristote et Galilée et celle de Newton a pour but d'amener à voir la nécessité de la question de la définition du concept de force dans la théorie de Newton.

Un autre intervention du même élève (Paul) exprime une tentative pour concilier la notion de mouvement naturel avec la présence d'une unique force, le poids, en distinguant celle-ci d'autres actions qui « influenceraient » le mouvement.

L9.3 - Est-ce que ils définissent le mouvement naturel en tant que mouvement qui ne nécessite vraiment d'aucune force pour se faire ou est-ce que c'est un mouvement qui se fait mais où il y a pas de force qui agit dessus pour le faire bouger de son état normal ? Par exemple, si on considère le mouvement, la chute libre qui est liée à la force du poids, ça ferait comme ça [désigne une chute verticale]. Mais si on a une force qui se rajoute de ce côté-là, le mouvement il va faire ça [chute courbe]. A ce moment-là, ça ne sera plus un mouvement naturel, comme c'est défini par Galilée et Aristote. Donc est-ce que le mouvement naturel, c'est vraiment que ça pour eux ou est-ce que euh... enfin est-ce que c'est un mouvement qui n'est pas influencé comme j'ai dit ou c'est un mouvement ou justement il y a aucune force dessus ?

(Paul - TS - D&G9 - S1 - 1 :43 :00)

Plusieurs étudiants de L1 physique comprennent assez rapidement l'apport de la contradiction historique dans la définition du concept de force.

L0 - Qu'est-ce qui a changé ? Comment vous interpréteriez ça ?

L6.1 - Ben ils ont changé euh, ils ont plus la même notion de normalité, pour le... Enfin le mouvement naturel c'est plus le même, du coup, c'est ça ?

(Pierre - L1Phy - D&G6 - S1 - 1 :10 :17)

L0 - Comment on peut interpréter cette contradiction historique ? Entre les deux façons de penser le phénomène.

L2.2 - Ben ils ont pas pris le même mouvement naturel comme référence.

(Clara - L1Phy - D&G2 - S1 - 1 :22 :45)

L3.1 - Il a changé la définition de mouvement naturel

(Werner - L1Phy - D&G3 - S1 - 1 :09 :50)

L3.2 - C'est donc en fait qu'Aristote et Galilée ils avaient pas la même définition de force, que Newton.

(Riccardo - L1Phy - D&G3 - S1 - 1 :12 :12)

L0 - Qu'est-ce que vous penser de cette contradiction ?

L4.1 - J'pense que c'est pas une contradiction si on précise de quel type de force on parle.

(Alexandra - L1Phy - D&G4 - S1 - 1 :08 :28)

Aperçu quantitatif sur la perception

Malgré l'étonnement ou la perplexité face à ce passage lors de sa présentation, celui-ci n'est presque jamais cité parmi les passages perçus comme plus incertain, que ce soit pendant le cours ou avec la synthèse. La diapositive correspondante n'est cependant citée que 6 fois en tant que « bien comprise » chez les lycéens (soit la moitié du maximum obtenu). Elle obtient par contre quasiment le maximum chez les étudiants L1 physique⁵, et le passage correspondant dans la synthèse est également mentionné 6 fois parmi les passages les plus intéressants.

		L1 phy (17)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapo 23 (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	10	4	2
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	0	1	0
	<i>Surpris</i>	2	0	0
Synthèse §9 (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	5	2	0
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	1	0	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	6	0	0

TABLE 6.3 – Perception du passage sur *la contradiction historique de l'interprétation de la chute libre*

6.1.3 La formulation de la première loi comme redéfinition du mouvement naturel de référence

Une fois la contradiction historique présentée, il est demandé aux élèves ce que pourrait être le mouvement naturel dans la théorie de Newton. Parmi les L1 physique, une réponse parfois donnée est celle de l'immobilité. Cependant plusieurs étudiants de chaque groupe proposent le mouvement rectiligne uniforme.

5. Le nombre maximal obtenu pour une diapo (les trois catégories confondues) est de 12/17 pour les L1 physique, et 12/13 pour les lycéens. Pour la synthèse, le maximum obtenu pour un passage (les trois catégories confondues) est de 11/17 pour les L1 physique, et de 8/13 pour les lycéens (seulement pour un passage, ensuite le maximum est de 4).

L0 - Chez Newton, si le mouvement naturel a changé à votre avis qu'est-ce que ce serait le mouvement naturel ?

L6.1 - L'équilibre. Enfin le, quand ça bouge pas du tout.

L0 - Alors ça, c'est un mouvement particulier, mais ça c'était déjà vrai pour Aristote.

L6.1 - Ah oui c'est vrai. Ben juste un mouvement rectiligne uniforme.

(Pierre - L1Phy - D&G6 - S1 - 1 :12 :45)

Est également proposé par un étudiant le cas de la gravité comme mouvement naturel :

L3.2 : Le mouvement sous l'action du poids.

(Riccardo - L1Phy - D&G3 - S1 - 1 :14 :35)

Cette proposition se retrouve dans le groupe de lycéens :

L0 - A votre avis, qu'est-ce que c'est devenu le mouvement naturel chez Newton ?

L9.2 - La force ?

L0 - Alors la force, c'est ce qui permet d'expliquer un mouvement qui est différent d'un mouvement naturel.

L9.6 - Ah la gravité.

L9.4 - C'est un mouvement qui nécessite une seule force

L0 - Non. Alors, là, quand je vous dit ça, le mouvement naturel ça reste le mouvement qu'on ne cherche pas à expliquer.

L9.4 - La chute libre.

L0 - La chute libre c'est un truc qu'on cherche pas à expliquer, un truc auquel on associe pas de force, pour Aristote, Galilée. Mais pour Newton, vous savez déjà, parce que vous avez été à l'école, qu'on parle de force. Mais si on parle de force, alors c'est quoi le mouvement naturel ? c'est plus celui-là, puisqu'on parle de force. Alors c'est lequel ?

L9.4 - Euh ben la gravitation, enfin c'est un mouvement qui nécessite euh...

L0 - Et non parce que la gravitation on dit que c'est une force, le poids c'est une force.

L9.4 - Oui mais c'est un mouvement qui est induit juste par la gravitation, et pas par une autre, par exemple la force d'un lanceur ou, un évènement extérieur. C'est juste la force gravitationnelle qui induit le mouvement, c'est tout.

L0 - Ouais, mais dès que tu dis que c'est la force gravitationnelle qui induit le mouvement, alors ça va être un mouvement qu'on explique avec une force, la force gravitationnelle, donc ça va pas être un mouvement naturel.

L9.4 - Oui mais y a pas de mouvement qu'on peut pas expliquer par la force.

L0 - Ah, ben c'est la question que je vous pose, et je vous le dis : il y en a un. Lequel ?

[Discussion entre eux, personne ne trouve]

(9.4 : Ilias - TS - D&G9 - S1 - 1 :46 :45)

On retrouve dans cette dernière intervention d'élève l'idée que tout mouvement puisse être expliqué en termes de force, vue précédemment avec une étudiante de L1 physique dans la section 6.1.1, p.200. A la suite de la conversation, ce même élève finit par trouver la réponse de lui-même.

L0 - C'est pas forcément évident parce que vous voyez jamais les choses sous cet angle. Donc c'est normal si vous trouvez pas, mais l'important c'est d'y réfléchir, de se poser la question. Vous disiez tout à l'heure, et c'est normal c'est la réaction spontanée : c'est de dire, chez Newton il n'y a plus de mouvement naturel. En fait il y en a un.

L9.4 - Ah ben, le mouvement qui, enfin qui a une trajectoire rectiligne uniforme, par exemple quand on jette un objet dans l'espace et qu'il garde la même trajectoire.

L0 - Voilà.

(9.4 : Ilias - TS - D&G9 - S1 - 1 :48 :10)

6.1.4 La justification de l'interprétation de la chute libre en terme de force

La question qui est ensuite posée aux élèves concerne l'interprétation de la chute libre, dans le cadre de la théorie de Newton.

L0 - Pourquoi la chute libre, on lui associe une force ?

L9.4 - Parce que c'est un mouvement.

L9.6 - Parce que c'est vertical.

L9.1 - Parce que ça bouge.

L9.2 - C'est pas constant !

L9.5 - Parce que la vitesse est pas constante.

L9.3 - Parce que c'est pas le mouvement naturel, donc il y a une force.

L9.1 - Parce que ça bouge.

L0 - ça bouge ? oui mais ça aussi ça bouge [mime d'un mouvement rectiligne uniforme avec la main]

L9.2 - Oui mais ça c'est constant.

L9.7 - y a des variations de vitesse.

L0 - Exactement.

L9.3 - C'est pas le mouvement naturel, du coup si c'est pas le mouvement naturel c'est que y a une force.

L0 - Pourquoi c'est pas le mouvement naturel ?

L9.3 - Parce que le mouvement naturel c'est mouvement rectiligne uniforme.

(9.2 : Aissata - 1^{ère}S - D&G9 - S1 - 1 :54 :22)

La réponse a également été trouvée par la grande majorité des étudiants de L1.

6.1.5 L'usage de la notion de circonstances physiques associées à l'accélération

Réception pendant le cours via les interventions

La notion de circonstances physiques semble avoir posé particulièrement problème à certains étudiants.

L3.1 - je n'ai pas trop compris pourquoi on ne reprend pas dans les circonstances physiques la masse différente.

L0 – Parce que c'est les circonstances physiques associées à l'accélération. Si on revient, c'est une bonne question hein, tu vois c'est « caractériser les circonstances physiques associées à l'accélération » Et là, la masse, en fait, elle n'est pas euh, elle n'est pas associée à l'accélération, dans le sens où si on enlève notre aimant là, et qu'on met plus ou moins de masse, ça ne va rien changer en fait. Donc le seul truc qui est responsable entre guillemets, enfin qui est associé à cette accélération, c'est l'aimant. C'est celui que si tu l'enlèves, ben ça ne va plus se passer, l'accélération. C'est pour ça. La masse, en fait, ici, n'a pas d'influence. On peut déconnecter la masse de la propriété du chariot qui fait qu'il accélère, ce n'est pas la masse, c'est l'aimant. Ouais ? Dis comme ça c'est mieux ?

L3.1 – Plus ou moins parce que si on enlève la masse, ça n'a pas de sens. C'est la même chose.

L0 – Ben si, si j'enlève tout le sable là. . .

L3.1 – Ben non, ça va être la même chose, les circonstances sont identiques. Non ? Ou l'aimant il est différent ? Je ne sais pas.

(Svetlana - L1Phy - D&G3 - S1 - 1.34.12)

La discussion se poursuit ensuite, sans vraiment réussir à convaincre cette étudiante, qui revient sur ce point plus loin dans la suite du cours (20 minutes plus tard) :

L3.1 - j'ai juste un problème avec le mot « circonstances physiques associées à » ; est ce qu'il y a un synonyme, parce que je n'arrive pas à comprendre ? Est-ce que c'est une force extérieure ou qu'est-ce que ?

L0 - Alors, c'est une très bonne question, qu'il faut absolument poser. Effectivement je l'ai pas, alors j'ai donné des exemples, mais je l'ai pas défini précisément. Si je devais le définir, ça sera dans le document que je vais vous donner cet aprem, ce que j'entends par circonstances physiques, c'est la présence et la position de certains objets alentours, soit en contact, soit à distance, leurs propriétés : leur charge, leur masse, leur efficacité, tout ce qu'on veut. Donc c'est un truc concret. [...]

L3.1 - Mais pourquoi on ne peut pas considérer les masses ?

L0 - Si si, les masses aussi.

L3.1 - Mais quand on a fait l'expérience avec le chariot on a dit que c'était pas associé à la masse, l'accélération.

L0 - Oui, pourquoi, parce que si on enlevait les aimants, tu faisais varier la masse, ça faisait rien au niveau de l'accélération, donc c'était pas associé à l'accélération. [...]

(Svetlana - L1Phy - D&G3 - S1 - 1.59.07)

Également dans le groupe de lycéens, ce passage suscite des demandes d'éclaircissement.

L9.1 - Vous entendez quoi par circonstances physiques en fait ?

(Guillaume - TS - D&G9 - S1 - 1 :31 :39)

L9.5 - Est-ce que vous pouvez ré-expliquer s'il vous plait ?

(Nihal - 1^{ère}S - D&G9 - S1 - 1 :32 :41)

Aperçu quantitatif sur la perception

Peu d'étudiants de L1 indiquent cependant une difficulté de compréhension de cet aspect, que ce soit pendant le cours ou sur la synthèse écrite⁶.

6.1.6 Le caractère instantané de la relation $F(t) = ma(t)$

Peu de retours ont été obtenus sur cet aspect pendant le cours. Un témoignage d'étudiant montre pour le moins que le lien avec les exemples de mise en relation non chronologiques (présentés au début du cours) n'est pas inaccessible. Au moment où est abordé la simultanéité de la relation $F(t) = ma(t)$, celui-ci prend la parole et fait spontanément le lien avec la première évocation de cette idée dans le cours :

6. Pour rappel le nombre maximal obtenu pour une diapo (les trois catégories confondues) est de 12/17 pour les L1 physique, et 12/13 pour les lycéens. Pour la synthèse, le maximum obtenu pour un passage (les trois catégories confondues) est de 11/17 pour les L1 physique, et de 8/13 pour les lycéens (seulement pour un passage, ensuite le maximum est 4).

		L1 phy (17)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapo 30 (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	10	4	2
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	3	2	0
	<i>Surpris</i>	2	0	0
Synthèse §21 (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	8	1	0
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	3	4	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	3	1	0

TABLE 6.4 – Perception du passage sur *la construction de la grandeur physique force à partir de l'exemple des chariots*

L2.2 - Ah ouais c'est ce que vous aviez expliqué... que c'était simultanée, que c'est deux phénomènes simultanés, enfin que y en a pas un qui précède l'autre.

(Alexis - L1Phy - D&G2 - S1bis - 22 :30)

Au niveau quantitatif, le passage correspondant dans la synthèse est cité 6 fois comme ayant aidé à comprendre, chez les étudiants de L1 physique, soit plus de la moitié de nombre maximum obtenu (11).

		L1 phy (17)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Synthèse §24 (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	6	1	0
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	0	2	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	1	0	0

TABLE 6.5 – Perception du passage sur *le caractère instantané de la relation $F(t) = ma(t)$*

6.1.7 La définition proposée d'un référentiel galiléen à partir de la notion de circonstances physiques

Réception pendant le cours

Plusieurs retours positifs ont été obtenus à propos de la définition de référentiel galiléen proposée. En particulier l'un des étudiants exprime sa perplexité relativement à la définition usuelle.

L2.2 - Et euh, enfin traditionnellement c'est pas défini comme ça...

L0 - En fait traditionnellement, on dit : un référentiel galiléen c'est un référentiel dans lequel les lois de Newton sont vraies.

L2.2 - Ouais c'est ça, mais là [*en désignant l'autre définition proposée*] je trouve ça beaucoup plus clair en fait, ah ouais vraiment.

L2.1 - oui mais les lois de Newton sont vraies uniquement pour les référentiels galiléens.

L0 - C'est ça, ça se mord la queue en fait, au sens où,

L2.2 - C'est ce qu'ils nous disent tout le temps, mais là au moins ça me parle, d'habitude je le comprends enfin je l'admets, mais là c'est un truc que je vais retenir beaucoup plus facilement.

[...]

L0 - Pour reprendre la définition standard d'un référentiel galiléen, c'est là où une particule libre a un mouvement rectiligne uniforme. Très bien. C'est quoi une particule libre? C'est quand il n'y a pas de force. Et c'est quoi une force? Et ben là la force on ne l'a définie que dans un référentiel galiléen. Et ça se mord là queue, et ça marche pas.

L2.2 - Ah ouais j'avoue moi quand on m'a dit ça pour un référentiel galiléen j'étais un peu euh...

L0 - Mais y a pas que toi hein, il y a plein de philosophes, de physiciens, Henri Poincaré, Hertz, qui avaient détecté ça. Ils disent : mais ça, ça tient pas la route. En fait les gens s'en fichent, parce que c'est des définitions formelles et que au final à la fin ça change rien aux calculs.

L2.2 - Ah non non moi je trouve ça super perturbant, qu'on essaie de construire un raisonnement et après que

L0 - Que y a un truc incohérent quoi.

L2.2 - Ouais je... ça me parle pas, ça me parlait pas quoi.

[...]

L2.1 - Mais du coup ça c'est pas mal comme définition de référentiel galiléen. C'est assez clair du coup.

[...]

L2.2 - Ah ouais ouais moi franchement ça j'aime bien.

(L2.2 : Alexis - L1 Phy - D&G2 - S3 - 14 :00)

Ce passage donne un écho d'étudiants à la remarque de Coelho (2011) :

« Science teaching experts agree that it is important to develop logical and critical thinking. It is, however, difficult to achieve this goal if the issues to be taught include logical or conceptual inconsistencies. Such problems, which have affected the foundations of mechanics for decades, emerge in introductory courses of physics in high school and university textbooks. »
(Coelho, 2011)

Ainsi les problèmes conceptuels de la dynamique, en plus d'être un obstacle à la formation de l'esprit critique, sont également perçus comme « perturbants » par certains étudiants.

Aperçu quantitatif sur la perception

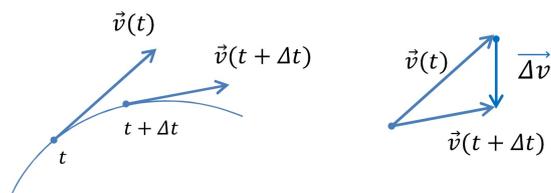
Quantitativement, si la définition est déclarée comme comprise par plus de la moitié des étudiants de L1 pendant le cours, elle n'est que très peu relevée par les lycéens, particulier par les 1^{ère}S. Il est intéressant également de noter qu'un tiers des étudiants mentionnent ce passage comme parmi les plus intéressants.

		L1 phy (17)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapo 48 (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	9	1	2
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	0	0	0
	<i>Surpris</i>	0	0	0
Synthèse §9 (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	6	0	0
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	0	0	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	6	0	0

TABLE 6.6 – Perception du passage sur *la définition proposée d'un référentiel galiléen*

6.1.8 Les difficultés des 1^{ère}S avec le formalisme mathématique

Lors de la séance avec le groupe de lycéens, un temps supplémentaire a été passé au développement de la notion de vecteur variation de vitesse ($\vec{\Delta v}$) et du vecteur accélération. La perception sur la synthèse écrite témoigne que ce passage a été difficile pour les 1^{ère}S. 4/10 indiquent ne pas être sûrs d'avoir compris ce passage (figure 6.1.1) et 8/10 indiquent ne pas être sûrs d'avoir compris le dernier schéma (ayant été développé pendant le cours). Il s'agit du passage le plus cité comme ayant posé des difficultés à la lecture de la synthèse.



Mathématiquement, $\overline{\Delta v}$ est tel que : $\vec{v}(t) + \overline{\Delta v} = \vec{v}(t + \Delta t)$

Le vecteur accélération moyenne pendant l'intervalle de temps Δt est donnée par $\vec{a}_{moy} = \frac{\overline{\Delta v}}{\Delta t}$, il caractérise la variation du mouvement relativement à un mouvement rectiligne uniforme pendant l'intervalle de temps Δt .

Le vecteur accélération instantanée $\vec{a}(t)$ est définie comme la limite de l'accélération moyenne quand l'intervalle de temps devient extrêmement court

(« tend vers zéro ») : $\vec{a}(t) := \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overline{\Delta v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$

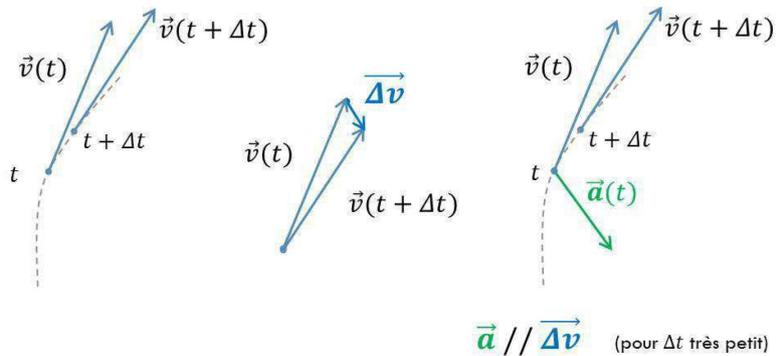


FIGURE 6.1.1 – Passage de la synthèse sur la définition du vecteur accélération

6.2 Résultats aux questionnaires sur la perception de l'approche de la dynamique

6.2.1 Lycéens : perception des différents aspects du cours

Pour le groupe de lycéens, un questionnaire sur la perception des différents aspects du cours a été proposé, voir annexe E p.371.

Il est demandé dans un premier temps d'évaluer chacun des aspects, via la consigne suivante :

- Pour chaque point : dans quelle mesure penses-tu que cet aspect du cours :*
- est important pour la compréhension du sens physique ?
 - est utile dans les situations concrètes ?

Il est ensuite proposé aux élèves d'effectuer deux hiérarchisations des différents aspects, la première au niveau de la compréhension du sens physique, la seconde pour l'utilisation dans les situations concrètes (voir Annexe E p.371). Tous les aspects ne sont pas forcément classés.

- Classe par ordre d'importance (pour toi) les différents aspects :*
- le (ou les) plus important(s) : 1
 - le (ou les) deuxième(s) plus important(s) : 2
 - le (ou les) troisième(s) plus important(s) : 3

Hiérarchisation obtenue pour « la compréhension du sens physique »

Les différents items proposés relatifs à la compréhension du sens physique vont être listés du plus cité au moins cité.

1. La réflexion générale sur la notion d'explication avant d'aborder l'explication du mouvement en termes de forces.
(10/13 en 1^{ère} position, 2/13 en 2^{ème} position).
2. Les schémas qui montrent les liens entre $\vec{\Delta v}$, \vec{a} et \vec{F}^{Newt} .
(9/13 en 1^{ère} position, 1/13 en 2^{ème} position).
3. Le schéma pour déterminer le vecteur $\vec{\Delta v}$, et la relation $\vec{v}(t) + \vec{\Delta v} = \vec{v}(t + \Delta t)$.
(8/13 en 1^{ère} position, 3/13 en 2^{ème} position).

4. La mise en évidence de la contradiction entre les interprétations de la chute libre par Galilée et Newton.
(6/13 en 1^{ère} position, 4/13 en 2^{ème} position).
5. Le fait d'utiliser l'appellation « force au sens de Newton » plutôt que juste « force ».
(6/13 en 1^{ère} position, 2/13 en 2^{ème} position).
6. Le fait de passer du temps sur la construction de la définition de la grandeur physique force au sens de Newton. (Avec les chariots de sable et les aimants).
(5/13 en 1^{ère} position, 5/13 en 2^{ème} position).
7. L'idée que ce qu'on cherche à expliquer est toujours relatif à une situation considérée comme « normale », que l'on ne cherche pas à expliquer. On cherche à expliquer ce qui diffère de cette situation jugée normale.
(3/13 en 1^{ère} position, 3/13 en 2^{ème} position).
8. La notion de mouvement naturel de référence. Le fait que l'on cherche à expliquer en termes de force uniquement les mouvements qui sont différents du mouvement considéré comme naturel.
(2/13 en 1^{ère} position, 8/13 en 2^{ème} position).
9. L'idée qu'une explication consiste à mettre en relation ce qu'on veut expliquer avec quelque chose d'autre.
(0/13 en 1^{ère} position, 4/13 en 2^{ème} position).

Il est intéressant de noter que la réflexion générale sur l'explication soit citée en première position environ autant de fois que les schémas des liens entre vecteurs. Ceux-ci ne sont pas directement relatifs à l'approche proposée, mais ont été ajoutés suite à des expérimentations d'une version antérieure de la séquence dynamique, où le traitement de l'utilisation des vecteurs s'était révélé insuffisant. On constate donc que ces schémas ont été fortement appréciés par les élèves.

Hormis cette tendance, l'hétérogénéité du classement est également intéressante, dans la mesure où l'ensemble des aspects proposés sont des idées fortes de la séquence. A part le dernier point, chacun d'eux est cité au moins 6 fois comme parmi les aspects les plus importants ou les deuxièmes plus importants du cours. Cela indique que l'importance de chacune de ces idées a pu être perçue par un nombre significatif d'élèves.

Seule l'idée du rôle de mise en relation de l'explication, citée uniquement par 4 élèves en deuxième position, semble avoir particulièrement moins marqué les élèves.

Hiérarchisation obtenue pour « l'utilisation dans les situations concrètes »

Dans la seconde hiérarchisation demandée, pour l'utilisation dans les situations concrètes, trois aspects se démarquent particulièrement, les autres fluctuent sans tendance majeure. Il s'agit des trois aspects suivants :

1. Les schémas qui montrent les liens entre $\vec{\Delta v}$, \vec{a} et \vec{F}^{Newt} .
(9/13 en 1^{ère} position, 2/13 en 2^{ème} position).
2. Le schéma pour déterminer le vecteur $\vec{\Delta v}$, et la relation $\vec{v}(t) + \vec{\Delta v} = \vec{v}(t + \Delta t)$.
(9/13 en 1^{ère} position, 1/13 en 2^{ème} position).
3. La mise en évidence de la contradiction entre les interprétations de la chute libre par Galilée et Newton.
(7/13 en 1^{ère} position, 3/13 en 2^{ème} position).

La majorité obtenue pour les schémas concernant les vecteurs est facilement compréhensible, pour ce classement au niveau de l'utilité pratique. Le troisième aspect, plus étonnant, témoigne pour le moins de l'intérêt des élèves pour des considérations épistémologiques, bien qu'il soit difficile d'interpréter ici leur utilité dans des situations concrètes.

Ce questionnaire n'a pas été donné aux étudiants de L1 physique, ayant été conçu plus tard. D'autres questions leur ont cependant été posées relativement à leur cours de lycée et du cours de physique suivi à l'université.

6.2.2 L1 physique : l'approche proposée aurait-elle été accessible au lycée ?

Il a été demandé aux étudiants leur avis sur l'accessibilité du cours :

Penses tu que tu aurais pu suivre ce cours dans le cadre du cours de physique chimie de terminale ? Pourquoi ? (très brièvement)

Sur les 12 étudiants ayant répondu à cette question, 8 ont répondu affirmativement, avec notamment les commentaires suivants :

« Oui. S'il est vrai qu'on étudie les lois de Newton au lycée, il est plus rare d'avoir un cours expliquant le chemin parcouru et les concepts de base de ces lois. Cela resterait dans le programme et faciliterait sûrement la compréhension. »
(Clara - L1Phy)

« Oui car on voit les mêmes choses même si en terminale on nous explique de façon plus rapide les différentes lois. » (Mathilde - L1Phy)

« Oui, ce pourrait bien remplacer un cours classique, car il présente d'une façon plus interactive et intéressante ce sujet. » (Riccardo - L1Phy)

« Oui, certainement. Ce cours ne demande aucune notion inaccessible au lycée. » (Pierre - L1Phy)

« Oui, car le point de vue de départ correspond à des notions très simples à comprendre. Mais il faut avoir le recul nécessaire pour ne pas être parasité par ce que l'on sait déjà. » (Alexandra - L1Phy)

Ce dernier avis est notamment partagé par une autre étudiante :

« CLAIR : Raisonnement/Introduction par étapes fourni (dès le départ). Un certain recul nécessaire à la compréhension globale. MAIS : Il faut avoir été familiarisé avec les lois pour comprendre d'où elles viennent. (A mon avis) un élève lambda de terminale préférera peut-être qu'on lui donne (les lois) directement. » (Delphine - L1Phy)

Quelques étudiants mentionnent par ailleurs la difficulté de la fin du cours :

« Jusqu'à la définition quantitative de la grandeur force ; le reste m'aurait paru trop abstrait » (Werner - L1Phy)

« Oui c'est assez simple sauf vers la fin » (Laviru - L1Phy)

Les élèves répondant négativement font référence au programme de terminale :

« Non puisque certains aspects sortent des objectifs BAC » (Yohan - L1Phy)

« Non parce que tout les cours ne se trouvent pas dans un cours de chimie de terminale » (Ramatoulaye - L1Phy)

6.2.3 L1 physique : ressentis des étudiants à propos des deux approches de la dynamique suivies à l'université

Quelle(s) différence(s) principale(s) trouves-tu entre ce qui a été présenté dans ce cours et le cours sur les lois de Newton que tu as eu en cours d'amphi ce semestre ?

Plusieurs étudiants mentionnent comme différence essentielle l'aspect historique et le rapport à l'origine des lois.

« En amphi le professeur ne nous explique pas comment a évolué les points de vue des scientifiques. » (Mathilde - L1Phy)

« La partie historique et surtout le "processus logique" ont été mieux développés qu'en amphi. » (Riccardo - L1Phy)

« Ces cours sont un peu plus clairs pour comprendre les fondements des lois de Newton » (Éloïse - L1Phy)

« Idem que pour la terminale, on s'interroge plus dans votre cours sur le fondement des lois que l'on ne le fait en amphi. » (Pierre - L1Phy)

« Les formules ne tombent pas du ciel, car dans le cours on a l'explication qui a abouti à de telles formules » (Alexandra - L1Phy)

D'autres étudiants mentionnent l'introduction du concept de force :

« Pas de présentation sur la notion même de force -> plutôt sur l'interprétation des lois, avec p (quantité de mouvement) » (Delphine - L1Phy)

« Plus d'information/explication sur le concept de force au sens de Newton. Plus le lien avec la chute libre. » (Svetlana - L1Phy)

« [...] Il n'y avait pas de modélisation et plus de résolution de problème. Les définitions comme celle du mouvement naturel n'ont pas été données en L1 mais nous avons pu développer la traduction en mathématique. » (Alice - L1Phy)

D'autres questions sur la perception du cours ont été posées, à propos de l'ensemble de la séquence, les réponses seront considérées plus loin, après les résultats concernant la partie sur la gravitation.

6.3 A1 - Activité de recherche de passages dans la synthèse du cours

La première activité proposée aux élèves consiste à travailler sur la synthèse écrite du cours. Celle-ci est donnée à la fin de la partie de la dynamique. Il est demandé pour la séance suivante de lire une première fois cette synthèse, en indiquant leur compréhension et intérêt pour les différents passages, comme expliqué précédemment. Cette première lecture permet une familiarisation avec le texte, avant de le relire avec la consigne de l'activité.

Il est demandé aux élèves de chercher dans le texte des passages précis, contenant les arguments permettant de répondre à plusieurs questions exprimant des doutes ou difficultés relativement à la théorie newtonienne⁷. Cette activité présente essentiellement trois objectifs.

7. La consigne donnée était la suivante : « Quelqu'un qui ne connaît pas ou peu la théorie newtonienne peut se poser certaines questions à son sujet. Pour chacune des questions suivantes, rechercher dans la synthèse les passages précis où il y a les arguments suffisants pour y répondre. Pour chaque question, il peut y avoir plusieurs passages concernés. En particulier, lorsque vous pensez à un passage, demandez-vous s'il n'y en a pas un plus tôt ou plus tard (dans l'ordre du cours) qui apporte un autre élément de réponse. »

- Elle peut permettre en premier lieu de favoriser l'appropriation du cours par les élèves, en leur demandant une attention particulière sur la synthèse.
- Elle permet de plus d'insister sur les idées les plus tenaces du sens commun sur la dynamique, en proposant de les questionner explicitement à partir du cours.
- Du point de vue de l'évaluation de la séquence, cette activité a pour objectif d'évaluer la capacité des élèves, suite au cours, à identifier les arguments permettant de justifier certaines propositions de la théorie, *a priori* non évidentes pour le sens commun.

6.3.1 Méthodologie d'évaluation des réponses des élèves

Pour chaque question, les réponses d'élèves ont été réparties en quatre catégories. Une évaluation des réponses a été effectuée indépendamment par deux chercheurs⁸, afin de permettre une plus grande objectivité dans leur catégorisation. Celle-ci s'est basée sur une mise au point des arguments attendus pour chaque question, ainsi que des passages cohérents qui peuvent être reliés à la question, sans être directement déterminants pour y répondre.

Les quatre catégories utilisées sont les suivantes :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question]⁹,
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

Une évaluation systématique (algorithmique) des différentes réponses, (par exemple en attribuant un certain nombre de points selon les passages présents ou non), n'a pas été envisageable, étant donné la quantité et la complexité de combinaisons possibles. En effet pour une question donnée, bien que plusieurs passages fussent attendus, la manière dont ils étaient combinés avec d'autres passages pouvait fortement modifier

8. L'auteur : Valentin Maron, et le directeur de thèse : Philippe Colin

9. A l'examen des différents cas ayant fait émerger ces deux catégories, il s'est avéré difficile de les hiérarchiser. Il a donc été choisi de les rassembler en une seule catégorie. L'ensemble des combinaisons ayant été catégorisé selon les 4 catégories est disponible dans l'annexe F p.373. Il est facile de reconnaître les combinaisons appartenant à chacune des deux possibilités :

- celles contenant très peu de passages correspondent à la première,
- celles contenant beaucoup de passages correspondent à la seconde.

la pertinence de la réponse globale proposée. Ainsi une évaluation prenant en compte la cohérence de l'ensemble des passages proposés a semblé être la méthodologie la plus pertinente. La comparaison de l'évaluation par deux chercheurs a permis en contrepartie de restreindre le risque de subjectivité de ce jugement d'ensemble.

L'ensemble des combinaisons obtenues pour chaque question et la manière dont elles ont été catégorisées sont disponibles dans l'annexe F p.373.

Les questions seront traitées une par une, en donnant :

- les arguments minimaux attendus,
- la statistique obtenue pour les deux populations ayant effectué l'activité,
- une discussion des points semblant avoir posé particulièrement problème.

6.3.2 Synthèse des résultats obtenus pour chaque question

Question a) : « Pourquoi parle-t-on de force pour la chute libre des objets alors que c'est un mouvement qui a lieu tout seul, de lui-même ? »

Arguments minimaux

Les arguments minimaux attendus pour cette question sont les passages suivants :

« Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme. » § 12 (cf. annexe B p.353)

« Chute libre : la vitesse augmente => interprétation de cette accélération comme associée à une force au sens de Newton, que l'on nomme la force de « poids ». » § 14

Certaines réponses ajoutant d'autres passages ont également été catégorisé en A « arguments pertinents attendus », comme par exemple ici l'ajout des passages suivants :

« L'interprétation d'un phénomène dépend toujours de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter. => Une autre définition de la force chez Newton. » § 10

Ou encore les deux passages suivants :

« La notion de force correspond à ce qui permet d'expliquer un mouvement qui est différent de celui qui aurait lieu de lui-même naturellement, ou encore : d'expliquer la variation d'un mouvement naturel. » § 7

« Définition d'un autre mouvement naturel de référence » § 11

« Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme, incluant le repos » § 12

L'ensemble des réponses d'élèves obtenues et leur catégorisation est disponible dans l'annexe F p.373.

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie sont présentés dans le tableau suivant (6.7).

A1 - a)	L1 phy (17)	Lycéens (11)	
		1^{ère}S (8)	TS (3)
A	9	3	0
B	3	3	3
C	2	1	0
D	2	1	0

TABLE 6.7 – Statistique pour la question a) sur l'interprétation de la chute libre

Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

Les passages pertinents attendus pour cette question ont été trouvés par plus de la moitié des L1 physique, et les réponses d'une majorité des lycéens ont été catégorisés en B. Si les réponses en A et B sont additionnées, cette question est la plus réussie des trois de l'activité.

Une réponse par la conclusion plutôt que par les arguments qui la justifient

Un passage cité quelquefois (3) révèle une difficulté qui va se retrouver à plusieurs reprises dans ce type d'activité (celle-ci et celle analogue pour la partie gravitation, A3). Il s'agit des paragraphes suivants :

« [...] pour Aristote, distinction entre mouvement violent (attribué à une force) et mouvement naturel, n'ayant pas besoin d'être expliqué par une force, en particulier : la chute verticale vers le bas. Façon de voir est encore partagée par Galilée, pour qui la chute est un mouvement naturel et non liée à une force (on parle de « chute libre »).

Dans la théorie de Newton, seulement 50 ans après Galilée, on parle de force pour la chute verticale (« le poids »). [...] »

» §8 et §9, (cf. annexe B p.353)

Ce passage mentionne les deux interprétations possibles de la chute libre citées dans la question posée :

« a) Pourquoi parle-t-on de force pour la chute libre des objets alors que c'est un mouvement qui a lieu tout seul, de lui-même ? »

Répondre à cette question à partir du passage ci-dessus correspond à la déclaration d'une conclusion, alors qu'il est demandé de trouver les *arguments* qui permettent d'arriver à cette conclusion. La consigne est en effet la suivante :

« [...] rechercher dans la synthèse les passages précis où il y a les arguments suffisants pour y répondre. [...] lorsque vous pensez à un passage, demandez-vous s'il n'y en a pas un plus tôt ou plus tard (dans l'ordre du cours) qui apporte un autre élément de réponse. »

Ce type de réponse, qui va se retrouver pour d'autres questions des activités sur la synthèses (A1 et A3), indique peut-être un problème de clarté de la consigne. Celle-ci a en effet une formulation assez longue, qu'il est facile de perdre de vue au moment de la recherche de passage. Il se peut que pour certains élèves, au fil de l'activité, la consigne mémorisée se limite à « trouver les passages faisant référence à tel aspect », perdant de vue l'idée de justification par des arguments.

Un élève fait d'ailleurs une suggestion à ce propos dans les commentaires sur l'activité :

« Le travail en lui-même est simple, rechercher dans un texte. Cependant, je pense que l'on gagnerait en clarté en remplaçant les questions par des phrases de type "Démontrer que..." » (Guillaume - L1Phy)

En plus d'une reformulation de la consigne pour la rendre plus compacte, une piste d'amélioration est de montrer un exemple d'arguments attendus pour une question. C'est une façon de montrer un exemple de réponse par une conclusion, et ainsi d'expliquer que ce n'est pas ce qui est demandé.

Question b) : Comment se fait-il que dans la théorie de Newton la force ne soit pas dans la direction du mouvement de l'objet considéré (c'est-à-dire dans la direction de son vecteur vitesse) ?

Arguments minimaux

Les arguments minimaux attendus pour cette question sont les passages suivants (au moins un de ceux là) :

« Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme » § 12 (cf. annexe B p.353)

« La grandeur force (au sens de Newton), $\vec{F}^{Newton}(t)$, caractérise les circonstances physiques associées au vecteur accélération \vec{a} . » § 19

« D'autre part la grandeur $\vec{F}^{Newton}(t)$ étant définie à partir du vecteur accélération, il s'agit bien d'un vecteur, donc la direction est celle du vecteur accélération, qui en première approximation est la direction du vecteur $\Delta\vec{v}$ (variation du vecteur vitesse), pour un intervalle de temps entre les deux, , suffisamment petit. » § 25 (ainsi que le schéma associé : § 25S)

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie sont présentés dans le tableau suivant (6.8)¹⁰.

Le constat principal concernant cette question est la présence de 5 réponses en D chez les 1^{ère}S. Cette difficulté se retrouve dans les commentaires de l'activité.

Une difficulté à propos de la direction de la force chez plusieurs 1^{ère}S

La question b) est en effet citée 4 fois comme ayant été perçue comme plus difficile par les 1^{ère}S, notamment avec les commentaires suivants :

10. Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

A1 - b)	L1 phy (17)	Lycéens (11)	
		1 ^{ère} S (8)	TS (3)
A	8	1	0
B	1	1	2
C	2	0	1
D	1	5	0

TABLE 6.8 – Statistique pour la question b) à propos d'une force dans la direction du mouvement

« La question b) sur la distinction entre \vec{F}^{Newt} et la direction du mouvement de l'objet. Parce que à mon avis la direction est un élément qui rentre en jeu pour caractériser une force, il ne devrait donc pas avoir de distinction. »

(Aïssata - 1S)

« la question b) car elle demande plusieurs précisions » (Marc - 1S)

« la b) car cela est confus pour moi. » (Paul -1S)

Cette question n'est jamais citée par les L1 physique, à part une fois, positivement :

« La b) m'a permis de réfléchir a un point que je n'avais pas réfléchi. »

(Alexis - L1Phy)

Question c) : Pourquoi la force au sens de Newton à un moment donné ne pourrait pas correspondre à une force communiquée à l'objet antérieurement, responsable de son mouvement ?

Arguments minimaux

Les arguments minimaux attendus pour cette question sont les passages suivants :

« En particulier, après le lancer d'un objet, s'il conserve son mouvement dans la même direction et à la même vitesse (ex : boule de bowling), alors aucune force au sens de Newton n'est associée à ce mouvement. Donc on ne peut pas dire que le lanceur « transmet » de force à l'objet, au sens de Newton. » § 13 (cf. annexe B p.353)

« D'autre part le vecteur accélération étant défini à chaque instant , de même la grandeur force est définie à chaque instant : $\vec{F}^{Newt}(t) := m\vec{a}(t)$. » § 23

« La grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt}(t)$ caractérise ainsi les circonstances physiques associées à l'accélération d'un objet, à l'instant t où

l'on considère cette accélération : $\vec{a}(t)$. La force au sens de Newton ne correspond donc pas à quelque chose qui aurait été transmis plus tôt à l'objet, et pourrait ensuite maintenir le mouvement. » §24

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie est présenté dans le tableau suivant (6.9)¹¹.

A1 - c)	L1 phy (17)	Lycéens (11)	
		1 ^{ère} S (8)	TS (3)
A	10	3	3
B	1	0	0
C	0	0	0
D	0	4	0

TABLE 6.9 – Statistique pour la question c) à propos d'une force transmise antérieurement

Ces passages, *a priori* facile à reconnaître dans la synthèse, ont effectivement été trouvés par la grande majorité des L1 physique ayant répondu à cette question. Quatre des élèves de 1^{ère}S ne les ont cependant pas du tout identifiés.

Une conclusion limitée relativement aux résultats à l'activité

Il est difficile de conclure concernant les résultats obtenus pour cette activité. Le fait que les réponses correspondant précisément aux passages attendus aient été données - en proportion majoritaire chez les L1 physique - témoigne pour le moins de la faisabilité de l'activité : les élèves sont *capables* de trouver les arguments justifiant les aspects évoqués. D'autre part, l'hétérogénéité des résultats - en particulier chez les 1^{ère}S - montre également que les arguments pertinents ne sont pas si aisément repérés.

Les commentaires des élèves sur l'activité apportent cependant des informations intéressantes relativement aux intentions annoncées en introduction.

11. Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

6.3.3 Perception de l'activité A1

Suite à l'activité, il est demandé aux élèves leur perception de celle-ci dans un rapide questionnaire. Il peuvent cocher s'ils l'ont ressentie comme plutôt facile ou difficile, et comme plus ou moins utile pour l'appropriation du cours. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (6.10).

Activité A1 Perception		L1 phy (16)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Difficulté	<i>plutôt facile</i>	8	3	3
	<i>intermédiaire</i>	5	1	0
	<i>plutôt difficile</i>	3	4	0
Utilité	<i>très utile</i>	7	5	0
	<i>utile</i>	7	1	3
	<i>un peu utile</i>	2	1	0
	<i>pas vraiment utile</i>	0	1	0

TABLE 6.10 – Perception de l'activité A1

Une forte majorité d'élèves exprime avoir trouvé cette activité utile ou très utile pour s'approprier le cours. Leurs commentaires sont particulièrement significatifs à ce niveau¹².

L'intérêt de cette activité pour focaliser l'attention des élèves sur le texte de la synthèse, afin de favoriser la compréhension du cours, ressort de nombreux commentaires.

« Le fait de se poser des questions par rapport a la synthèse nous permet de comprendre si on a bien assimilé les concepts principaux. » (Riccardo - L1Phy)

« Cela force à chercher et donc à retenir » (Daïanah- L1Phy)

« Nécessaire pour moi car utiliser le cours pour répondre aux questions m'a permis de finaliser mon apprentissage. » (Alexis - L1Phy)

« Ça force à se replonger dans le cours » (Pierre - L1Phy)

« Elle permet de mettre en relation les différentes parties. Certains sujets sont expliqués ou évoqués puis repris ou poursuivis plus tard dans le cours magistral.

L'activité permet de les retrouver plus facilement. » (Clara - L1Phy)

12. La question était la suivante : « As-tu trouvé que cette activité t'as été utile pour t'approprier le cours? Si oui, peux tu expliquer en quoi cela t'as été utile. »

« Cela m'a été utile car ça permet de revoir les bases de ce qu'on apprend en cours et ça permet surtout de comprendre comment elles ont été trouvées, chose qui n'est pas vraiment fait en cours. » (Mathilde - L1Phy)

« Permet de relire attentivement le texte. » (Maxime - L1Phy)

« A comprendre mieux le cours, les questions guident sur les notions importantes » (Nihal - 1S)

« Ça permet de mieux assimiler le cours. » (Valentine - 1S)

« Elle permet de synthétiser tout le cours et de vérifier la compréhension du cours. » (Philippe - 1S)

« Cela a été utile parce que c'est une relecture forcée mais c'est une relecture "intéressée", on recherche une information donc on ne se concentre pas sur les passages n'y répondant apparemment pas (partie historique) » (Guillaume - TS)

« Cette activité est utile car elle nous demande de réfléchir pour restituer les connaissances du cours, nous imposant de nous l'approprier » (Ilias - TS)

Deux étudiants mentionnent l'idée, dans la formulation des questions, d'expliquer à quelqu'un (« qui aurait des doutes sur la théorie newtonienne » relativement au sens commun)

« Pour expliquer il faut être clair/précis + avoir une vue d'ensemble -> retrouver et s'approprier les bons arguments. » (Delphine - L1Phy)

« C'est en apprenant à autrui que l'on s'approprie le mieux le cours » (Laviru - L1Phy)

Trois des 1^{ère}S expriment que cet activité a permis d'améliorer leur compréhension.

« J'ai pu réaliser comment Newton est arrivé à concevoir les 3 théories, les questions que vous nous avez posées sont les questions que j'aurais pu me poser, l'activité m'a donc permis de mieux comprendre le cours. » (Aïssata - 1S)

« J'ai relu le cours, et j'ai mieux compris les réponses à certaines questions. » (Louise - 1S)

« En recherchant l'information pour la question ça permet de comprendre ce qu'on avait lu sans forcément le comprendre. » (Marc - 1S)

Deux élèves expriment cependant leurs difficultés :

« Il faut que je relise plusieurs fois ou plus longtemps, le travail est très rapide pour moi » (Svetlana - L1Phy)

« J'ai trouvé ça compliqué » (Paul - 1S)

6.4 A2 - Activité de reconstitution de la logique de la séquence : puzzle de cheminement

La seconde activité consiste à faire reconstruire par les élèves la logique du cheminement menant aux lois de Newton, en replaçant les différentes étapes sur un schéma de sa structure (cf. figure 5.2.1 p.188). Dans une première phase, les élèves doivent travailler sur le puzzle individuellement¹³. Il leur est ensuite demandé de constituer des binômes et de comparer leurs puzzles respectifs.

Cette activité présente essentiellement trois objectifs.

- Elle peut permettre en premier lieu de favoriser l'appropriation du cours par les élèves, en leur demandant de rechercher par eux-mêmes les liens logiques entre les différents éléments, permettant de reconstituer le cheminement vu en cours.
- Du point de vue de l'évaluation de la séquence, cette activité permet d'avoir un retour sur la compréhension de la logique globale de la séquence par les élèves.
- De plus la comparaison en binômes a pour but de faire exprimer les arguments que donnent les élèves pour justifier leurs choix, ainsi que ceux qui permettent de les convaincre lors de la discussion.

Groupe témoin pour les L1 physique

Les activités de puzzle (pour la dynamique et pour la gravitation) ont également été réalisées par 6 étudiants de L1 physique, n'ayant pas assisté au cours. Ils ont cependant suivi le cours de mécanique du premier semestre d'université, de même que ceux ayant participé à l'expérimentation. Ce groupe témoin permet de contrôler dans quelle mesure la reconstitution du puzzle peut être faite indépendamment de la séquence. Il est en effet possible d'imaginer que la cohérence des mots-clés - présents dans la structure et dans les différents éléments à positionner - permette à elle-même de placer correctement certains éléments, même sans avoir suivi le cours. Dans ce cas, pour les étudiants ayant suivi la séquence, un éventuel succès pour le placement de ces éléments ne pourra pas être interprété comme un indicateur de la compréhension de ces aspects.

13. La consigne était la suivante : « Positionner chacun des éléments ci-dessous dans le schéma de façon à reconstituer le cheminement du cours. Les numéros correspondent à l'ordre des étapes dans le cheminement (une étape par flèche). Essayer d'abord sans utiliser la synthèse du cours. Puis, si vous en avez besoin vous pouvez l'utiliser. Indiquer par une astérisque (*) les éléments que vous avez positionnés en utilisant la synthèse du cours. »

Reprise des puzzles deux mois plus tard pour les L1 physique

Il a été demandé aux étudiants du groupe de L1 physique de revenir environ deux mois après l'expérimentation pour réaliser à nouveau les activités de puzzles. 15 sur 17 ont acceptés de revenir. Lorsqu'ils ont été recontactés, il ne leur a pas été dit que cela était pour une seconde résolution des puzzles, afin qu'ils ne puissent pas anticiper. Il leur a de plus été dit qu'il n'était pas nécessaire de revoir le cours, et qu'il s'agissait au contraire de voir ce qu'il restait du cours après ces deux mois. Avant de résoudre les puzzles, il leur est demandé dans un rapide questionnaire la dernière fois qu'ils ont revu les documents associés au cours : le diaporama, la synthèse, ou la correction des puzzles, fournis suite à l'expérimentation de la séquence.

6.4.1 Catégorisation des productions d'élèves

Un premier niveau d'évaluation consiste à comparer le puzzle d'un élève avec le schéma de synthèse originel (celui de la fin du chapitre 3, p.109). Pour chaque élément, une réponse en accord avec ce schéma a été catégorisée comme *juste* (J).

Plusieurs catégories ont été faites pour les réponses distinctes de celles attendues :

- *Interversion valide* (I) : la permutation de deux éléments, dans certains cas, a été jugée légitime relativement à la logique globale.
- *Localement cohérente* (L) : une configuration de certains éléments, différente de celle attendue, pouvait parfois être compréhensible, c'est-à-dire avoir localement un sens. Elle implique cependant qu'il est beaucoup plus délicat de positionner les autres éléments de manière pertinente.
- *Fausse* (F) : pour certaine réponse, il n'est pas possible de trouver un sens pertinent à ce choix.

Exemple d'interversion valide

Un exemple d'interversion possible concerne l'étape 4 du schéma (cf. figure 5.2.1 p.188).

L'enchaînement attendu était le suivant :

1. *Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques mises en relation avec la variation du mouvement rectiligne uniforme.*
2. *Définition mathématique de la variation du mouvement rectiligne uniforme en un point : $\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$*

3. *Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques associées à $\vec{a}(t)$.*

Or 7/17 étudiants (L1 physique) ont proposé la permutation des deux derniers :

1. *Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques mises en relation avec la variation du mouvement rectiligne uniforme.*
2. *Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques associées à $\vec{a}(t)$.*
3. *Définition mathématique de la variation du mouvement rectiligne uniforme en un point : $\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$*

Lors de la discussion en binôme, une étudiante exprime en particulier son incertitude sur l'ordre de ces deux éléments. Son binôme, favorable à la seconde option, la justifie ainsi :

« L4.2 - Peut-être au début on prend cette définition de l'accélération et après on précise. » (D&G4 - S2 Delphine-Laviru (D7) - 5 :01)

Cette permutation, n'affectant pas le reste du schéma, a été jugée sans conséquence pour la compréhension de la logique globale. Ainsi dans l'analyse des résultats, les réponses *justes* d'après la correction seront additionnées aux réponses correspondant à une *intervention valide*. Dans le tableau donnant les fréquences obtenues pour chaque catégorie, apparaîtra ainsi directement la catégorie J+I, signifiant que les deux catégories ont été réunies.

Exemple de réponse jugée localement cohérente

Pour la première étape du schéma, certains élèves ont proposé l'enchaînement suivant :

1. *L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu de naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication. (élément déjà placé)*
2. *L'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter.*
3. *Les deux interprétations de la chute verticale. (élément déjà placé)*

Ou encore :

1. *L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu de naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication. (élément déjà placé)*

2. Une autre définition de la notion de force pour Newton, donc une autre définition du mouvement considéré comme naturel.
3. Les deux interprétations de la chute verticale. (élément déjà placé)

Ces deux possibilités pour le second élément, bien que n'étant pas les plus logiques vis à vis de l'enchaînement global, présentent tout de même une certaine cohérence, localement. Elles seront donc distinguées d'une réponse fausse dans la catégorisation.

La répartition selon les différentes catégories proposées de l'ensemble des configurations observées est disponible dans l'annexe G p.375. Celle-ci a été établie à partir d'une première lecture de l'ensemble des puzzles des élèves. Une fois cette répartition effectuée, les réponses données pour chaque élément d'un puzzle ont pu être catégorisées de manière systématique. En pratique, l'ensemble des informations contenu dans chaque puzzle a été converti dans un tableur informatique, avec lequel l'affectation à chaque catégorie a pu être effectuée de manière algorithmique, à partir de la catégorisation prédéfinie.

6.4.2 Statistique globale des résultats obtenus

La catégorisation présentée précédemment va permettre de comparer les différents groupes entre eux :

- les étudiants de L1 physique de l'expérimentation,
- les étudiants de L1 physique du groupe témoin,
- les étudiants de L1 physique de l'expérimentation, deux mois après celle-ci,
- les lycéens (1^{ère}S et TS).

Le puzzle sur la dynamique consiste en 10 éléments. Pour chaque élève, les 10 réponses sont catégorisées en *juste* (J), *interversión valide* (I), *localement cohérente* (L) ou *fausse* (F). Afin de donner un aperçu global de la performance à cette activité dans les différentes situations, le nombre de réponses dans chaque catégorie a été sommé pour l'ensemble des élèves du groupe concerné. Par exemple pour le groupe de L1 physique de 17 étudiants, 170 réponses ont été données, se répartissant selon les quatre catégories. Pour le groupe témoin de 6 étudiants, 60 réponses ont été données. Afin de pouvoir comparer les fréquences obtenues, celles-ci ont été ramenées à un total de 100 réponses, correspondant à un effectif de 10 étudiants.

Le tableau 6.11 donne les fréquences obtenues pour chaque catégorie, pour les étudiants de L1 physique, et le tableau 6.12 celles obtenues pour les lycéens.

Ces résultats semblent indiquer une corrélation assez nette entre le niveau des élèves et la résolution du puzzle. Si en moyenne on obtient presque 3/4 des réponses justes

Activité A2 Fréquences totales obtenues pour chaque catégorie	L1 phy					
	Groupe Exp. (17) (sur 100 réponses)			Groupe Témoin (6) (sur 100 réponses)		
	J+I	L	F	J+I	L	F
Résolution individuelle	71,2	11	17,6	40	12	48,3
Après discussion en binôme	75,3	8,8	16	\emptyset		
Deux mois plus tard (15)	70,6	6,5	23	\emptyset		

TABLE 6.11 – Statistique globale sur l’activité A2, pour le groupe de **L1 physique**. Fréquences totales pour chaque catégorie de réponse : **J+I** : réponse juste ou interversion, **L** : réponse localement cohérente, **F** : réponse fausse

Activité A2 Fréquences totales obtenues pour chaque catégorie	Lycéens					
	1 ^{ère} S (10) (sur 100 réponses)			TS (3) (sur 30 réponses)		
	J+I	L	F	J+I	L	F
Résolution individuelle	50	17	41,3	18	7	5
Après discussion en binôme	47	20	33	20	3	7

TABLE 6.12 – Statistique globale sur l’activité A2, pour le groupe de **lycéens**. Fréquences totales pour chaque catégorie de réponse : **J+I** : réponse juste ou interversion, **L** : réponse localement cohérente, **F** : réponse fausse

pour les L1 physique, la proportion est de 2/3 pour les trois élèves de terminales S, et seulement la moitié de réponses justes pour les 1^{ère}S.

Après la phase de discussion en binôme, aucune augmentation significative n’est observée, chez les trois populations.

Lors de la seconde résolution du puzzle par les L1 physique, environ deux mois plus tard, un nombre total similaire de réponses justes est obtenu. Ce résultat indique une certaine persistance de la compréhension de la logique du schéma, même deux mois après sa résolution. Les réponses aux questionnaires sur le moment de relecture des documents associés au cours sont intéressantes à ce niveau. Elles sont rassemblés dans le tableau 6.13.

Relecture (15 L1 physique)	Synthèse	Diaporama	Puzzles
<i>quelques jours après</i>	4	5	7
<i>environ une semaine après</i>	8	4	4
<i>plusieurs semaines après</i>	3	3	2
<i>il y a quelques jours</i>	1	0	1
<i>ne répond pas</i>	2	4	3

TABLE 6.13 – Relecture des documents associés au cours par les 15 étudiants de L1 physique ayant participé à la seconde résolution du puzzle, deux mois plus tard.

Chacun des 15 étudiants a revu au moins l'un des documents suite à l'expérimentation, entre quelques jours après et quelques semaines plus tard. Il s'agit d'une information intéressante quant à leur intérêt pour la séquence, dans la mesure où aucune suite ni aucune évaluation n'était prévue. Cela est de plus cohérent avec le fait qu'ils aient accepté de revenir pour la seconde session de puzzles.

6.4.3 Statistique obtenue pour chaque emplacement du puzzle

Vont être présentés ici les résultats obtenus indépendamment pour les différents emplacements du schéma. Chacun d'eux est annoté par une lettre en minuscule, suivi du numéro correspondant à l'étape du cheminement dont il fait partie. Les codages pour chacun des emplacements sont donnés dans le schéma de la page suivante.

Les réponses obtenues, emplacement par emplacement, pour les L1 physique, le groupe témoin, et les lycéens, sont représentés dans les diagrammes des figures 6.4.1, 6.4.2 et 6.4.2.

L'ensemble des diagrammes pour les autres situations (puzzle après discussion en binôme, résolution deux mois plus tard) sont disponibles dans l'annexe J p.387.

Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton

Point de départ

1 La notion de force, au sens général : ce qui permet d'expliquer le mouvement.

L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication.

a1 Force (au sens général): concept permettant d'expliquer un mouvement différent du mouvement considéré comme naturel, d'expliquer la « variation » du mouvement naturel.

Interprétation de la chute verticale :

D'Aristote (-300) à Galilée (1630) : mouvement naturel, pas de force.

Newton (1680) : mouvement associé à une force : le poids.

$$\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$$

i6 Puisque les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, les circonstances extérieures au système B sont seulement attribuables au système A, on parle donc de la force exercée par A sur B. Et réciproquement. **J**

3 On explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.
Exemples : mouvement d'un clou ↔ présence et distance d'un aimant
vélo à vitesse constante ↔ le fait de pédaler.

1^{ère} « loi » de Newton (restreinte au référentiel terrestre) :
Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \text{cste}$), incluant le repos ($\vec{v} = \vec{0}$).
Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \text{cste}$).

c2 Une autre définition de la notion de force pour Newton, donc une autre définition du mouvement considéré comme naturel. **C**

b2 L'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter. **B**

i6 Expérimentalement, pour deux systèmes A et B en interaction exclusive, c'est-à-dire dont l'accélération de l'un est liée uniquement à la présence de l'autre, on observe que : $m_A \vec{a}_A = -m_B \vec{a}_B$

6 Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B, notée : $\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$

d3 Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques mises en relation avec la variation du mouvement rectiligne uniforme. **D**
Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, masse...).

f4 Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques associées à $\vec{a}(t)$. **F**

e4 Définition mathématique de la variation du mouvement rectiligne uniforme en un point :
$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$$
 E

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton, \vec{F}^{Newt}

Caractérisation par le vecteur accélération
Exemples : pour différents aimants, différents $\vec{a}(t)$.
Une première façon de quantifier l'« efficacité » de l'aimant (les circonstances physiques associées à l'accélération) est de poser $\vec{F}^{Newt} \propto \vec{a}$.
Une accélération plus grande sera associée à un aimant « plus efficace ».

5 Constat expérimental :
Pour les mêmes circonstances physiques (par ex. les mêmes aimants aux mêmes positions), deux objets de masse différente n'ont pas la même accélération.

95 Pour que la grandeur physique force caractérisée les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques. **G**

h5 Or pour les mêmes circonstances, en un point donné, on observe pour différents objets : $a \propto 1/m$, donc le produit $m \times a$ est invariant pour les mêmes circonstances physiques associées à l'accélération. Ce produit peut donc être utilisé pour définir la grandeur force au sens de Newton. **H**

2^{ème} « loi » de Newton : Définition quantitative de la grandeur physique force au sens de Newton

$$\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$$

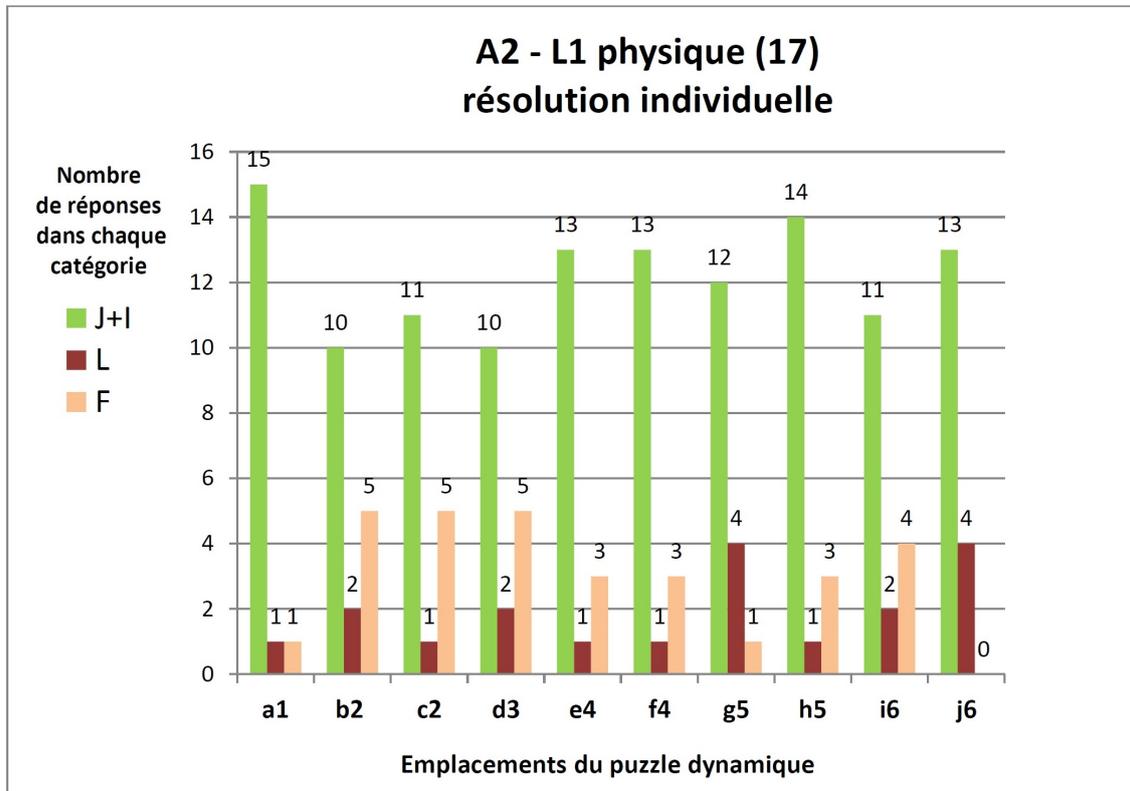


FIGURE 6.4.1 – A2 - Statistique des réponses dans chaque catégorie pour chacun des emplacements du puzzle dynamique, pour le groupe de L1 physique, lors de la résolution individuelle.

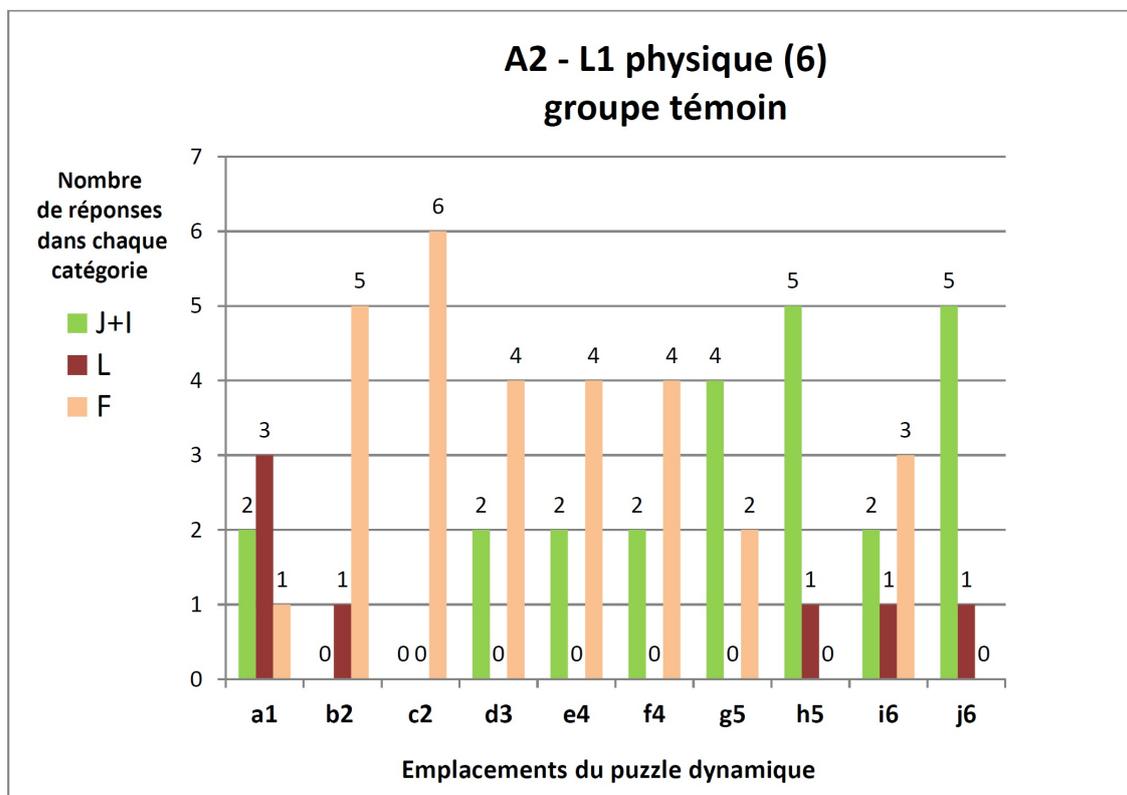


FIGURE 6.4.2 – A2 - Statistique des réponses dans chaque catégorie pour chacun des emplacements du puzzle dynamique, pour le groupe témoin de L1 physique, n'ayant pas suivi la séquence.

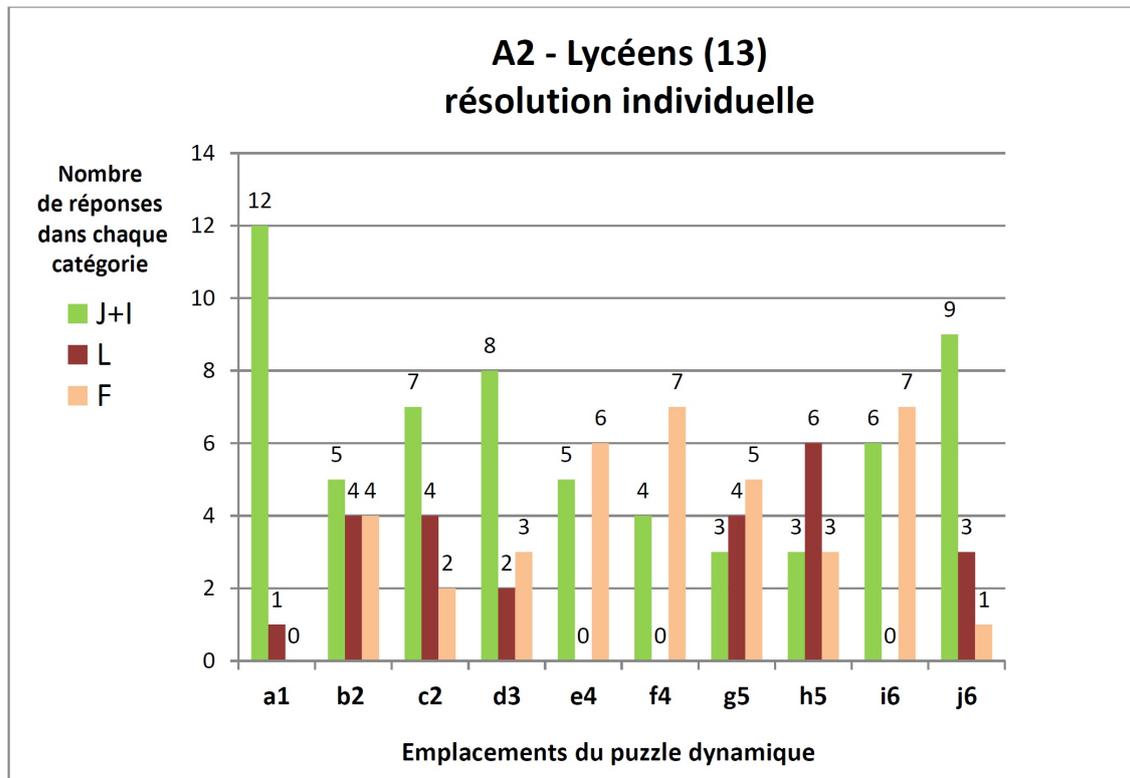


FIGURE 6.4.3 – A2 - Statistique des réponses dans chaque catégorie pour chacun des emplacements du puzzle dynamique, pour le groupe de L1 physique, lors de la résolution individuelle.

Bien que le faible effectif ne permette pas de tirer de conclusion, les productions des étudiants n'ayant pas suivi la séquence (groupe témoin, figure 6.4.2) suggèrent certaines précautions dans l'analyse des réponses des étudiants ayant suivi la séquence.

La difficulté de conclure vis-à-vis des étapes 5 et 6, menant aux deuxième et troisième lois du mouvement

En particulier les éléments placés en g5, h5 et j6 ont été correctement placés pour 4 ou 5 des 6 étudiants du groupe témoin. Il faudrait un effectif plus important pour savoir si cela n'est pas uniquement un effet de hasard, cependant cela laisse penser que les mots-clefs en jeu pourraient suffire à positionner ces éléments aux bons emplacements, même sans connaître le développement de ces étapes présentées dans la séquence. En examinant rétrospectivement le schéma (p.234) avec cette information, il est effectivement compréhensible que ces éléments soient faciles à positionner, uniquement à partir

de la cohérence du schéma et des mots-clefs associés, indépendamment du cours. Ainsi il semble ne pas être possible de considérer que des réponses correctes à ces étapes (5 et 6), pour les élèves ayant suivi la séquence, soit un signe de la compréhension de ces étapes.

Un autre constat vient cependant nuancer ce point de vue. Les éléments g5, h5 et j6 sont également ceux pour lesquels on trouve plusieurs réponses catégorisées *localement cohérente* (en rouge), à la fois chez les L1 physique (figure 6.4.1) et les lycéens (figure 6.4.3). Cela signifie que pour plusieurs élèves, une autre configuration a été proposée, qui n'était ni la réponse attendue, ni nécessairement un choix contraint par l'obligation de placer les derniers éléments, dans la mesure où cette configuration présente une certaine logique, relativement aux éléments avant et/ou après ceux positionnés. La présence de ces réponses localement logiques nuance la facilité de trouver les réponses justes pour ces étapes.

Des résultats relativement positifs pour les étapes 1 et 2, menant à la première loi du mouvement

Pour les étapes 1 et 2, très peu d'étudiants du groupe témoin (2 ou 0 sur 6) n'ont donné les réponses justes. Cela laisse penser, cette fois, que positionner ces éléments n'était pas évident à partir des mots-clefs. Ainsi la réussite relativement bonne des L1 physique pour le placement de ces éléments peut signifier une certaine compréhension de cette articulation logique. Cette tendance semble se confirmer en observant les résultats des L1 physique après discussion (cf. diagramme D2 de l'annexe J p.387). Suite à la discussion en binôme, on observe 5 réponses justes supplémentaires pour les emplacements a1, b2, c2, ce qui représente l'évolution principale ayant eu lieu lors de cette phase de l'activité. Des exemples de discussion menant à ces changements seront présentés dans la section suivante, exemples qui illustrent une bonne compréhension de cette étape.

Le nombre de réponses justes est plus modéré pour les lycéens (en particulier pour b2), et augmente très peu suite à la discussion (cf. diagramme D5 de l'annexe J p.387). Il est cependant supérieur à celui obtenu pour l'étape 4.

La difficulté des lycéens avec l'étape 4, mettant en jeu le vecteur accélération \vec{a}

On constate un assez grand nombre de réponses fausses pour e4 et f4 dans le groupe des lycéens. Cette difficulté peut être reliée aux difficultés ressenties avec le formalisme

mathématique, vue précédemment lors de la notation des passages de la synthèse écrite du cours (cf. p.213).

6.4.4 Comparaison des puzzles en binômes

Chez les L1 physique, on observe sur la note globale du puzzle après discussion :

- 3 fortes augmentations de réponses justes (+4, +7, +5) relativement à la résolution individuelle,
- 1 forte diminution (-6),
- Des variations entre -2 et +2 réponses justes pour les autres.

Chez les lycéens, l'augmentation maximum est de (+3) et une forte diminution est constatée (-6), les autres varient entre +2 et -2.

Ainsi qu'il a été annoncé dans le chapitre précédent, les enregistrements des discussions de binôme se sont révélés difficilement utilisables¹⁴. Quelques passages permettent cependant de montrer des exemples de discussions.

Par exemple pour le binôme Clara-Alexis, l'évolution a été la suivante (tableau 240) :

Activité A2 catégories de réponse :	Clara			Alexis		
	J+I	L	F	J+I	L	F
<i>Résolution individuelle</i>	3	1	6	10	0	0
<i>Après discussion en binôme</i>	10	0	0	10	0	0

TABLE 6.14 – Activité A2 - binôme Clara-Alexis

« Alexis - Donc 1 et 2, on commence vraiment à définir la force, la notion de force, force au sens général, et puis après, c'est vrai que t'as raison, logiquement on arrive à la force au sens de Newton. On a défini qu'une force c'était ce qui expliqué tous les mouvements qui serait pas des mouvements allant d'eux-mêmes, et... mais c'est vrai que j'aurais bien aimé qu'avant il y ait quelque chose qui précise que, pour Newton, le mouvement naturel c'est le mouvement rectiligne uniforme, tu vois? [...] » (L1Phy - D&G2 - S2 Clara-Alexis - 1 :04 :20)

14. A la fois à cause du brouhaha général (plusieurs binômes discutant en même temps), et le fait que les discussions s'appuient sur les puzzles que les élèves ont sous les yeux, ce qui les rend souvent très difficile à interpréter. En particulier les enregistrements des lycées n'ont quasiment pas été exploitables du tout, en raison de la taille du groupe (13 élèves discutant en même temps), malgré qu'il y avait un dictaphone par binôme.

Il s'agit d'un exemple de la compréhension de la logique présentée pour arriver à la première loi de Newton (les deux premières étapes du schéma). Les deux éléments de l'étape 2 (b2 et c2) font effectivement partie des modifications effectuées par Clara.

Un autre exemple d'amélioration suite à la discussion est celui d'Éloïse et Yohann.

Activité A2 catégories de réponse :	Éloïse			Yohann		
	J+I	L	F	J+I	L	F
<i>Résolution individuelle</i>	10	0	0	5	1	4
<i>Après discussion en binôme</i>	8	1	1	10	0	0

TABLE 6.15 – Activité A2 - binôme Éloïse-Yohann

Un passage de la discussion reprend en particulier l'idée du problème de l'interprétation :

« Éloïse - Moi je pense que j'ai bon ici. Parce que la chute verticale au début c'était pas considéré, enfin, que y avait pas de force.

Yohann - C'était considéré comme un mouvement sans force, ouais.

Éloïse - Mais après ça dépend ce qu'ils entendent par force aussi, c'est pour ça que je mets celui-là.

Yohann - ah ouais pas faux, pas faux. Pas faux ouais ouais ouais, il faut que je revoie ça ouais. J'avais pas vu ça comme ça. [...] » (L1Phy - D&G3 - S2 Éloïse-Yohann - 27 :01)

Suite à cette discussion, Yohann donne ensuite les réponses justes pour les emplacements b2 et c2.

Les modifications effectuées par Éloïse, faisant diminuer son nombre de réponses justes de 10 à 8, concernent l'intervention de I et J en j6 et i6. Ces changements témoignent de son incertitude à ce niveau, qu'elle avait d'ailleurs indiquée par une flèche pour ces deux éléments. Son changement correspond aux choix initiaux de Yohann. Étonnamment, Yohann a au contraire été convaincu par la proposition initiale d'Éloïse. L'enregistrement correspondant à ces changements (i6 et j6) n'est malheureusement pas exploitable, faisant trop référence aux positions sur le schéma, sans pouvoir identifier les éléments dont il est question (« si on met celui là ici »...).

Un dernier exemple montre une bonne compréhension de la notion de circonstances physiques par une étudiante. Les deux étudiants avaient proposé tous les deux la configuration juste pour cette étape (h5 et g5), mais Delphine avait indiqué en être sûre (en entourant l'étape correspondante, cf. degré de confiance p.186) tandis que Laviru avait indiqué n'en être pas sûr. Celle-ci essaye alors de le convaincre :

« Delphine - Regarde là, il se trouve que pour les mêmes circonstances, avec des masses différentes, ils ont pas la même accélération. Donc, si tu veux que la force caractérise les circonstances, il faut que tu trouves une constante, quand t'as les circonstances physiques qui sont constantes, qui sont les mêmes, et donc tu entre guillemets rajoute quelque chose, à l'accélération, et donc la masse. Et donc là c'est logique.

Laviru - hm, ouais, ça me semble logique là.

Delphine - donc on est d'accord sur celui-là ?

Laviru - Ouais j'crois que c'est bon, ouais t'as raison. » (L1phy - D&G4 - S2)

Delphine-Laviru - 7 :16)

6.4.5 Perception de l'activité A2

De même que pour l'activité A1, il est demandé aux élèves leur perception de cette activité dans un rapide questionnaire. Il peuvent cocher s'ils l'ont ressentie comme plutôt facile ou difficile, et comme plus ou moins utiles pour l'appropriation du cours. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (6.10).

Activité A2 Perception		L1 phy (16)	Lycéens (11)	
			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Difficulté	<i>plutôt facile</i>	6	1	1
	<i>intermédiaire</i>	1	5	1
	<i>plutôt difficile</i>	8	1	1
Utilité	<i>très utile</i>	5	5	1
	<i>utile</i>	7	1	2
	<i>un peu utile</i>	3	1	0
	<i>pas vraiment utile</i>	1	0	0

TABLE 6.16 – Perception de l'activité A2

Une forte majorité d'élèves exprime avoir trouvé cette activité utile ou très utile pour s'approprier le cours. Certains commentaires mettent l'accent sur le cheminement ou le caractère synthétique de la présentation ¹⁵ :

« Elle permet une réorganisation synthétique du cours magistral. » (Clara - L1Phy)

15. La question était la suivante : « As-tu trouvé que cette activité t'as été utile pour t'approprier le cours ? Si oui, peux tu expliquer en quoi cela t'as été utile. »

« Elle n'apporte pas quelque chose en plus mais quelque chose de différent : elle permet de tout mettre en relation et de former un cheminement de réflexion (idées) menant à un résultat. » (Alice - L1Phy)

« On remet dans l'ordre » (Delphine - L1Phy)

« Ça m'a permis de reconstruire les liens entre les 3 lois de Newton » (Ramantoulaye - L1Phy)

« Remettre les choses dans l'ordre pour bien comprendre » (Nihal - 1S)

« Pour replacer les idées » (Louise - 1S)

Un étudiant mentionne par ailleurs l'importance de la synthèse du cours, utilisée dans l'activité précédente, pour résoudre celle-ci :

« En complément des cours magistraux lire la synthèse m'a énormément aidé mais j'ai passé beaucoup de temps à décortiquer la synthèse. Je pense que cette activité [le puzzle] n'aurait pas été suffisante à ma compréhension du cours si je n'avais pas travaillé ma compréhension de la synthèse chez moi. » (Alexis - L1Phy)

Plusieurs élèves expriment plus généralement que l'activité leur a permis de réfléchir sur le cours, voire même d'aider à sa compréhension :

« Cela m'a permis d'y réfléchir » (Éloïse - L1Phy)

« Permet de réfléchir sur le sens des lois de Newton » (Maxime - L1Phy)

« Cet exercice permet de bien réfléchir sur la suite logique des différentes étapes qui ont ramené aux lois de Newton » (Riccardo - L1Phy)

« C'est une bonne méthode (en plus assez ludique) pour réfléchir sur le cours. » (Pierre - L1Phy)

« Cela m'a permis d'éclaircir plusieurs points » (Valentine - 1S)

« Cette reconstitution m'a permis de bien comprendre les lois de Newton, de plus avec les arguments du binôme, les lois sont plus claires pour nous. » (Aïssata - 1S)

« Elle permet de synthétiser tout le cours et de vérifier la compréhension du cours. » (Philippe - 1S)

D'autres commentaires témoignent de l'intérêt des élèves pour cet exercice :

« Cela m'a captivé » (Paul - 1S)

« C'est une application du cours avec auto-évaluation puis débat, cela force la réflexion donc la maîtrise du sujet. » (Guillaume - TS)

« Pratique pour revoir les notions abordées » (Paul - TS)

« Le fait d'apprendre grâce à un schéma me paraît efficace. » (Mathilde - L1Phy)

Un commentaire oral d'étudiant est par ailleurs particulièrement fort à propos de la généralisation de ce type d'activité :

« L3.1 - Moi j'ai bien aimé aussi cette méthode surtout de retrouver les liens logiques. Moi j'aime bien ça.

L3.2 - Ah ouais c'est trop bien ça

L3.1 - Moi j'aimerais bien que ça soit appliqué sur des autres matières. On pourrait faire ça très bien avec la chimie, euh, déjà chimie physique ça marcherait très bien je trouve, parce que c'est comme ça. Maths, maths aussi moi j'aimerais bien. » (L3.1 : Riccardo - L1Phy - D&G3 - S3 - 2 :43 :50)

6.5 Synthèse des résultats majeurs relativement aux questions de recherche

Les questions de recherche présentées dans le chapitre 5 (p.181) ont orienté la conception des activités et des questionnaires de l'expérimentation. Les résultats principaux décrits précédemment vont être reliés ici relativement aux trois questions de recherche (QR).

6.5.1 Compréhension de la logique globale du cours sur la dynamique

Le première question de recherche concernait la compréhension de la logique globale du cours :

QR1 : Dans quelle mesure la logique globale de la séquence est compréhensible pour les élèves ? Y a-t-il des éléments posant particulièrement problème dans la progression proposée ?

Compréhension globale

L'activité de reconstitution du cheminement menant aux trois lois de Newton (A2), a permis une appréciation de la compréhension de la logique globale de la séquence sur la dynamique. Pour les étudiants de L1 physique, la proportion totale de presque 3/4 de réponses justes constitue un résultat très encourageant, même s'il ne s'agit là que d'une moyenne d'ensemble qui n'indique pas les aspects particuliers pouvant être à l'origine de difficultés. Les réponses des 6 étudiants de L1 physique n'ayant pas suivi la

séquence (groupe témoin), présentant 40% de réponses justes, permettent de prendre la mesure des résultats obtenus avec le groupe expérimental. L'écart de plus de 30% avec les étudiants ayant suivi la séquence montre que celle-ci a effectivement permis de retrouver certains enchaînements logiques corrects. La comparaison des résultats a toutefois mis en évidence que certaines étapes pouvaient être trouvées indépendamment du cours (étapes 5 et 6), et empêche ainsi de conclure vis-à-vis de la compréhension des liens logiques entre ces étapes de la séquence.

Les résultats des lycéens pour cette activité montrent plus de difficultés : 2/3 de réponses justes pour les élèves de terminales S, et seulement la moitié pour les 1^{ère}S. La valeur de ces résultats est cependant limitée étant donné le faible effectif pour l'expérimentation avec lycéens.

Retours principaux concernant des aspects particuliers

Des interventions d'élèves pendant le cours mettent en avant certaines difficultés à prendre en compte lors du travail sur une nouvelle version de la séquence.

La réflexion générale sur la notion d'explication : une inversion de l'ordre des deux idées présentées

A propos de la réflexion générale sur la notion d'explication, *l'idée d'une situation de référence ne nécessitant pas d'être expliquée* s'est révélée pouvoir poser problème, du fait du sens attribué au terme d'explication par les élèves. Une discussion a en effet montré qu'ils peuvent avoir tendance à penser que tout phénomène considéré dans le cadre de la physique peut être considéré comme expliqué. Ce constat incite à aborder en premier la notion d'explication comme mise en relation, afin de pouvoir y faire référence pour développer l'idée de dépendance de l'explication à une situation de référence (cf. 6.1.1 p.200).

Une bonne réception de l'approche proposée pour la définition du concept de force au sens de Newton

Certains des moyens mis en œuvre pour attirer l'attention sur la construction du concept de force se sont révélés assez efficaces. En particulier l'usage de la contradiction historique entre les deux interprétations de la chute libre semble avoir suscité une vive

réflexion chez les élèves, comme en témoignent les discussions rapportées dans la section 3.3.1 p.99.

La formulation de la première loi comme redéfinition du mouvement naturel de référence semble également surprendre les élèves, qui ne s'attendent généralement pas à ce point de vue sur une notion qu'ils connaissaient déjà (cf. 6.1.3 p.206).

Une difficulté de compréhension de la notion de circonstances physiques associées à l'accélération

Bien qu'elle semble avoir été globalement bien perçue, une discussion a révélé une importante difficulté avec la notion de circonstances physiques associées à l'accélération, lors du passage sur la construction de la grandeur force. Cette observation suggère, pour une prochaine version de la séquence, d'essayer d'illustrer cette idée avec plus d'exemples, notamment celui de la force électrostatique (cf. 6.1.5 p.209).

Par ailleurs, certaines questions et discussions témoignent d'une assez bonne réception de la part des élèves des aspects suivants :

Une bonne réception de la définition proposée de référentiel galiléen

Un témoignage montre que les problèmes conceptuels liés aux définitions du principe d'inertie, du concept force et de référentiel galiléen peuvent être effectivement ressentis comme des difficultés par les étudiants. La définition proposée de référentiel galiléen, visant à éviter le problème de circularité, a été très appréciée par l'étudiant exprimant ces difficultés (6.1.7 p.211).

Les difficultés des 1^{ère} S avec le formalisme mathématique

Enfin si la séquence semble avoir été globalement plus difficile pour les élèves de 1^{ère}S, l'aspect le plus problématique pour eux semble avoir été l'utilisation du formalisme mathématique utilisé pour décrire le mouvement, en particulier le vecteur accélération. Cette observation, assez prévisible, permet de confirmer l'importance de ces prérequis mathématiques pour la compréhension globale de la séquence.

Il est intéressant de noter cependant que l'aspect mathématique ne semble pas avoir posé de problème pour les trois élèves de terminale S, indiquant que le niveau mathématique de terminale pourrait suffire. De plus, lorsque questionnés sur la faisabilité

de la séquence en terminale, aucun des étudiants de L1 ne mentionne les difficultés mathématiques, et la majorité d'entre eux (8/12) estime que la séquence aurait été accessible.

6.5.2 Justification des aspects non évidents

QR2 : Dans quelle mesure la séquence permet aux élèves d'identifier les arguments permettant de justifier certains aspects du contenu, a priori non évidents pour le sens commun ?

Cette seconde question de recherche explicite le type de compréhension visée par la séquence développée, relativement aux difficultés identifiées. Elle a permis d'orienter la conception de l'activité de recherche d'arguments dans la synthèse écrite du cours, ce qui représente déjà en soi un apport important pour la séquence.

Des résultats satisfaisants pour une majorité d'étudiants de L1

Le fait que les réponses correspondant précisément aux passages attendus aient été données - en proportion majoritaire chez les L1 physique - témoignent de la faisabilité de l'activité : les élèves sont *capables* de trouver les arguments justifiant les aspects non évidents évoqués. D'autre part, l'hétérogénéité des résultats - en particulier chez les 1^{ère}S - montrent également que retrouver ces arguments n'est pas si facile non plus. Il est possible de supposer que cette activité serait adaptée à un niveau terminale S.

La nécessité de clarifier la consigne pour éviter les réponses par la conclusion

Les résultats et commentaires pour cette activité suggèrent par ailleurs certaines pistes d'amélioration pour la formulation de la consigne et des questions posées. En particulier, certaines réponses d'élèves consistent en des passages effectivement en lien avec l'aspect non évident en question, mais ayant un statut de conclusion dans le cours. Une telle réponse, quand bien même le passage correspondant est pertinent, passe à côté des *arguments* qui permettent d'arriver à cette conclusion (cf. p.222). L'utilisation d'une question résolue, avec un exemple et un contre exemple, est une piste pour éviter ce malentendu sur la consigne.

6.5.3 Perception de cours sur la dynamique

QR3 : Quelle perception ont les élèves des différentes approches proposées ? En particulier relativement à leur expérience passée des cours de physique.

Les réponses aux questionnaires ont mis en évidence un certain intérêt, de la part des L1 physique, pour la compréhension des fondements des lois de Newton (cf. 6.2.3 p.218). La majorité des étudiants déclarent penser que l'approche proposée aurait pu être accessible au lycée. Certains expriment également avoir apprécié le fait de comprendre « comment on a abouti aux formules ». Plus de résultats seront donnés sur cet aspect dans le chapitre suivant, à propos de l'approche globale de la séquence.

Pour les lycéens, l'ensemble des idées fortes de la séquence, hormis celle d'explication comme mise en relation, ont été perçues comme importantes par presque la moitié des élèves (6/13), bien qu'avec une répartition différente pour chaque élève. Une majorité ressort cependant pour la réflexion générale sur l'idée d'explication, ainsi que pour les schémas de synthèse sur les grandeurs vectorielles.

Enfin un fort intérêt a été observé pour les deux activités proposées, jugées très majoritairement utiles ou très utiles par les élèves pour l'appropriation du cours.

Le témoignage spontané d'un étudiant de L1 à la fin de la séquence donne un exemple d'une très bonne réception de plusieurs des intentions de l'approche de la dynamique, autant sur le contenu que la forme des activités, en la mettant en relation avec son expérience des cours de lycée :

L2.2 – J'ai presque l'impression de ne pas faire la même matière si je peux dire. [...] Je ne sais pas les lois de Newton, j'ai l'impression que c'était déconnecté de moi les lois de Newton [...]. Là j'ai l'impression d'une démarche beaucoup plus rigoureuse, beaucoup plus par étapes, vous déroulez votre cours quoi et j'arrive beaucoup plus à suivre. Au lycée, bon ben aussi parce qu'on a plusieurs matières, plusieurs trucs, ils vous crachent un truc et tiens c'est comme ça. Y a pas de compréhension de ce qu'est une force, c'est avant tout savoir ce que c'est les trois lois de Newton, et basta. Mais jusqu'à présent comprendre ce que c'était vraiment la notion de force ce n'était pas si claire que ça. [...] C'est avec ce cours là que ça m'a permis de définir ce que c'était une force. Ce qui m'a vraiment plu c'est justement de définir le mouvement, de savoir qu'on définissait le mouvement par rapport à un mouvement référent, et de savoir du coup que quand on déviait de ce mouvement référent, on avait une force. Ça c'est, en plus, c'est clairement émis et ça me permet vraiment du coup de dérouler quelque chose, on a un axiome, et après de faire de la logique vraiment. Et c'est pareil, ce qui est super c'est que

finalement on se rend compte que Newton garde cette définition générale de la force, mais c'est juste qu'il a changé de référence, de mouvement référent. Et du coup bon ben c'est tout à fait normal d'avoir du coup une vitesse, enfin pardon, de considérer qu'il y a une force dans le mouvement vertical. Là ce qui me plaît c'est qu'enfin, on peut un peu faire des maths si on veut, c'est beaucoup plus euh... et finalement après avec les outils que vous donnez, faire de la réflexion, comme on peut faire de la réflexion à partir de quand il y a des outils qui peuvent pousser à la réflexion. Là on peut faire de la réflexion sans que finalement, je ne sais pas au lycée j'ai toujours l'impression que je ne peux pas justement... faire $1+1=2$, j'ai toujours besoin qu'on me donne la réponse. Qu'on me fasse pour chaque exercice, qu'on m'ait déjà donné un exercice, enfin comment faire tel exercice pour pouvoir le faire et pas m'adapter à telles situations. Enfin moi c'est ce sentiment-là, après je n'étais pas un bon élève, je le suis pas mais c'est là la grosse différence que je trouve. (Alexis - L1Phy - D&G2 (C-A) - 1 :45 :00)

Chapitre 7

Résultats concernant la gravitation

Les retours obtenus pour l'approche de la gravitation seront présentés selon un plan analogue à celui pour l'approche de la dynamique. La méthodologie étant quasiment identique pour les deux approches, celle-ci ne sera pas détaillée à nouveau. Cependant les pages correspondant à la description de cette méthodologie - dans la section précédente - seront systématiquement données, afin de pouvoir y revenir si besoin.

7.1 Retours d'élèves concernant le contenu du cours sur la gravitation

7.1.1 Comparaison des statistiques globales obtenues pour les différentes parties du cours

Une première phase de la séquence complète consiste à présenter un certain nombre d'éléments permettant à la fois de poser le problème de Newton (les liens entre mouvements terrestre et céleste) ainsi que les éléments expérimentaux nécessaires pour la suite de la réflexion.

Cette première partie n'a pas semblé poser de difficultés de compréhension majeures lors de sa présentation dans les différents groupes, pour les L1 physique comme pour les lycéens. Vis-à-vis de la perception des différents passages concernés (diapositives et paragraphes de la synthèse), les nombres totaux de mentions obtenus, selon les catégories proposées (cf. p.6.1), sont donnés dans le tableau 7.1.

Le tableau 7.2 présente les fréquences pour la suite du cours sur la gravitation, située après la partie dynamique, dont le tableau récapitulatif est reproduit à nouveau ici (tableau 7.2) afin de pouvoir les comparer.

La comparaison de ces trois tableaux permet plusieurs constats globaux sur les différentes parties du cours.

Un intérêt plus marqué pour la gravitation de la part des L1 physique

Le nombre total de passages de la synthèse indiqués comme parmi les plus intéressants, par les L1 physique, est nettement plus important pour les deux parties sur la gravitation - plus de la moitié du total de passages mentionnés - (tableaux 7.1 et 7.2, dernière ligne), que pour la dynamique (tableau 7.2) - où elle représentait moins de 1/5 du total des mentions.

Ce constat ne se retrouve pas pour le groupe de lycéens, où les proportions sont similaires pour les trois parties.

Cette observation peut être reliée au fait que le thème de la dynamique est beaucoup moins nouveau pour les L1 physique que pour les lycéens, en particulier les 1^{ère}S, les plus nombreux parmi les lycéens.

Une meilleure compréhension de la partie gravitation pour les lycéens

Les difficultés ressenties pour la partie dynamique de la part des 1^{ère}S - 3 fois plus de passages incertains que de passages bien compris (cf. tableau 7.2) - ne se retrouvent pas pour les parties concernant la gravitation. Les proportions de diapositives indiquées comme « pas tout à fait sûr de comprendre », et de paragraphe de la synthèse « pas sûr d'avoir bien compris, sont en effet très faibles (de l'ordre de 10% du nombre total de mentions pour les différents groupes). L'observation des résultats diapositive par diapositive et paragraphe par paragraphe montre de plus qu'aucune diapositive ni aucun paragraphe ne se démarque particulièrement des autres pour ces catégories de compréhension incertaine. Dans les deux cas, le nombre de mention ne dépasse pas deux.

Ce résultat semble témoigner de l'accessibilité de la partie de la séquence sur la gravitation, même pour des élèves de 1^{ère}S, ce qui n'était pas évident *a priori*.

Statistique globale perception		L1 phy (17) <i>(ramené sur 8)</i>	Lycéens (17)	
La compréhension du monde avant Newton			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapositives (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	36	43	31
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	1	7	0
	<i>Surpris</i>	6,1	13	0
Synthèse (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	3,3	6	0
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	1,9	1	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	10,8	7	2

TABLE 7.1 – **Statistique globale pour la perception de la partie « La compréhension du monde avant Newton »** (partie I). Nombres de mentions obtenues pour les diapositives correspondantes (5 à 15) et les passages (§1 à 4) de la synthèse, ramenés au nombre de 8 élèves pour les L1 physique.

Statistique globale perception		L1 phy (17) <i>(ramené sur 6)</i>	Lycéens (9)	
Reconstruction de la théorie de la gravitation			1 ^{ère} S (6)	TS (3)
Diapositives (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	58,6	54	50
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	2,1	1	0
	<i>Surpris</i>	2,5	8	0
Synthèse (§35 à 78) (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	39,2	27	9
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	12	7	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	64,9	24	19

TABLE 7.2 – **Statistique globale pour la perception de la partie « Reconstruction de la théorie de la gravitation »** (partie III et IV). Nombres de mentions obtenues pour les diapositives correspondantes (49 à 73) et les passages (§35 à 78) de la synthèse, ramenés au nombre de 6 élèves pour les L1 physique.

Statistique globale perception		L1 phy (17) <i>(ramené sur 8)</i>	Lycéens (11)	
Reconstruction de la dynamique			1 ^{ère} S (8)	TS (3)
Diapositives (Perception en temps réel)	<i>Bien compris</i>	107	67	40
	<i>Pas tout à fait sûr de comprendre</i>	11	21	0
	<i>Surpris</i>	3	10	0
Synthèse (Perception de la synthèse écrite)	<i>Passage ayant aidé à comprendre</i>	82	30	1
	<i>Pas sûr d'avoir bien compris</i>	16	92	0
	<i>Parmi les plus intéressants</i>	27	34	14

TABLE 7.3 – **Statistique globale pour la perception de la partie dynamique** (partie II). Nombres de mentions obtenues pour les diapositives correspondantes (17 à 48) et les passages (§5 à 34) de la synthèse, ramenés au nombre de 8 élèves pour les L1 physique.

7.1.2 Le statut de la troisième loi de Kepler

Vont être considérés en particulier les retours d'élèves relatifs à certains choix importants de la séquence sur la gravitation.

En premier lieu, dans la première partie du cours - la compréhension du monde avant Newton - l'un des choix concernait la place de la troisième loi de Kepler. Dans de nombreuses présentations de la gravitation, celle-ci est exposée postérieurement à la formule de la force de gravitation, qui est utilisée pour « démontrer » la relation de Kepler : la troisième loi de Kepler apparaît alors comme une conséquence mathématique (cf. la critique développée p.4.3.5). Au regard de la logique de construction, il a été choisi de présenter les lois de Kepler dès la première partie du cours, afin de pouvoir utiliser la troisième loi pour aboutir à la dépendance en $1/r^2$ de l'accélération centripète des planètes, élément déterminant pour la suite du raisonnement.

De plus, le fait que cette relation soit entièrement basée sur l'observation a été souligné, ainsi que son caractère non intuitif et inattendu. La compréhension du statut de la troisième loi de Kepler a été jugée particulièrement importante pour comprendre la base expérimentale sur laquelle va reposer l'ensemble de raisonnement d'extrapolation et de comparaison. Le caractère inattendu a été notamment perçu par certains des élèves de 1^{ère}S, qui découvraient cette loi pour la première fois.

L0 - [Pour chaque planète] la période elle est différente, la distance au soleil elle est différente, mais il y a un truc qui est pareil, c'est si tu fais la période au carré sur la distance au cube. Mais ça c'est vraiment euh...

L9.1 - ...bizarre.

L0 - Quelque chose de bizarre oui.

L9.1 - Mais d'où lui est venue cette idée ?

L0 - Et ben ça c'est une très bonne question : je sais pas.

L9.2 - La drogue peut-être ?

L0 - En fait si je sais. C'est qu'en fait que le mec, il avait tout testé. Et a un moment donné si tu testes tout... Il a fait ça presque toute ça vie hein.

L9.3 - Ben ça a bien marché pour lui.

L0 - En tout cas tu as bien compris si tu trouves ça bizarre : ça, c'est bizarre. Mais vous allez voir que ça a une conséquence qui est fondamentale.

(L9.1 : Valentine - 1S - D&G9 - S1 - 49 :30)

Un étudiant de L1 physique témoigne de son intérêt pour ce passage du cours.

L3.1- Non mais en fait ce qui était très intéressant là-dedans, c'est qu'on abordait la physique mais d'un point de vue plus chronologique en fait. Parce que,

enfin moi personnellement, en terminale on nous balançait les formules tac voilà Kepler c'est ça, point. Ok mais il a trouvé ça comment ? Là ce qui est bien c'est que je sais comment il l'a trouvé. Alors que bon ben ça peut être un facteur de blocage. Moi j'ai bloqué pendant des années sur Kepler, parce que je ne savais pas comment il avait trouvé. Parce que je trouvais ça trop... T^2/r^3 mais c'est quoi ça ? Pourquoi ? Voilà. Moi on m'a balancé cette formule.

7.1.3 La comparaison entre l'accélération de la Lune et l'accélération de chute verticale

Le passage ayant suscité le plus de questions est également le passage le plus crucial du cours : la comparaison entre l'accélération de la Lune et l'accélération de chute verticale.

Une première observation intéressante est que cette comparaison ait été anticipée par une étudiante pendant le cours, témoignant un recul pertinent sur le problème considéré :

4.1 - Et il a calculé ça dans le cas du système solaire en entier puis dans le cas de Jupiter et... et donc là pour la Lune [...] et du coup il va comparer avec euh, enfin est-ce qu'il va se mettre dans le cadre de la Terre ? avec un truc sur la Terre et un truc sur euh...

(Delphine - L1Phy - D&G4 - S2&3 (D7) 46 :50)

Pourquoi la Lune ne tombe pas ?

Une question d'un élève permet d'aborder une difficulté importante, ayant été posée également dans un autre groupe.

L3.1 – Comment Newton il explique que la Lune ne tombe pas sur la Terre en fait ?

(Maxime - L1Phy - D&G3 - S2 (D3) - 1 :48 :30)

Cette question se retrouve dans de nombreux documents scolaires et extrascolaires sur le thème de la gravitation, ce qui peut être à l'origine de son apparition ici. La réponse donnée à l'étudiant permet d'explicitier la posture adoptée dans la séquence à ce sujet. La transcription du passage est disponible dans l'annexe N p.417.

En résumé, la critique de cette formulation vient de ce qu'elle questionne *un fait*. En effet, pourquoi la Lune devrait-elle tomber, puisque de fait ce n'est pas le cas ?. En particulier cette question n'aurait aucun sens pour Aristote ou pour Galilée, pour qui

le mouvement de révolution est considéré comme naturel. Ainsi le sens de la question repose implicitement sur la connaissance de la conclusion : c'est en supposant l'existence de la force d'attraction *universelle*, et donc l'*attraction de la Lune par la Terre*, que cela prend sens de se demander pourquoi la Lune ne tombe pas. Si sur Terre l'attraction est associée à la chute, comme est-il possible que la Lune, attirée également, ne tombe pas ?

Un tel raisonnement, se basant sur la conclusion, est en opposition avec la logique de reconstruction de la théorie. Dans l'approche proposée, avant d'arriver à la notion d'attraction, le mouvement circulaire est analysé de manière générale, et la notion d'accélération centripète en est simplement une conséquence mathématique. Celle-ci va seulement ensuite pouvoir être reliée à la présence de la Terre, via la comparaison avec l'accélération de chute.

On peut voir dans la suite de la discussion que l'étudiant associe la question de la chute de la Lune sur la Terre à la notion d'accélération centripète elle-même. Le point de vue descriptif adopté à ce niveau semble permettre de le convaincre, en resituant le problème.

L0 – Mais en fait, est-ce que c'est un truc qu'on a besoin d'expliquer ?

L3.1 – Ben un peu quand même.

L0 – Regarde. Qu'est-ce que tu vois ? Tu vois que ça ne tombe pas.

L3.1 – Oui mais, vu qu'il y a l'accélération vers la Terre...

L0 – Oui mais regarde, tu vois que ça ne tombe pas, mais que ça tourne. Et tu te rends compte que quand ça tourne, tu as une accélération vers le centre.

L3.1 – Ouais.

L0 – Donc une accélération centripète n'implique absolument pas que c'est sensé tomber.

L3.1 – Ah ouais...

L0 - Puisque de fait, sans se poser de question, si t'as ton vecteur vitesse qui change, ton accélération elle est par là. Donc on a tout à fait le droit d'avoir une accélération par là et de ne pas tomber, tu vois ?

[...]

Cette approche laisse cependant en suspens la question de comment il est possible d'avoir des mouvements différents avec un même vecteur accélération, c'est-à-dire le rôle de la vitesse initiale. Celle-ci est directement évoquée par un autre étudiant dans la suite de la discussion.

L3.2 – Ça veut dire que la force de la vitesse initiale elle était, elle était vers l'extérieur alors ? La vitesse initiale. Mais si la vitesse initiale était vers l'intérieur

de la Terre ça tendrait à se rapprocher de la Terre non ?

L0 – Ben la vitesse initiale on n'en sait trop rien en fait. Tu vois là on parle de truc, c'est vraiment de la spéculation, on n'a aucune idée de comment elle s'est formée, la Lune [...]

L3.2 – Oui mais pour décrire que le mouvement il est circulaire uniforme, faut le justifier ?

L0 – Il est circulaire uniforme, de fait [...]. Mais ça c'est important cette question parce que, qu'est-ce qu'on a besoin de justifier ou démontrer ? On n'a pas besoin de justifier. C'est comme si on disait « mais faut justifier pourquoi ça tombe ». Non, ça tombe depuis toujours en fait. C'est juste comme ça. Après on l'interprète de différentes façons. Et ici, le fait que c'est un mouvement de révolution, mathématiquement ça correspond à un vecteur accélération dirigé vers le centre.

[...]

L3.2 – Oui mais là pour que ça bouge, il faut qu'on donne une vitesse initiale dessus sinon il sera jamais en mouvement.

L0 – Oui pour le mettre en mouvement mais là nous, on ne peut pas parler de qui c'est qui a mis en mouvement la Lune. Tu vois ? Donc là, on ne peut pas parler de ces choses-là. On peut juste parler du mouvement tel qu'il est, et il a un mouvement circulaire uniforme. Du coup, le seul truc dont on peut parler, c'est tel qu'on l'observe, il est comme ça, donc on sait qu'il a une accélération centripète, mathématiquement. Et donc si on définit la force à partir de l'accélération ben on peut dire qu'il y a une force centripète.

Ces questionnements semblent indiquer l'importance pour les étudiants, de comprendre la possibilité de différents mouvements pour une même accélération. Cela renforce ainsi la motivation pour développer explicitement cet aspect - non abordé à ce stade de la séquence - dans le problème sur l'impesanteur (cf. le paragraphe du même nom p.4.4.2) ¹.

L'extrapolation de la dépendance en $1/r^2$ de l'accélération centripète de la Lune

Une difficulté proche est exprimée par un autre étudiant, vis-à-vis de la comparaison entre l'accélération centripète de la Lune et l'accélération de chute sur Terre. Il semble

1. La question y est en effet explicitement posée, suite au constat que du haut d'une tour de plusieurs milliers de kilomètres - située à l'un des pôles - un objet sans vitesse initiale par rapport à la tour tomberait au sol. La question posée aux élèves est alors la suivante : *Si à n'importe quelle altitude on a une accélération gravitationnelle vers le centre, même dans l'espace, comment se fait-il qu'il puisse y avoir des mouvements de révolution circulaires (comme ceux des satellites) ?* Question menant à la discussion autour du schéma 4.4.1 p.172.

à nouveau que la difficulté vienne du fait de comparer des accélérations de deux mouvements très différents.

Ce problème peut être relié au choix d'utiliser la comparaison des accélérations, plutôt que la comparaison des « distances de chute », prises au sens de l'écart au mouvement rectiligne uniforme. La comparaison des « distances de chute », utilisée par Newton, et reprise dans certains manuels d'enseignement, est probablement plus explicite à ce niveau que l'utilisation des vecteurs accélération. Elle n'a cependant pas été choisie dans cette approche en raison de la difficulté technique supplémentaire qu'elle implique, alors que la comparaison des accélérations est beaucoup plus directe (cf. la justification du paragraphe « Comparaison des accélérations plutôt que des distances de chute » p.151). La réponse donnée à l'élève, à propos de la comparaison d'accélérations de même direction, semble néanmoins être satisfaisante pour lui.

L6.1 Mais euh, tout à l'heure vous avez dit que pour donner naissance à la théorie de la gravitation on avait rien supposé de particulier, mais la dépendance en $1/r^2$ c'est pour un mouvement circulaire, comment il l'extrapole au mouvement rectiligne, pour la chute libre ?

L0 - Euh attends tu peux répéter ta question ?

L6.1 – Comme euh, on a supposé que ça pouvait être extrapolable sans problème, mais la dépendance en r^2 suppose un mouvement circulaire non ? Donc comment il réussit à extrapoler pour un mouvement qui est rectiligne, pour la chute.

L0 – Alors le $1/r^2$ on l'a obtenu effectivement pour un mouvement circulaire uniforme, mais, ce que tu obtiens, ça concerne une accélération, et pourquoi tu peux l'extrapoler, c'est parce que ces accélérations elles ont un point commun, c'est qu'elles ont même direction, elles sont centripètes. Donc en fait, tu as tout à fait raison, c'est deux mouvements qui sont différents, et effectivement c'est ça qui est bloquant, c'était toute la base de la distinction, entre le mouvement vertical et la révolution. Ces mouvements sont différents, mais ils ont un point commun,

L6.1 – l'accélération est centripète pour les deux.

L0 – Et c'est parce que il y a ce point commun,

L6.1 – Que on peut extrapoler comme ça. Oui ben oui, bien sûr.

(Pierre - D&G6 – S2b - 1 :06 :48)

Un fort intérêt pour le passage crucial du lien quantitatif entre les accélérations

Le calcul de la valeur qu'*aurait* l'accélération centripète de la Lune - en supposant sa dépendance en $1/r^2$ - à la surface de la Terre ($a_L \times 60^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$, cf. p.4.3.6), et la conclusion de ce calcul (ci-dessous) semblent avoir marqué une grande partie des élèves.

On retrouve la valeur de l'accélération de chute libre g . On peut donc voir l'accélération de chute libre terrestre comme un cas particulier de l'accélération centripète céleste, lorsqu'on est à la surface de la Terre. § 61 (cf. annexe D p.363)

Chez les L1 physique, il s'agit du passage le plus cité comme « parmi les plus intéressants » sur l'ensemble de la synthèse du cours (dynamique et gravitation) : 12 fois sur 17 étudiants².

Un étudiant témoigne de l'impression particulièrement forte que cette partie lui a laissé lors d'un commentaire écrit :

« J'ai adoré le moment d'illumination pour le calcul de g avec l'accélération de la Lune et le rayon de la Terre. » (Maxime - L1Phy - questionnaire cours)

Il est intéressant de noter que le second passage le plus cité comme parmi les plus intéressants, chez les L1 physique, est le premier de la première partie du cours : « Les arguments justifiant la distinction entre monde terrestre et céleste, pendant l'antiquité », cité 11 fois.

C'est un point remarquable que les passages qui ressortent comme les plus intéressants soient le passage fondant la distinction d'une part, et celui permettant précisément l'unification d'autre part. L'orientation de l'ensemble de la séquence vers le rôle historique d'unification de la théorie de la gravitation, en lien avec les difficultés des élèves à relier les phénomènes sur Terre et dans l'espace, semble pour le moins retenir leur attention.

2. Ce passage est cité seulement 3 fois chez les 9 lycéens, mais il s'agit également de la valeur maximum obtenue. Ceux-ci ont très peu participé dans l'ensemble à l'indication de la perception des passages dans cette partie du cours, relativement à la première partie (dynamique). Cela peut être lié au fait qu'ils aient eu à lire la synthèse directement après le cours, car les deux séances étaient dans la même journée, tandis que les L1 physique ont eu le temps de lire et annoter la synthèse chez eux avant le troisième séance.

Une questionnement sur l'origine de la constante G

A la fin du raisonnement menant à la formule de la gravitation, des questions ont été posées dans deux groupes sur la manière dont la constante de gravitation a été trouvée :

« Comment ils ont trouvé G en fait ? »

(L1Phy - D&G3 - S2 (D2) - 2 :03 :45)

« Là vous avez dit la constante c'est G , mais comment il a été trouvé ? »

(L1Phy - D&G4 - S2&3 (D7) - 1 :11 :10)

Ces questions sont intéressantes dans la mesure où elle prolonge la démarche de justification du cours, visant à établir la provenance du formalisme. La discussion sur l'expérience de Cavendish, développée alors pour ces étudiants, pourrait être intégrée à la séquence, finalisant la reconstruction en expliquant l'origine de la valeur de la constante G . Celle-ci permet, de plus, de confirmer l'hypothèse de l'attraction entre tous les corps, dont le caractère hypothétique a été souligné lors de la phase de généralisation (sachant que des accélérations n'étaient observées que dans le cas où un astre était en jeu). Elle permet de plus d'ouvrir sur la possibilité de déterminer la masse de la Terre, ainsi que de tous les autres astres du système solaire, de proche en proche, cette détermination n'étant possible qu'à partir de la connaissance de la valeur de la constante G .

7.2 Résultats aux questionnaires sur la perception de l'approche de la gravitation

A l'issue de la seconde partie du cours, les mêmes questions ont été posées que pour la première partie du cours.

7.2.1 L1 physique : quelle différence avec les cours suivis au lycée sur ce sujet ?

La première question posée aux étudiants sur le cours concernait sa comparaison aux cours de lycée.

Quelle(s) différence(s) principale(s) trouves-tu entre ce qui a été présenté dans ce cours et le cours sur la gravitation que tu as eu en Première ou Terminale ?

Un commentaire évoque la forme du cours :

« L'utilisation de diapos, une synthèse rédigée par le prof, une activité qui s'intéresse uniquement à l'assimilation du cours. » (Alexis - L1Phy)

Certains étudiants font explicitement référence au lien entre phénomènes terrestre et céleste :

« Au lycée les formules étaient données sans contexte et la partie historique absente. Nous n'avons pas expliqué pourquoi les lois étaient vraies dans l'espace et sur Terre. » (Alice - L1Phy)

« L'évolution, au lycée on "jette" les formules, c'est bien pratique mais on ne sait pas d'où ça vient. On ne sait pas que c'est universel, on part du principe que tout est comme sur la Terre. » (Daïanah - L1Phy)

La plupart des commentaires évoque la démarche de reconstruction de la théorie :

« - La présence d'explication des relations mathématiques avec de la géométrie simple.

- Le système d'extrapolation.

- La décomposition de $F=Gmm/r^2$ » (Clara - L1Phy)

« Ce cours est plus historique et logique mais moins algébrique. Ce cours donne une chronologie et un cheminement logique des données » (Juliette - L1Phy)

« Je crois que quand une démonstration mathématique ne suffit pas pour justifier une formule, une démarche plus physicienne qui prend en compte les maths et l'observation n'est pas adoptée dans le cours de lycée. » (Alexis - L1Phy)

« Comment les équations on été trouvées. » (Maxime - L1Phy)

« Ce cours va beaucoup plus dans le détail que le cours de terminale (même si les lois de Kepler et Newton y sont enseignées). L'idée d'expliquer d'où provient la loi est excellente je trouve. » (Pierre - L1Phy)

7.2.2 L1 physique : l'approche proposée aurait-t-elle été accessible au lycée ?

Il est demandé également aux étudiants leur avis sur l'accessibilité du cours :

Penses-tu que tu aurais pu suivre ce cours dans le cadre du cours de physique chimie de terminale ? Pourquoi ? (très brièvement)

Sur les 13 étudiants ayant répondu à cette question, 10 ont répondu affirmativement, avec notamment les commentaires suivants :

« Oui car j'aurais bien aimé savoir ça avant » (Maxime - L1Phy)

« Oui, il s'inscrit dans le programme, n'est pas plus complexe. Enseigne une façon de penser plus qu'un savoir. »³ (Alexis - L1Phy)

« Oui, car le raisonnement des idées est fluide. » (Alice - L1Phy)

« Oui, il est bien expliqué et repart des bases. De plus en terminale les notions nécessaires à la compréhension de votre cours sont acquises. » (Clara - L1Phy)

« Oui car pour comprendre ce cours il faut utiliser principalement de la logique et il donne aussi une bonne introduction à la mécanique newtonienne » (Juliette - L1Phy)

Certains sont cependant plus modérés :

« Oui, (en y mettant un peu d'effort), les quelques étapes de maths aurait pu poser problème. » (Werner -L1Phy)

« Moi , oui, parce que ça m'intéresse vraiment, mais étant donné que c'est un peu compliqué, il faudrait que cela soit une méthode globale d'enseignement. » (Daïanah - L1Phy)

Comme pour la partie précédente, les réponses négatives, lorsque commentées, font référence au programme :

« Non, hors programme. » (Yohann - L1Phy)

3. Ce commentaire peut être rapproché de la citation de Weil-Barais and Lemeignan (1993) rapporté dans le chapitre 2 : « La manière habituelle de présenter les programmes ou de rédiger les manuels fait oublier une chose essentielle : la physique est une construction de l'esprit. Cette construction aboutit bien sûr aux concepts et aux théories, aux lois ainsi qu'aux principes que tout professeur connaît. [...] L'important dans cette affaire n'est pas tant l'énoncé des contenus mais la pensée qui le sous-tend. » Weil-Barais and Lemeignan (1993)

Les questions posées aux élèves de lycée ont concerné l'approche globale de la séquence - dynamique et gravitation - et seront présentées à la fin du chapitre.

7.3 A3 - Activité de recherche de passages dans la synthèse du cours

Suite à la seconde partie de la séquence sur la gravitation, les activités proposées aux élèves sont analogues à celles de la partie dynamique, dont les résultats ont été présentés précédemment.

La première activité consiste à travailler sur la synthèse écrite du cours. Il est demandé aux élèves de chercher dans le texte des passages précis, contenant les arguments permettant de répondre à plusieurs questions exprimant des doutes ou difficultés relativement à la théorie newtonienne⁴.

La méthodologie d'évaluation est identique à celle de l'activité équivalente pour la dynamique (A1), présentée p.220.

Pour chaque question, les réponses d'élèves ont été réparties en quatre catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

L'ensemble des combinaisons obtenues pour chaque question et la manière dont elles ont été catégorisées sont disponibles dans l'annexe H p.379.

Les questions seront traitées une par une, en donnant :

- les arguments minimaux attendus,
- la statistique obtenue pour les deux populations ayant effectué l'activité,
- une discussion des points semblant avoir posé particulièrement problème.

4. La consigne donnée était la suivante : « Quelqu'un qui ne connaît pas ou peu la théorie newtonienne peut se poser certaines questions à son sujet. Pour chacune des questions suivantes, rechercher dans la synthèse les passages précis où il y a les arguments suffisants pour y répondre. Pour chaque question, il peut y avoir plusieurs passages concernés. En particulier, lorsque vous pensez à un passage, demandez-vous s'il n'y en a pas un plus tôt ou plus tard (dans l'ordre du cours) qui apporte un autre élément de réponse. »

7.3.1 Synthèse des résultats obtenus pour chaque question

Question d) : « Les mouvements de chute libre sur Terre et de révolution des planètes semblent *a priori* très différents. Quels liens peut-on voir entre les deux ? »

Arguments attendus

Lors de l'analyse, il a été réalisé que cette question pouvait poser problème, dans la mesure où le moment d'établissement du lien dans le cours concerne le cas de la Lune, avant de l'étendre aux planètes. En particulier la comparaison de la direction des vecteurs accélération s'effectue entre l'accélération centripète de la Lune et l'accélération de chute sur Terre. Ainsi d'après la formulation de la question il n'est pas évident de savoir si ce passage peut être intégré parmi les arguments attendus. Pour une prochaine version de la séquence, ce problème pourrait être évité en remplaçant « planètes » par « astres » dans la question, de façon à intégrer le cas de la Lune.

Cependant, le passage de la comparaison quantitative reste le plus pertinent comme réponse à la question posée :

« La loi $a \propto 1/r^2$ est valable pour les planètes autour du Soleil, pour les satellites de Jupiter autour de Jupiter. On peut faire l'hypothèse que cela est vraiment également pour le cas de la Lune, qui est également un satellite, celui de la Terre.

Sachant que $R_{Terre} = 1/60 r_L$, en supposant que l'accélération centripète de la Lune varie en $1/r^2$, sa valeur à la surface de la Terre vaudrait $a_L \times 60^2$. Or $a_L \times 60^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$.

On retrouve la valeur de l'accélération de chute libre g . On peut donc voir l'accélération de chute libre terrestre comme un cas particulier de l'accélération centripète céleste, lorsqu'on est à la surface de la Terre. » § 60, 61, 62 (cf. annexe D p.363)

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie sont présentés dans le tableau suivant (7.4)⁵

A3 - d)	L1 phy (17)	Lycéens (9)	
		1 ^{ère} S (6)	TS (3)
A	5	0	1
B	4	2	0
C	5	1	2
D	1	1	0

TABLE 7.4 – Statistique pour la question d) sur le lien entre mouvement de chute et révolution des planètes

Les résultats assez hétérogènes pour cette question peuvent peut-être être attribués à l'ambiguïté de la question abordée précédemment : le fait que la Lune ne soit pas mentionnée, alors que les passages correspondants concernent essentiellement le cas de la Lune. La variété des combinaisons obtenues (28 réponses différentes, cf. annexe H p.379), et la difficulté de les catégoriser peuvent en partie expliquer l'hétérogénéité de ce résultat.

Question e) : Pourquoi ne peut-on pas considérer, comme dans l'Antiquité, que les lois de la physique ne concernent que les phénomènes sur Terre et ne s'appliquent pas aux phénomènes dans l'espace ?

Arguments attendus

Les arguments attendus pour cette question sont également ceux de la question précédente (§ 60, 61, 62). Ont également été ajoutés les passages suivants, qui sont à la fois des conclusions du raisonnement et des arguments pour répondre à la question posée :

« Conclusion : l'accélération de chute libre des objets sur Terre g et l'accélération centripète de la Lune a_L sont liées aux mêmes types de circonstances

5. Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

physiques, dont leur distance au centre de la Terre. » § 63⁶

« 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, puisque toutes ces accélérations sont finalement des cas particuliers d'un même type de phénomène. » § 72 (cf. annexe D p.363)

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie sont présentés dans le tableau suivant (7.5)⁷.

A3 - e)	L1 phy (17)	Lycéens (9)	
		1 ^{ère} S (6)	TS (3)
A	0	1	0
B	4	0	2
C	6	3	0
D	5	0	1

TABLE 7.5 – Statistique pour la question e) à propos de la validité des lois physiques terrestres dans l'espace

La faible performance à cette question peut indiquer une difficulté liée à la formulation de la question, assez large, et plus éloignée du cours *a priori*. Il est de plus possible que les élèves se soient implicitement attendus à donner d'autres arguments que ceux déjà donnés pour la question précédente, alors que plusieurs des passages possibles étaient communs aux deux. Or la possibilité que les mêmes passages puissent servir à plusieurs questions n'était pas explicitement indiqué, ce qui a pu induire en erreur.

Par ailleurs, plusieurs élèves ont donné comme réponse le passage sur la troisième loi de Kepler. Ce choix peut indiquer une certaine interprétation de la question : une relation mathématique correspondant aux mouvements des planètes peut montrer qu'ils puissent également y avoir des *lois physiques* pour les phénomènes dans l'espace.

6. cf. Annexe : Synthèse partie 2, p.

7. Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

Ces différentes sources de confusion possibles incitent à reconsidérer la pertinence de cette question dans cette activité.

Question f) : Peut-on dire que la chute libre soit due à la pression atmosphérique, puisqu'elle a lieu seulement dans l'atmosphère, où il y a de l'air ?

Arguments attendus

Contrairement aux questions précédentes, le passage attendu pour cette question est assez univoque, bien que ni l'air ni l'atmosphère ne soient explicitement évoqués :

« Le phénomène de chute libre peut avoir lieu de la même façon partout sur Terre, quelle que soit les types de matériaux. On pourrait donc supposer qu'il est associé à des circonstances physiques qui sont toujours présentes à la surface de la Terre. 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. » § 65 (début) (cf. annexe D p.363)

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie sont présentés dans le tableau suivant(7.6) ⁸.

A3 - f)	L1 phy (17)	Lycéens (9)	
		1 ^{ère} S (6)	TS (3)
A	6	0	2
B	4	0	1
C	1	1	1
D	3	4	0

TABLE 7.6 – Statistique pour la question f) à propos du rôle de l'air dans la chute

8. Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

Le fait que le passage ait été trouvé par 6 étudiants de L1 physique montre qu'il est possible de le relier à la question du rôle de l'air. Les résultats restent cependant assez hétérogènes. Cette question a été nettement plus difficile pour les 1^{ère}S, mais la faiblesse de l'effectif ne permet pas d'aller au delà de ce constat.

Question g) : Pourquoi peut-on dire à propos de la force s'exerçant sur un objet en chute libre qu'il est attiré par la Terre? C'est tout de même étonnant d'associer un phénomène aussi courant que la chute des objets, à un quelque chose d'aussi énormément plus gros que ces objets : la planète Terre elle-même.

Arguments attendus

De même que pour la question précédente, le passage attendu pour cette question est assez précis :

« 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. » § 65 (fin) (cf. annexe D p.363)

Statistique

Les effectifs obtenus pour chaque catégorie sont présentés dans le tableau suivant(7.7) ⁹. La quantité de réponses sans rapport avec la question, pour les L1 physique, est fortement significative pour cette question. Plusieurs interprétations peuvent être proposées. En premier lieu, un effet de lassitude peut éventuellement entrer en jeu, s'agissant de la dernière question de l'activité. De plus la formulation de la question, assez lourde, n'est probablement pas optimale par ailleurs.

9. Rappel des catégories :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajoutés] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

A3 - g)	L1 phy (17)	Lycéens (9)	
		1 ^{ère} S (6)	TS (3)
A	2	3	1
B	2	0	0
C	0	0	0
D	10	1	1

TABLE 7.7 – Statistique pour la question g) à propos de l’attraction terrestre

Vis-à-vis du contenu, le passage concernant l’explicitation de l’expression « force exercée par », nécessaire pour cette question, fait partie de la première partie du cours sur la dynamique. Il se situe donc en amont des nombreux passages consacrés à la partie gravitation. Il est possible également que ce passage n’ait pas été suffisamment développé, ni dans la partie dynamique, ni dans la partie gravitation pour le cas de l’attraction terrestre.

Le fait que 3 des 6 élèves de 1^{ère}S aient trouvé le passage, peut être le signe que cette notion ait été plus détaillée à l’oral lors du cours. L’expérimentation avec les lycéens a en effet eu lieu 6 mois plus tard que celle avec les L1 physique. Il se peut que la perception de la difficulté concernant la notion de « force exercée par », ait impliqué un réajustement sur le temps passé à la clarifier. Un retour sur l’enregistrement de cette partie pourrait constituer une piste, dans un travail ultérieur, pour réfléchir sur la présentation de cet aspect.

7.3.2 Statistique globale sur l’activité A3

Les tableaux 7.8 et 7.9 donne une vue d’ensemble des résultats des activités de recherche d’arguments dans la synthèse, A1 et A3.

A1 a) + b) + c)	L1 phy (17)	Lycéens (9)	
		1 ^{ère} S (6)	TS (3)
A	27	7	3
B	5	4	5
C	4	1	1
D	3	10	0

TABLE 7.8 – Statistique pour l’ensemble des questions de l’activité A1 : a), b) et c)

On peut voir que la performance à l’activité A1 est nettement supérieure pour les étudiants de L1 que celle pour l’activité A3. Cela peut être associé à leur plus grande

A3 d) + g) + e) + f)	L1 phy (17)	Lycéens (9)	
		1^{ère}S (6)	TS (3)
A	13	4	4
B	14	2	3
C	12	5	2
D	19	6	2

TABLE 7.9 – Statistique pour l’ensemble des questions de l’activité A3 : d), e), f), et g)

familiarité avec la dynamique. Le contraste n’est pas aussi net pour les lycéens, où les différences entre les résultats de A1 et A3 sont moins marquées, et les performances pour A3 globalement supérieures. Ainsi que cela a été vu précédemment, cette dernière observation peut être liée au recul supplémentaire sur la séquence, de la part de l’enseignant, suite aux retours obtenus lors de la première expérimentation avec les L1 physique.

7.3.3 Perception de l’activité A3

Suite à l’activité A3, il est demandé aux élèves leur perception de celle-ci dans un rapide questionnaire. Ils peuvent cocher s’ils l’ont ressentie comme plutôt facile ou difficile, et comme plus ou moins utile pour l’appropriation du cours. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (7.10).

Activité A3 Perception		L1 phy (15)	Lycéens (9)	
			1^{ère}S (6)	TS (3)
Difficulté	<i>plutôt facile</i>	6	1	3
	<i>intermédiaire</i>	0	2	0
	<i>plutôt difficile</i>	9	3	0
Utilité	<i>très utile</i>	2	2	1
	<i>utile</i>	10	3	1
	<i>un peu utile</i>	2	1	1
	<i>pas vraiment utile</i>	1	0	0

TABLE 7.10 – Perception de l’activité A3

Le nombre important de réponses fausses obtenues pour les étudiants de L1 physique se retrouve dans leur perception de la difficulté de cette activité : 9 étudiants mentionnent

l'avoir perçue comme plutôt difficile, pour seulement 3 étudiants pour l'activité A1 sur la partie dynamique (cf. tableau 6.10 p.227).

Tandis que pour l'activité A1, 12 élèves en tout la jugeaient très utile pour l'appropriation du cours, il y en a seulement 5 pour celle-ci. 14 élèves la jugent tout de même utile (8 pour A1). Ce jugement sur l'utilité peut être mis en relation avec la perception de la difficulté : il n'est pas évident pour un élève ayant eu beaucoup de mal avec cette activité à percevoir son utilité.

Les commentaires des élèves sur la difficulté de l'activité évoque notamment la précision des questions.

« difficile de donner des réponses aussi précises que les questions. » (Werner - L1Phy)

« Plus difficile que la première partie car les questions sont plus précises » (Clara - L1Phy)

« Les réponses sont plus subtiles » (Alice - L1Phy)

La proximité de certaines questions a également été mentionnée comme problématique :

« J'ai trouvé cette activité plus dure par rapport a celle qu'on a fait sur la partie 1 car les questions étaient plutôt similaires, dans le sens où on pouvait utiliser les mêmes phrases pour différentes questions » (Riccardo - L1Phy)

« Les questions sont posées de manière très compliquée pour moi (il fallait que je relise la même question plusieurs fois). (d) et (e) sont trop semblables pour moi. » (Svetlana - L1Phy)

« Beaucoup d'info. Questions presque pareilles mais pas pareilles » (Delphine - L1Phy)

Ces mêmes étudiants évoquent cependant le fait que l'activité permette de s'approprier le texte de la synthèse¹⁰ :

« C'est un exercice qui te forme à "extrapoler" les informations d'un texte et qui te permet donc de mieux l'analyser et le comprendre. » (Riccardo - L1Phy)

« Car je relis la synthèse, je la comprends de mieux en mieux. » (Svetlana - L1Phy)

« On relit beaucoup la synthèse pour chercher » (Delphine - L1Phy)

10. La question était la suivante : « As-tu trouvé que cette activité t'as été utile pour t'approprier le cours? Si oui, peux tu expliquer en quoi cela t'as été utile. »

« On apprend différemment à se remémorer le cours. Comme on se le dit nous-même, on le retient mieux. » (Daïanah - L1Phy)

« Il oblige à se plonger dans le cours » (Pierre - L1Phy)

D'autres commentaires vis-à-vis de l'utilité de la séquence sont intéressants, à la fois au niveau général, et sur des aspects du contenu en particulier.

« Pas pour la compréhension mais elle l'a été pour savoir si j'avais compris ou non le cours et savoir à quel point les sujets sont maîtrisés » (Alice - L1Phy)

« Cela est utile pour comprendre le détail du cours (la précédente était plus axée sur la compréhension globale) » (Clara - L1Phy)

« Utile pour faire personnellement le lien entre des questions et le cours. » (Juliette - L1Phy)

« Cela permet de comprendre un peu plus sur la chute libre. » (Éloïse - L1Phy)

« Le fait de savoir les liens entre la chute libre sur Terre et la révolution des astres dans le ciel. » (Ramatoulaye - L1Phy)

7.4 A4 - Activité de reconstitution de la logique de la séquence : puzzle de cheminement

La seconde activité consiste à faire reconstruire par les élèves la logique du cheminement menant à la force de gravitation universelle, en replaçant les différentes étapes sur un schéma de sa structure (cf. figure 5.2.2 p.190). Dans une première phase, les élèves doivent travailler sur le puzzle individuellement¹¹. Il leur est ensuite demandé de constituer des binômes et de comparer leurs puzzles respectifs.

De même que pour l'activité équivalente pour la dynamique, celle-ci a été effectuée par 6 étudiants de L1 physique n'ayant pas suivi la séquence (groupe témoin). Elle a également été refaite par 15 des 17 étudiants de L1 physique, environ deux mois après l'expérimentation.

11. La consigne était la suivante : « Positionner chacun des éléments ci-dessous dans le schéma de façon à reconstituer le cheminement du cours. Les numéros correspondent à l'ordre des étapes dans le cheminement (une étape par flèche). Essayer d'abord sans utiliser la synthèse du cours. Puis, si vous en avez besoin vous pouvez l'utiliser. Indiquer par une astérisque (*) les éléments que vous avez positionnés en utilisant la synthèse du cours. »

Catégorisation des productions d'élèves

Un premier niveau d'évaluation consiste à comparer le puzzle d'un élève avec le schéma de synthèse originel (celui de la fin du chapitre 4, p.163). Pour chaque élément, une réponse en accord avec ce schéma a été catégorisée comme *juste* (J).

Les catégories utilisées pour les réponses distinctes de celle attendue sont les mêmes que celles de l'activité A2, détaillées p.230 :

- *Interversion valide* (I) : la permutation de deux éléments, dans certains cas, a été jugé légitime relativement à la logique globale¹².
- *Localement cohérente* (L) : une configuration de certains éléments, différente de celle attendue, pouvait parfois être compréhensible, c'est-à-dire avoir localement un sens. Elle implique cependant qu'il est beaucoup plus délicat de positionner les autres éléments de manière pertinente.
- *Fausse* (F) : pour certaines réponses, il n'est pas possible du tout de trouver un sens pertinent à ce choix.

La répartition selon les différentes catégories proposées de l'ensemble des configurations observées est disponible dans l'annexe I p.383. Celle-ci a été établie à partir d'une première lecture de l'ensemble des puzzles des élèves. Une fois cette répartition constituée, les réponses données pour chaque élément d'un puzzle ont pu être catégorisées de manière systématique.

7.4.1 Statistique globale des résultats obtenus

Le puzzle sur la gravitation consiste en 16 éléments dont 12 restent à placer. Pour chaque élève, les 12 réponses sont catégorisées en *juste* (J), *interversion valide* (I), *localement cohérente* (L) ou *fausse* (F). Afin de donner un aperçu global de la performance à cette activité dans les différentes situations, les nombres de réponses dans chaque catégorie ont été sommés pour l'ensemble des élèves du groupe concerné. Par exemple pour le groupe de L1 physique de 17 étudiants, 204 réponses ont été données, se répartissant selon les quatre catégories. Pour le groupe témoin de 6 étudiants, 72 réponses ont été données. Afin de pouvoir comparer les fréquences obtenues, celles-ci ont été ramenées à un total de 100 réponses.

12. Dans l'analyse des résultats, les réponses *justes* d'après la correction seront additionnées aux réponses correspondant à une *interversion valide*. Dans le tableau donnant les fréquences obtenues pour chaque catégorie, apparaîtra ainsi directement la catégorie J+I, signifiant que les deux ont été réunies.

Le tableau 7.11 donne les fréquences obtenues pour chaque catégorie, pour les étudiants de L1 physique, et le tableau 7.12 celles obtenues pour les lycéens.

Activité A4 Fréquences totales obtenues pour chaque catégorie	L1 phy					
	Groupe Exp. (17) <i>(sur 100 réponses)</i>			Groupe Témoin (6) <i>(sur 100 réponses)</i>		
	J+I	L	F	J+I	L	F
Résolution individuelle	73	6,4	20,6	40,3	5,5	54,2
Après discussion en binôme	89,2	2,5	8,3	\emptyset		
Deux mois plus tard (15)	72,2	3	25	\emptyset		

TABLE 7.11 – Statistique globale sur l’activité A4, pour le groupe de **L1 physique**. Fréquences totales pour chaque catégorie de réponse : **J+I** : réponse juste ou interversion, **L** : réponse localement cohérente, **F** : réponse fausse

Activité A4 Fréquences totales obtenues pour chaque catégorie	Lycéens					
	1 ^{ère} S (10) <i>(sur 100 réponses)</i>			TS (3) <i>(sur 36 réponses)</i>		
	J+I	L	F	J+I	L	F
Résolution individuelle	72,2	4,2	24,6	36	0	0
Après discussion en binôme	70,8	4,2	25	36	0	0

TABLE 7.12 – Statistique globale sur l’activité A4, pour le groupe de **lycéens**. Fréquences totales pour chaque catégorie de réponse : **J+I** : réponse juste ou interversion, **L** : réponse localement cohérente, **F** : réponse fausse

Concernant les étudiants de L1, les résultats pour la résolution individuelle sont identiques à ceux obtenus pour l’activité A2 (puzzle dynamique) : de l’ordre de 3/4 de réponses justes. La proportion pour le groupe témoin - de l’ordre de 40% - est également similaire à celle pour le puzzle A2. La similarité de ces résultats pour ces deux activités, autant pour le groupe expérimental que le groupe témoin, n’étaient pas évidente a priori, dans la mesure où les deux puzzles sont assez différents. En particulier celui sur la gravitation présente beaucoup moins d’éléments déjà fixés que celui pour la dynamique.

Les 1^{ère}S obtiennent une moyenne également de 3/4 de réponses justes, alors qu’elle était seulement de 50% pour la partie dynamique. Les trois élèves de terminale S ont répondu entièrement correctement pour ce puzzle.

Cette augmentation pour les 1^{ère}S peut être liée au fait que ce schéma met en jeu beaucoup moins de formalisme mathématique que celui de la dynamique. Il avait en

effet été constaté que leur moins grande familiarité avec les vecteurs leur a particulièrement posé problème dans la première partie du cours. Selon cette interprétation, les proportions similaires de réponses justes au puzzle sur la gravitation, pour les 1^{ère}S et les L1 physique, indiqueraient que la difficulté de l'activité est similaire pour ces deux niveaux. Cela pourrait être lié d'une part au fait qu'une approche abordant le cheminement menant à la gravitation est autant nouveau pour les 1^{ère}S que les étudiants, et qu'il est également compréhensible pour les deux niveaux. Cela peut aussi être associé au fait que ce type d'activité de reconstitution de la logique sous forme de puzzle est également nouveau pour les deux niveaux.

Une progression de plus de 15% s'observe suite à la discussion pour les étudiants de L1. Il s'agit du seul cas d'augmentation significative pour chacune des deux activités de puzzle, dans les différents groupes. Cette augmentation peut être interprétée par une meilleure assurance de la part des étudiants ayant donné des réponses justes quant à l'argumentation de leurs choix, ce qui leur permet de mieux convaincre les autres.

Le succès (à 100%) des trois élèves de terminale semble confirmer la plus grande facilité de ce puzzle, relativement à celui pour la dynamique, où ils obtenaient seulement 2/3 de réponses justes.

7.4.2 Statistique obtenue pour chaque emplacement du puzzle

De même que pour l'activité A2 pour la dynamique, les réponses obtenues emplacement par emplacement ont été comptabilisées pour chacun des cas. L'ensemble des diagrammes correspondant sont disponibles dans l'annexe K p.395.

Les fréquences pour chaque catégorie pour chacun des emplacements sont relativement homogènes, en comparaison de celles pour le puzzle de la dynamique, et il ne semble pas se dégager de tendances majeures pour certains éléments en particulier. Pour cette raison les diagrammes ne sont pas reproduits et commentés ici.

7.4.3 Comparaison des puzzles en binômes

Chez les L1 physique, après comparaison et discussion en binôme, on observe :

- 4 fortes augmentations de réponses justes (+5, +6, +7,+8) relativement à la résolution individuelle,
- aucune diminution,
- 3 augmentations moins importantes (+2, +2, +3), et les autres ne varient pas.

Quasiment aucune modification n'est effectuée dans le groupe de lycéens. Cela peut être associé à un effet de lassitude, s'agissant de la dernière étape de la dernière activité, et sachant que ce groupe a eu les séances 2 et 3 dans la même journée, c'est-à-dire que les élèves ont fait les quatre activités dans la même journée.

Ainsi qu'il a été annoncé dans le chapitre précédent, les enregistrements des discussions de binôme se sont révélés difficilement utilisables¹³. Quelques passages permettent cependant de montrer des exemples de discussions.

Un extrait suivant de la discussion du binôme Éloïse - Yohann (dont les réponses sont synthétisées dans le tableau 276), donne un exemple de commentaire d'un schéma correct d'un élève, qui convainc l'autre élève.

Activité A4 catégories de réponse :	Éloïse			Yohann		
	J+I	L	F	J+I	L	F
<i>Résolution individuelle</i>	5	4	3	10	0	0
<i>Après discussion en binôme</i>	10	0	0	10	0	0

TABLE 7.13 – Activité A4 - binôme Éloïse-Yohann

« Yohann - [début inaudible] là on prend les satellites de Jupiter, d'abord, et après on considère que le mouvement, des orbites, est un mouvement circulaire uniforme

Éloïse - ah...

Yohann - Et après on en déduit que l'accélération est proportionnelle à $1/r^2$. Donc comme on a ça avec les satellites de Jupiter on dit qu'on a la même chose avec la Terre, on extrapole,

Éloïse - aaah... ok...

Yohann - On fait une extrapolation de la dépendance pour le cas de la Lune, qu'on relie à ça.

Éloïse - Ouais.

Yohann - Donc on peut calculer,

Éloïse - Ouais je vois.

Yohann - On peut en calculer l'accélération de la pesanteur, sur Terre, avec le rayon de la Terre, on en déduit que c'est la même, donc on a ça. Ça, avec ça, ça donne que les accélération des satellites de Jupiter sont liées aux mêmes types de circonstances physiques. Après on en déduit ça. [...]

13. A la fois à cause du brouhaha général (plusieurs binômes discutant en même temps), et le fait que les discussions s'appuient sur les puzzles que les élèves ont sous les yeux, ce qui les rend souvent très difficile à interpréter

Éloïse - Ok.

Yohann - Si t'es pas d'accord hein tu dis.

Éloïse - Si je suis d'accord en fait, parce que ouais en fait ça s'enchaîne bien ce que tu dis, à partir du mouvement circulaire. [...] » (L1Phy - D&G4 - S3 (D6) - 27 :30)

7.4.4 Perception de l'activité A4

De même que pour l'activité A1, il est demandé aux élèves leur perception de cette activité dans un rapide questionnaire. Ils peuvent cocher s'ils l'ont ressentie comme plutôt facile ou difficile, et comme plus ou moins utile pour l'appropriation du cours. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (7.10).

Activité A4 Perception		L1 phy (16)	Lycéens (9)	
			1 ^{ère} S (6)	TS (3)
Difficulté	<i>plutôt facile</i>	6	0	2
	<i>intermédiaire</i>	0	0	0
	<i>plutôt difficile</i>	10	6	1
Utilité	<i>très utile</i>	7	4	1
	<i>utile</i>	7	2	1
	<i>un peu utile</i>	0	0	1
	<i>pas vraiment utile</i>	1	0	0

TABLE 7.14 – Perception de l'activité A4

Pour les étudiants de L1, les proportions obtenues pour la perception sont très proches de celles obtenues pour le puzzle sur la dynamique (A2). Cela peut éventuellement être relié au fait que les résultats pour les deux activités sont très proches également (75% de réponses justes).

Il est intéressant de noter que bien que le puzzle gravitation ait été mieux réussi par les 1^{ère}S¹⁴, les 6 élèves déclarent avoir trouvé cette activité plutôt difficile (pour seulement 1 pour le puzzle dynamique, et 5 jugeant la difficulté intermédiaire). Le fait que l'activité ait été à la fois perçue comme difficile et en même temps ait été globalement bien réussie par ces élèves est un point plutôt positif du point de vue de l'utilité de l'activité. En

14. +22% de réponses justes relativement au puzzle dynamique, alors que les résultats sont analogues pour les deux puzzles pour les étudiants de L1.

effet la perception de la difficulté peut indiquer une réflexion assez soutenue, tandis que les résultats témoignent que nombre d'entre eux ont réussi à reconstituer une bonne part de la logique du cheminement.

Le commentaire d'un élève de terminale S sur l'utilité de l'activité¹⁵ va dans ce sens :

« La difficulté m'a forcé à m'imprégner du cours. » (Ilias -TS)

Plusieurs autres commentaires mentionnent l'intérêt vis à vis de la compréhension du cours.

« Je ne m'étais pas trop intéressé du cours. Elle m'a permis de comprendre "la logique du cheminement menant à la force de gravitation" et de finalement trouver le cours intéressant. » (Alexis - L1Phy)

« l'activité permet de revoir les connaissances et de mieux les comprendre » (Philippe -1S)

« Elle permet d'assimiler le cours plus facilement » (Valentin - 1S)

« Permet de retracer la logique du cours et donc de le comprendre mieux. » (Paul - TS)

Certains élèves évoquent l'intérêt d'un schéma de synthèse :

« Pas pour la compréhension mais elle a été très utile pour organiser les données reçues en cours. C'est comme regarder un puzzle mélangé : l'image que l'on reconstruit n'est peut être pas complètement juste et le processus est lourd. Et regarder un puzzle après l'avoir fait : la place de chaque pièce a été enregistrée et l'image est faite. » (Alice - L1Phy)

« C'est comme une synthèse schématisée donc cela peut être utile pour les révisions » (Éloïse - L1Phy)

« J'ai bien aimé le fait d'obtenir visuellement le cheminement pour mieux le comprendre. » (Riccardo - L1Phy)

« mieux cerner les notions du cours en schéma » (Nihal - 1S)

« Encore une fois, elle permet de bien illustrer toutes les formules ou autres » (Cyrille - 1S)

« Plus facile à apprendre avec un schéma » (Farah - 1S)

L'intérêt pour la mémorisation est également évoqué par deux étudiantes :

« Il y avait moins d'aide que le premier. Moins il y a d'aide, plus on cherche seul, mieux on retient. » (Daïanah - L1Phy)

« Reconstitution du raisonnement = rentre mieux. » (Delphine - L1Phy)

Enfin d'autres commentaires plutôt positifs ont également été obtenus :

15. La question était la suivante : « As-tu trouvé que cette activité t'as été utile pour t'appropriier le cours ? Si oui, peux-tu expliquer en quoi cela t'as été utile. »

« Cela permet de bien suivre le cheminement des idées » (Juliette - L1Phy)

« Ça nous fait réfléchir sur le cours et la démarche scientifique. » (Pierre - L1Phy)

« Cela permet de voir les théories dans l'ordre chronologique de leur découverte » (Yohann - L1Phy)

« Pour les éléments importants, l'activité synthétise encore plus le cours. » (Aïssata - 1S)

7.5 Problème sur l'impesanteur

L'objectif d'aborder en particulier le cas de l'impesanteur était de mettre en évidence la compatibilité entre l'image de l'astronaute en flottement et la présence d'une force de gravitation. Cette situation est en effet supposée être une origine potentiellement forte de l'idée qu'il n'y ait pas de gravité dans l'espace¹⁶.

L'analyse en détail du déroulement du problème avec les élèves a été laissée à une recherche ultérieure. Certaines des premières réactions à la situation présentée sont cependant déjà intéressantes, vis à vis de la justification d'aborder cette notion.

La difficulté d'interprétation de la situation d'impesanteur

Un premier constat est celui de la difficulté des élèves pour interpréter la situation d'impesanteur. On retrouve en particulier l'idée que le flottement de l'astronaute soit dû à une force de gravitation « trop » faible à la distance considérée.

L0 - Est-ce que cette situation d'impesanteur, est-ce que ça peut être associé à une absence de force de gravitation ?

L2.1 - Non, mais c'est que la force est trop faible pour euh...

L0 - Que la force de gravitation serait trop faible ?

L2.2 - La masse de l'homme plutôt.

L2.1 - Elle a pas une portée infinie la force gravitationnelle.

16. « Les images d'astronautes qui « flottent » librement dans leur habitacle, appuyées de commentaires plus ou moins éclairés, défient les lois de la gravitation... La parole du professeur de physique affirmant, conformément au programme, que « La gravitation gouverne tout l'Univers » ne pèse pas lourd face à l'évidence visuelle. Ne pas aborder l'impesanteur avec nos élèves, c'est laisser les médias contredire, à chaque évocation du phénomène, le fait que la gravitation est universelle. C'est laisser planer l'idée que la gravité peut disparaître, quoi qu'ait pu en dire Newton. » (Launer, 2014)

La situation d'impesanteur est notamment considérée par (Galili, 1995a) comme à la base d'un réseau de conceptions sur les notions associées à la gravitation (cf. « L'importance des relations entre conceptions » p.).

L2.2 - Ben si justement. Je sais pas moi je dirais que, comme la masse de l'homme est petite... [...]

(L1Phy - D&G2 - S3 (A-C) - 2 :56 :24)

A la suite de cette discussion, après l'évocation du cas de la station spatiale à 400 km d'altitude, l'une des élèves évoque le rôle de l'air.

L2.1 - c'est pas une histoire d'atmosphère aussi ? Plus on monte, moins l'air il est dense et quand on sort de l'atmosphère, y a plus d'air, y a plus de gaz, y a quasiment plus rien...

(L1Phy - D&G2 - S3 (A-C) - 2 :58 :06)

Cette idée apparaît également dans d'autres groupes.

Le retour spontané du rôle de l'air pour une situation problématique

Dans le problème proposé aux élèves, il s'agit de chercher une manière de construire un appartement dans lequel on soit en impesanteur. Parmi les suggestions d'élèves, on observe à plusieurs reprises des considérations liées à la présence de l'air.

L3.1 - Et si on se met dans les mêmes conditions qu'il y a dans l'espace, c'est-à-dire mettre tout sous vide, sauf que si on met tout sous vide y aura plus d'air donc euh...

L0 - Alors est-ce que si on met tout sous vide, ça va marcher ?

L3.1 - ben si on reproduit les conditions qu'y a dans l'espace, en sachant que dans l'espace on flotte, donc peut être que ça pourrait fonctionner, par analogie.

(L3.1 : Yohann - L1Phy - D&G3 - S3 - 1 :38 :52)

En recherchant dans l'activité A3, on observe que l'étudiant faisant cette proposition avait pourtant donné l'argument attendu pour remettre en question le rôle de l'air pour la chute libre¹⁷. Une telle réaction peut être un signe que la difficulté d'interprétation de la situation d'impesanteur favorise le retour des idées initiales, même si celles-ci ont pu être remises en question auparavant, dans les cours et les activités.

A la suite de la discussion, d'autres élèves contestent cependant la proposition relative au vide.

17. Il s'agissait de la question f) : « Peut-on dire que la chute libre soit due à la pression atmosphérique, puisqu'elle a lieu seulement dans l'atmosphère, où il y a de l'air ? ». Le passage attendu dans la synthèse était le suivant : « Le phénomène de chute libre peut avoir lieu de la même façon partout sur Terre, quels que soit les types de matériau. On pourrait donc supposer qu'il est associé à des circonstances physiques qui sont toujours présentes à la surface de la Terre. 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. » § 65 (début) (cf.D p.363)

L3.2 - Sauf que l'attraction elle marche aussi dans le vide. [...]

L0 - Qu'est-ce que vous en pensez ? Par rapport à ce qu'on a vu dans le cours.
Par rapport aux circonstances qui étaient associées à ces accélérations.

L3.3 - Ben justement on a dit que l'atmosphère, c'était pas lui qui faisait dépendre la chute libre en fait.

La suggestion du vide apparaît aussi dans un autre groupe, et est également contestée par un autre étudiant :

L4.2 - Donc quand tu fais le vide t'enlèves l'air, il y a plus de pression. [...]

L0 - Est-ce que ça va être une solution qui va marcher ou pas ?

L4.2 - Ça veut dire qu'il faudrait qu'il y ait plus d'atmosphère en fait ? Non mais l'atmosphère ça résulte de la gravité, mais si tu l'enlèves t'auras toujours la gravité.

(L1Phy - D&G4 - S2&3 - 4 :11 :20)

Dans le groupe de lycéens, une suggestion spontanée pour répondre au problème est la suivante :

L9.1 - Et ben on fait une tour qui va jusqu'à l'espace. On fait une tour jusqu'à l'espace.

(Lycéens - D&G9 - S3 - 1 :05 :00)

Dans la suite de la discussion, on retrouve un raisonnement par analogie, tel que dans le premier extrait présenté.

L0 - Qu'est-ce que vous pensez de cette proposition ? [une tour de 500km d'altitude]

L9.2 - ben oui, oui parce que les fusées tout ça, enfin, la station spatiale, enfin ils sont plus haut, mais ils sont en impesanteur à l'intérieur.

L0 - Alors, la station spatiale, pour information elle est à peu près à 400km d'altitude.

L9.2 - Ah bon ben voilà.

A nouveau, les deux élèves cités précédemment (de terminale S) font partie de ceux ayant trouvé le passage attendu lors de la question correspondante. Ainsi malgré le traitement de cet aspect dans le cours, et la capacité de ces élèves à repérer les arguments excluant le rôle de l'air dans la chute (dans l'activité A3), cette idée semble facilement réapparaître à propos de la situation d'impesanteur. Ce constat peut s'interpréter par le fait qu'il s'agit d'une situation particulièrement subtile à analyser, dans la mesure où elle fait intervenir la considération du référentiel. Ainsi ces observations semblent confirmer l'importance de traiter ce sujet en particulier, en plus du cheminement de reconstruction de la théorie, dans le but d'explicitier le lien entre l'impesanteur et le référentiel d'étude du mouvement.

7.6 Synthèse des résultats majeurs relativement aux questions de recherche

7.6.1 Compréhension de la logique globale du cours sur la gravitation

Le première question de recherche concernait la compréhension de la logique globale du cours :

QR1 : Dans quelle mesure la logique globale de la séquence est compréhensible pour les élèves ? Y a-t-il des éléments posant particulièrement problème dans la progression proposée ?

Compréhension globale

L'activité de reconstitution du cheminement (A4), a permis une appréciation de la compréhension de la logique globale de la séquence sur la gravitation. Pour les étudiants de L1 physique, les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus pour l'activité équivalente pour la dynamique (A2) : une proportion totale de presque 3/4 de réponses justes. Ce taux de réussite constitue un résultat plutôt encourageant, bien qu'il ne s'agisse que d'une moyenne d'ensemble n'indiquant pas les aspects particuliers pouvant être à l'origine de difficultés. L'écart de plus de 30% avec les étudiants n'ayant pas suivi la séquence (groupe témoin) montre que cette activité a effectivement permis de retrouver certains enchaînements logiques corrects.

L'augmentation de 15% de réponses justes suite à la discussion en binôme, pour les étudiants de L1 (seule progression significative observée pour les différents groupes dans A2 et A4), suggère une certaine assurance de la part des étudiants ayant répondu correctement quant à l'argumentation de leurs choix, ce qui leur permet de mieux convaincre les autres.

Pour les élèves de 1^{ère}S, une proportion de presque 3/4 a également été obtenue, indiquant un niveau de compréhension similaire à celui des L1 de la logique du cheminement menant à la gravitation. Ce résultat analogue, alors qu'il était différent de plus de 20%

pour le puzzle sur la dynamique, semble indiquer une plus grande accessibilité de cette partie du cours. Le fait que les trois élèves de terminales S aient entièrement réussi cette activité - alors qu'ils avaient seulement 2/3 de réponses justes pour A2 - donne la même impression, bien que la faiblesse de l'effectif ne permette pas plus de conclusion.

Cette meilleure réussite globale pour le puzzle gravitation par les lycéens peut être reliée à la présence nettement moins importante du formalisme mathématique dans cette activité, ayant effectivement posé des problèmes aux élèves de 1^{ère}S dans la partie dynamique. Si tel est le cas, cela pourrait indiquer que le principe de reconstituer la logique du cheminement présenterait une difficulté à peu près similaire pour les élèves des différents niveaux - 1^{ère}S, terminales S et L1 de physique - lorsque le niveau de mathématique impliqué est peu important (cf.7.4.1 p.273).

Une difficulté principale détectée : les rôles de l'accélération et de la vitesse initiale pour l'étude du mouvement

La présentation du cours sur la gravitation semble avoir présenté beaucoup moins de difficultés que la partie sur la dynamique, dans les différents groupes.

Le point ayant suscité le plus de discussions est celui concernant la comparaison de l'accélération centripète de la Lune et l'accélération de chute sur Terre. Il est notamment apparu via la question « Pourquoi la Lune ne tombe pas ? [...] alors que l'accélération est vers la Terre... », interrogation soulignant la difficulté de concevoir qu'à des trajectoires très différentes (ici le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne accéléré) peuvent correspondre des vecteurs accélérations similaires (ici dirigé vers le centre de la Terre) (cf.7.1.3 p.255).

La posture descriptive adoptée dans l'approche proposée, pouvant se résumer à ce stade par « c'est un fait mathématique qu'il est possible d'avoir des vecteurs accélérations similaires pour des mouvements différents », s'est révélée insatisfaisante pour certains étudiants, souhaitant aborder le rôle de la vitesse initiale pour différencier les différents mouvements d'accélération similaire.

Ces questionnements renforcent ainsi la motivation pour développer explicitement cet aspect - non abordé à ce stade de la séquence - comme cela a été fait dans le problème sur l'impesanteur.

Le retour des conceptions lors de la considération de l'impesanteur

La présentation du problème sur l'impesanteur a permis de constater la persistance des idées a priori sur la gravitation. L'idée de se mettre « dans l'espace », ou de « faire le vide » pour éliminer la gravité réapparaît chez des élèves ayant pourtant été capables de trouver dans la synthèse du cours les passages permettant de remettre en question ces conceptions (cf.280).

Ces observations témoignent de la difficulté pour les élèves d'interpréter la situation - effectivement difficile - de l'impesanteur, ainsi que la facilité avec laquelle les conceptions peuvent réapparaître dans un contexte qu'ils ne savent pas analyser. Cela confirme l'importance d'accorder un traitement particulier à ce sujet dans le but d'explicitier le lien entre l'impesanteur et le référentiel d'étude du mouvement.

7.6.2 Justification des aspects non évidents

La seconde question de recherche explicite le type de compréhension visée par la séquence relativement aux difficultés identifiées :

QR2 : Dans quelle mesure la séquence permet aux élèves d'identifier les arguments permettant de justifier certains aspects du contenu, a priori non évidents pour le sens commun ?

Elle a permis d'orienter la conception de l'activité de recherche d'arguments dans la synthèse écrite du cours, ce qui représente déjà en soi un apport important pour la séquence.

La performance globale à l'activité A3 s'est révélée plus faible que celle équivalente pour la dynamique, A1. Des problèmes de formulation de certaines questions ont été mis en avant (cf. 7.3.1 p.264), la nécessité de clarifier la consigne a également été pointée (cf.6.5.2 p.247).

Le point majeur ressortant des résultats de cette activité est peut-être la forte difficulté observée chez les L1 pour la justification de l'idée d'attraction terrestre (question g), alors qu'il s'agissait d'un des problèmes d'apprentissage centraux visés par l'approche développée¹⁸. Cette observation suggère que le passage correspondant dans la partie sur la dynamique - l'explicitation de l'expression « force exercée par » - n'ait peut être pas été suffisamment développé, ni suffisamment repris ensuite dans la partie gravitation

18. cf. la non évidence de la notion d'attraction terrestre p.68.

pour le cas de l'attraction terrestre. Néanmoins, le fait que 3 sur les 6 élèves de 1^{ère}S aient trouvé le passage précis correspondant à la question nuance ce constat. Il se peut que la conscience du problème, suite aux expérimentations avec les L1, est impliquée un réajustement lors de la présentation de la séquence aux lycéens (au niveau du temps passé à clarifier ce point). Le fait qu'une présentation plus détaillée de cet aspect ait permis à certains élèves de trouver la justification correcte est un bon signe quant à la possibilité de pallier ce problème dans une version future de la séquence.

7.6.3 Perception du cours sur la gravitation

QR3 : Quelle perception ont les élèves des différentes approches proposées ? En particulier relativement à leur expérience passée des cours de physique.

Parmi les étudiants de L1 physique, une majorité (10 sur les 13 répondants) considèrent qu'il leur aurait été possible de suivre ce cours sur la gravitation en terminale.

Vis-à-vis du contenu, un fait remarquable est que les deux passages de la synthèse du cours ressortant comme les plus intéressants pour les élèves soient d'une part,

- « Les arguments justifiant la distinction entre monde terrestre et céleste pendant l'Antiquité »,
- et d'autre part le passage du calcul menant à conclure que « l'accélération de chute libre terrestre puisse être considérée comme un cas particulier de l'accélération centripète céleste, lorsqu'on est à la surface de la Terre », moment clef du raisonnement fondant l'unification entre les deux mondes.

Ce rôle d'unification de la théorie de la gravitation est au cœur du cheminement de reconstruction proposée. Indépendamment de l'efficacité d'une telle approche vis-à-vis des difficultés d'apprentissage des élèves, leur intérêt pour cet aspect est déjà positif en lui-même. Il rend compte de la possibilité d'attirer l'attention des élèves, via ce point de vue historique, sur les arguments permettant de relier les phénomènes sur Terre et dans l'espace.

De même que pour la partie dynamique, un fort intérêt a été observé pour les deux activités proposées, jugées très majoritairement utiles ou très utiles par les élèves pour l'appropriation du cours, ainsi que sa mémorisation.

7.7 Résultats sur la perception de l'approche globale de la séquence

Questionnaires sur la perception du cours pour les lycéens

A la fin de la séquence, après la seconde partie du cours et des deux activités, les questions suivantes ont été posées aux élèves de lycée :

- 1) *Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'était pas présent au stage l'état d'esprit global du cours d'aujourd'hui, quels aspects principaux évoquerais-tu ?*
- 2) *Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et les autres cours de physique que tu as eus (en Seconde, en Première ou en Terminale) ?*
- 3) *Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?*

L'ensemble des réponses des élèves est disponible dans l'annexe L p.403.

Pour la première question, certains élèves reconnaissent la difficulté relative au caractère novateur de la forme du cours mais soulignent avec le recul leur appropriation de la démarche au travers des outils mis en œuvre :

« Ça change des cours standard et que malgré que cela soit un peu compliqué à première vue c'est finalement assez simple. » (Valentine - 1S)

« L'ambiance, activités pour mieux s'appropriier le cours. De plus les activités on les fait après le cours et ça permet de réviser les cours en même temps. Le principe du diapo. » (Aissata - 1S)

Un élève mentionne en particulier l'aspect de la reconstruction des formules :

« Une manière différente d'apprendre, plus pratique je trouve car on ne balance pas des formules que l'on doit admettre, on voit leur origine et cela facilite la compréhension. » (Paul - TS)

Cet aspect est cité plusieurs fois lors de la seconde question sur les différences essentielles avec le cours de lycée :

« C'est de démontrer comment nous obtenons la formule de gravitation » (Nihal - 1S)

« En cours, on nous présente des formules, on ne sait jamais trop d'où ça vient et nous ne pouvons aller plus loin (faute de temps), dans le cours présenté on

nous présente différents points de vue pour arriver à une conclusion finale (qui peut être fausse), En somme on travaille dans un état d'esprit plus ouvert, on tient compte de tout pour choisir l'essentiel. » (Aissata - 1S)

« L'explication des origines, tant d'où vient cette formule ou cette pensée, comment a-t-elle été construite. » (Guillaume - TS)

Vis-à-vis de l'impact sur l'image de la physique, un commentaire est également intéressant à propos de la démarche de reconstruction :

« Je ne voyais auparavant que les évènements, après qu'ils aient été découverts, sans forcément m'intéresser à toute la démarche de la recherche. A présent j'ai une idée de ce que la recherche demande afin d'obtenir des conclusions convaincantes. » (Ilias - TS)

L1 physique : mêmes questions, deux mois plus tard

Les questions précédentes n'ont pas été posées aux étudiants de L1 physique à la suite de la séquence. Elles l'ont été lors de la reprise des activités de puzzle, environ deux mois après l'expérimentation¹⁹. Les réponses sont d'autant plus intéressantes qu'elles expriment des aspects ayant suffisamment marqué les étudiants pour qu'ils s'en souviennent deux mois plus tard. L'ensemble des réponses des étudiants est disponible dans l'annexe M p.407.

Pour la première question sur l'état d'esprit général du cours, plusieurs étudiants évoquent l'aspect historique :

« L'esprit ancré dans l'histoire du cours qui permet une compréhension plus complète et rapide. Un cours plus interactif et menant à plus de questionnement et de réflexion à approfondir *a posteriori* » (Alice - L1phy)

« explication des concepts physiques par son histoire (cheminement des idées au cours de l'histoire pour en arriver aux concepts actuels) » (Clara - L1Phy)

« Ce cours donne une dimension historique de la physique et fait un suivi chronologique des formules trouvées » (Maxime - L1Phy)

19. Sous une forme analogue, adaptée au étudiants de L1 :

1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associé à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?

2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physique, au lycée ou cette année à l'université.

3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?

D'autres commentaires expriment plus précisément le rapport à la compréhension de l'origine des formules ou la logique de la démarche :

« L'étude des origines des lois et modèles pour mieux comprendre et "savoir d'où ça sort" » (Svetlana - L1Phy)

« J'évoquerais que l'on découvre la physique sous un autre angle, c'est-à-dire qu'on peut mieux comprendre certains concepts ainsi que l'origine de ces concepts qui permettent de voir comment certaines choses fonctionnent. » (Éloïse - L1Phy)

« J'évoquerais la participation active de l'étudiant qui n'a pas seulement à écouter d'une façon passive au cours du prof. De plus j'ai bien aimé le fait de présenter d'une façon logique, étape par étape le cours plutôt que de balancer certaines notions. » (Ramatoulaye - L1Phy)

« Apprendre d'où vient certaines formules qu'on utilise en physique, sans pour autant passer par des étapes compliquées, on a appris de façon ludique. » (Laviru - L1Phy)

« Introduire des concepts de base et des observations pour établir une démarche logique » (Alexis - L1Phy)

« Les démarches logiques qui amènent aux lois de Newton » (Justine - L1Phy)

Enfin plusieurs étudiants abordent le contenu du cours :

« a) Le concept de la force au sens de newton, les 3 lois de Newton

b) La notion du "mouvement naturel" à travers le temps (dans l'histoire des pensées)

c) l'explication de la force de gravitation (comment on obtient la formule $F=Gmm/r^2$) » (Riccardo - L1Phy)

« Le lien fait entre les planètes et le Soleil, rapporté à la Terre et à la Lune. Plus la notion du concept de force relative à un mouvement naturel. » (Delphine - L1Phy)

« a) expliquer le concept de force.

b) Montrer le cheminement qui nous a conduit à la formule de la gravitation universelle. » (Werner - L1Phy)

Pour la seconde question, sur les différences avec les autres cours de physique suivis, au lycée ou à l'université, on retrouve le côté historique, et surtout le rapport à la provenance des concepts ou formules :

« L'origine des notions est expliquée » (Alexandra - L1Phy)

« Le lien avec l'histoire, et pas juste la bio du découvreur final. Les avancées pas à pas avec les différentes personnes. » (Delphine - L1Phy)

« En physique à la fac, on nous explique pas vraiment l'origine de certains concepts (ou très rapidement, voir c'est mal expliqué comme au lycée). Alors que

si on comprend d'où est-ce que ça vient, et comment cela marche, on retient des formules plus facilement, par exemple. Quand on comprend on retient mieux. » (Éloïse - L1Phy)

« Dans le cours présenté, c'est plus facile à comprendre car il y a un peu d'histoire et pas trop de calcul alors qu'à la fac il y a beaucoup de calcul mais on comprend pas souvent pourquoi c'est comme ça et pas autrement. » (Laviru - L1Phy)

« On sait d'où vient la formule et comment s'oriente la pensée de son trouveur. » (Maxime - L1Phy)

« A la fac on donne plutôt des formules "brutes" et pas trop d'explication sur leurs origines » (Riccardo - L1Phy)

« Le fait de démontrer la démarche qui a mené à l'obtention d'une théorie » (Werner - L1Phy)

Enfin pour la dernière question - «Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ?» - plusieurs étudiants répondent positivement, en revenant sur les différents aspects déjà évoqués précédemment :

« Oui, c'est plus intéressant de voir comment "la pensée physique" se construit (notamment, le changement de référentiel pour résolution des planètes (modèle de Tycho...)) De plus c'est très important de voir d'où viennent les formules. » (Riccardo - L1Phy)

« Oui ça m'a apporté des choses avec les différentes théories qui étaient proposées avant notre siècle. Aussi pour le mouvement des différentes planètes que j'avais pas très bien compris. » (Pierre - L1Phy)

« On comprend bien d'où viennent les formules » (Delphine - L1Phy)

« Cela rend la physique encore plus intéressante que l'on ne le pense. » (Éloïse - L1Phy)

« La physique a paru plus logique ainsi qu'une matière à part entière et non une application concrète des mathématiques. » (Justine - L1Phy)

« La physique se résume pas à une simple formule, il y a tout un travail derrière une formule qui paraît toute faite. » (Laviru - L1Phy)

« Il m'a permis de mieux m'approprier certains concepts après en avoir étudié leur origine. De plus, l'étude des démarches scientifiques satisfait la curiosité, et le puzzle sur celles-ci met en évidence les raisonnements nécessaires en physique. » (Svetlana - L1Phy)

« Généralement j'ai toujours bien aimé la physique mais je ne suis pas toujours satisfait de la façon dont elle est présentée. Le cours a été capable de bien mettre en évidence l'évolution historique (et donc logique) du sujet et m'a donc permis de l'assimiler d'une façon surtout plus claire et agréable. » (Ramatoulaye - L1Phy)

Deux étudiants mentionnent leur avis sur l'intérêt de cette approche au lycée (sans que cela leur soit demandé) :

« Oui, beaucoup, les notions de physique ne sont pas énoncées directement, mais expliquées et du coup nous permettent de mieux comprendre ce qui se passe. (intéressant d'intégrer ce cours au collège et au lycée) » (Maxime - L1Phy)

« Je ne crois pas que ce cours ait modifié mon image de la physique, mais je pense qu'il serait certainement plus accrocheur pour des élèves de lycée que les cours qui y sont actuellement dispensés. » (Werner - L1Phy)

Le rapport à la provenance des idées se retrouvent dans plusieurs enregistrements, notamment lors de discussions à la suite de la séquence, comme par exemple les suivants :

« Moi les formules balancées comme ça, ça me dit rien du tout. Du coup c'était bien de repartir de zéro quoi. » (Riccardo - L1Phy - D&G3 - S3 - 2 :42 :15)

« Je trouve ça mieux d'apprendre comme ça chronologiquement comme vous avez fait que comme nous on a fait au lycée, à nous lancer une formule, avec de temps en temps une anecdote, mais pas savoir d'où elle sort. »

(Clara - L1Phy - D&G2 - S3 - 4 :04 :16)

« Moi je trouve ça vraiment beaucoup mieux de voir d'où viennent les choses ça aide à comprendre vraiment ce que ça veut dire, du coup c'est, ouais, c'est quasiment ce qu'il y a de plus intéressant en fait, le cheminement qui mène à la formule. » (Pierre - L1Phy - D&G6 - S3 - 2 :50 :45)

Une étudiante partageant ce point de vue²⁰, le formule à l'oral d'une autre manière :

« L4.1 - Ben en fait vous êtes parti de quelque chose qu'on savait déjà – pas qu'on nous avait mis dans la tête – qu'on savait déjà, pour arriver à quelque chose qu'on nous a mis dans la tête.

L4.2 - Ouais.

L4.1 - Pour arriver à comprendre quelque chose qu'on nous avait mis dans la tête, voilà c'est ça la différence en fait.

L4.3 - C'est vrai.

L0 - Et les trucs que vous saviez déjà, c'était des choses assez élémentaires en fait.

L1 - oui voilà. C'est pas, quand on te pose la question tu réponds pas « parce que c'est comme ça » c'est quelque chose que tu peux l'expliquer, c'est des choses qu'on peut expliquer.

(L4.1 : Alexandra - D&G4 - S2&3 (D7) - 1 :39 :10)

20. « Les formules ne tombent pas du ciel, car dans le cours on a l'explication qui a abouti à de telles formules » (Alexandra - Q. Dynamique 7.)

Cette remarque peut faire écho à une intention forte ayant structurée la conception de la séquence : celle de prendre le sens commun comme point de départ de l'enseignement, ou autrement dit : « la volonté d'ancrer la progression des étapes menant à une nouvelle idée à des faits ou significations partagés du langage courant et de l'expérience quotidienne. » (cf.2.2.1 p.15).

Quantitativement

A partir du questionnaire sur la perception de l'approche globale, il est possible de compter le nombre d'élèves ayant exprimé un intérêt pour le cheminement de reconstruction, permettant d'aboutir aux concepts et aux formules. On compte :

- 5 sur les 9 lycéens (2 sur les 6 élèves de 1^{ère}S, et les 3 terminales S),
- 13 sur les 17 étudiants de L1 physique.

Les réponses considérées comme évoquant cette idée sont celles mises en gras dans les tableaux des annexes L p.403 et M p.407. A ces réponses s'ajoutent celles aux questionnaires sur la perception des différentes parties de la séquence (cours et activités) dans lesquelles on retrouve un ressenti positif du cheminement de reconstruction (voir notamment les commentaires en 6.2.3 p.218 et en 7.2.1 p.261). Les témoignages oraux de certains élèves, comme ceux cités précédemment, ainsi que d'autres cités dans le chapitre précédent (en particulier le dernier extrait du chapitre 6, p.248), apportent également d'autres expressions de cet intérêt.

Conclusion

Une approche conjointe de la dynamique et de la gravitation newtoniennes

L'enseignement de la mécanique a été l'objet de très nombreuses études depuis les débuts des recherches en didactique de la physique. L'importance toujours actuelle des problèmes liés à son apprentissage, et l'absence de solution consensuelle, justifient la continuation de la réflexion sur son enseignement.

Parmi les très nombreuses approches existantes des lois de Newton, l'une des spécificités de celle proposée est de les considérer du point de vue de l'évolution des idées ayant mené à la théorie de la gravitation.

L'élaboration d'un formalisme permettant une description précise du mouvement peut en particulier être motivée par la recherche de liens entre les mouvements de chute terrestre et de révolution céleste, problème historique à l'origine de la théorie newtonienne.

Les différentes interprétations de la chute libre - pensée comme un mouvement naturel avant d'avoir été interprétée en termes de force - permettent de plus une introduction et une formulation du concept de force au sens de Newton, à partir de la notion de mouvement naturel de référence.

D'autre part, l'explicitation du raisonnement menant à relier la chute verticale sur Terre et la révolution de la Lune, permet de justifier que la force associée à la chute libre - le poids - soit effectivement liée à la présence de la Terre. La notion d'attraction terrestre - admise sans justification dans la plupart des présentations du sujet - s'oppose pourtant à l'idée largement répandue que la chute soit un mouvement ayant lieu de lui-même, n'ayant pas besoin d'être expliqué par une force.

Positionnements didactiques et épistémologiques généraux

Le développement de l'approche proposée repose sur un certain nombre de points de vue généraux sur l'enseignement et l'apprentissage, ainsi que sur la nature de la physique.

Au niveau épistémologique, les deux aspects principaux ayant été mis en avant sont les suivants :

- Le fait que les concepts et théories physiques résultent d'une certaine construction, constituée d'aller-retours complexes entre réflexions théoriques et expérience.
- L'idée qu'un apport fondamental d'une théorie physique soit constitué par les mises en relation entre phénomènes qu'elle permet de révéler.

Au niveau didactique, plusieurs positions générales ont été revendiquées, consistant à souligner l'importance des différents points de vue suivants :

- La prise en compte du sens commun comme point de départ de l'enseignement, c'est-à-dire la volonté d'ancrer la progression des étapes menant à une nouvelle idée à des faits ou significations partagés du langage courant et de l'expérience quotidienne,
- L'attention portée au problème de l'interprétation et de la polysémie des mots, et ainsi l'importance accordée à la vigilance concernant l'ambiguïté des termes utilisés,
- La recherche d'explicitation des aspects de la théorie non évidents pour le sens commun, exprimant la volonté de ne pas faire passer pour allant de soi certains points qui ne sont ni évidents, ni intuitifs, et dont la compréhension demande une certaine justification ou reconstruction, via des arguments explicites,
- L'importance pour la motivation de la compréhension des motifs, c'est-à-dire de la justification du déroulé logique présenté,
- La considération de l'intérêt pour l'histoire des idées, dont une relecture guidée par la connaissance des difficultés des élèves peut permettre de trouver des éléments pouvant contribuer à y remédier

Ces positionnements didactiques et épistémologiques sont à l'origine de l'état d'esprit commun des approches proposées de la dynamique et de la gravitation. Il s'agit en particulier de *la volonté de reconstruire un cheminement progressif permettant d'aboutir aux concepts, grandeurs et formules constituant la théorie à enseigner*. L'importance centrale accordée à l'identification des aspects non évidents du contenu pour le sens commun, incarne l'intention de minimiser les situations où les élèves sont obligés d'ad-

mettre ou de « faire confiance » à un savoir scolaire énoncé. Ce refus de l'argument d'autorité vise à promouvoir l'idée *qu'une connaissance doit être associée à des arguments permettant de la justifier*.

Synthèse des idées centrales proposées

A partir de cet état d'esprit commun, les spécificités de la dynamique et de la gravitation, tant au niveau de leur contenu que des difficultés d'apprentissage qui leur sont associées, ont conduit à différents choix didactiques pour leur formulation et présentation.

Les argumentations justifiant ces différents choix, développés dans les chapitres 3 et 4, constituent le cœur de ce travail de thèse. Elles s'appuient sur la mise en relation de l'analyse historique et épistémologique des contenus physiques en jeu, et de l'analyse des idées des élèves sur ces contenus. Cette dernière a mené à identifier certains problèmes d'apprentissage, jugés centraux, et pour lesquels les choix didactiques proposent des contributions de solutions. Il s'agit des quatre problèmes suivants :

- la coexistence du sens commun et du sens physique de la notion de force (1),
- l'ambiguïté de la notion de causalité (2),
- la non-évidence de l'idée d'attraction terrestre (3),
- la distinction entre la façon de considérer les phénomènes sur Terre et dans l'espace (4).

Il a été vu en particulier comment deux réflexions sur la notion d'explication pouvaient être mises à profit pour l'introduction et la formulation du concept de force.

En premier lieu, l'explicitation du rôle d'une situation de référence dans une explication, a permis une introduction du concept de force, comme relatif à un certain choix de *mouvement naturel de référence*. Cette approche s'oppose à un sens autonome du concept de force - généralisé à partir de l'idée intuitive d'action - qui est implicitement utilisé dans la plupart des présentations de la dynamique²¹.

21. La critique d'une telle approche était la suivante : lorsque le concept de force est présenté comme indépendant, les lois du mouvement expriment des relations entre celui-ci et le mouvement, qui peuvent être vues comme des caractéristiques *supplémentaires* du concept de force, puisque celui-ci à un sens autonome. En particulier la relation à l'accélération donnée par la deuxième loi de Newton *n'exclut pas* a priori la possibilité d'*autres* caractéristiques intuitives provenant des idées du sens commun sur les forces et le mouvement. Dans la reconstruction proposée du concept de force, celui-ci n'a pas de sens indépendant mais *est défini* à partir de l'accélération, et n'a donc pas *plus* de sens que ce qui est contenu dans sa définition, constituée par les lois du mouvement. Cette approche a ainsi pour cible le problème de la coexistence du sens commun et du sens physique de la notion de force (1).

La nécessité de définir précisément le concept newtonien de force a par ailleurs pu être mise en évidence par la considération des différentes interprétations de la chute libre dans l'histoire des idées. Cette manière d'attirer l'attention sur l'importance de la façon dont le concept est défini, vise à favoriser la distinction entre le sens commun et le sens physique de la notion de force (1).

L'idée qu'une explication consiste en une mise en relation a d'autre part été exploitée. Celle-ci permet une reconstruction du concept de force à partir des lois du mouvement, via la notion de *circonstances physiques associées à l'accélération*.

Cette formulation évite en particulier l'ambiguïté du terme de cause, et permet d'insister sur le caractère simultané de la définition de la grandeur force à partir de l'accélération, $\vec{F}^{Newt}(t) := m\vec{a}(t)$, en considérant d'autres exemples de mises en relation non chronologiques (2)²².

Concernant la théorie de la gravitation, l'objectif de l'approche proposée consiste à reconstruire un cheminement historique menant à l'unification entre phénomènes terrestre et céleste. Cela a pour but de rendre explicite le raisonnement permettant d'établir des liens entre phénomènes sur Terre et dans l'espace, remettant ainsi en question la tendance à les dissocier (4). Ce cheminement permet en particulier de pointer les arguments précis conduisant à associer la chute verticale à une attraction par la Terre (3), et non à d'autres circonstances, comme la présence de l'air.

La reconstruction d'un cheminement menant à la théorie de la gravitation permet par ailleurs d'illustrer plusieurs aspects épistémologiques ayant été jugés particulièrement importants. En premier lieu, l'idée que les concepts et théories physiques soient le résultat d'une construction, articulant réflexions théoriques et expériences. Et d'autre part l'idée qu'un apport fondamental d'une théorie physique soit les mises en relation qu'elle permet de révéler. Le cas de la gravitation permet la première grande unification de la physique, mettant en évidence un lien explicite entre phénomènes terrestre et céleste.

La seconde piste développée, distincte et complémentaire, consiste à considérer en détail

22. L'usage de la notion de « circonstances physiques » permet de plus de s'écarter d'un sens autonome du concept de force, en évitant de baser celui-ci sur l'idée intuitive d'action. Le fait de considérer l'explication en termes de forces comme *la mise en relation entre l'accélération et certaines circonstances physiques de la situation*, explicite au premier abord le sens empirique de la notion d'action. En effet, définir ce que signifie « l'action » d'un aimant sur un clou, par exemple, nécessite d'explicitier qu'il s'agisse du fait que la mise en mouvement du clou soit liée à la présence de l'aimant. Ainsi la formulation proposée permet de définir le concept de force uniquement à partir de ces notions factuelles : l'accélération et les circonstances physiques qui lui sont corrélées, qui sont aussi concrètes que la position de l'aimant et du clou, leur vitesse, les matériaux dont ils sont composés.

le cas de l'impesanteur, dans le but de mettre en évidence la compatibilité entre l'image de l'astronaute en flottement et la présence d'une force de gravitation. La focalisation sur cet aspect est due à son rôle jugé central quant à l'origine de l'idée, chez les élèves, que la gravitation ne s'applique pas dans l'espace (4). Le problème proposé de la tour d'impesanteur vise à passer de la notion d'impesanteur associée à une absence de gravité, à la compréhension du lien entre l'impesanteur et le référentiel d'étude du mouvement.

Le développement d'une séquence d'enseignement et son expérimentation

Une séquence d'enseignement a été développée à partir des différents choix d'approches présentés.

Des activités ont de plus été conçues, à la fois pour favoriser l'assimilation du cours, et pour permettre d'obtenir des retours sur celui-ci.

Le premier type d'activité proposé consiste en un travail sur une synthèse écrite du cours. Il est demandé aux élèves de trouver dans le texte de la synthèse les passages précis contenant les arguments permettant de répondre à plusieurs questions, reprenant les aspects du contenu particulièrement non évidents pour le sens commun. Cette activité fait écho à la volonté d'explicitation et de justification de ces aspects non évidents, ayant fortement structurée la conception de la séquence. Elle est également un moyen de favoriser l'appropriation du cours par les élèves, en leur demandant une attention particulière sur la synthèse. Du point de vue de l'évaluation de la séquence, cette activité avait pour objectif d'évaluer la capacité des élèves, suite au cours, à identifier les arguments permettant de justifier certaines propositions de la théorie, *a priori* non évidentes pour le sens commun.

Le second type d'activité proposé aux élèves consiste à faire reconstruire le cheminement logique du cours par les élèves, en remplaçant les différentes étapes sur un schéma de la structure de ce cheminement, à la façon d'un « puzzle ». Dans une première phase, les élèves doivent travailler sur ce schéma individuellement. Il leur est ensuite demandé de constituer des binômes et de comparer leurs puzzles respectifs. Cette activité a également pour but de favoriser l'appropriation du cours, en demandant aux élèves de rechercher par eux-mêmes les liens logiques entre les différents éléments, permettant de reconstituer le cheminement vu en cours. Du point de vue de l'évaluation de la séquence, cette activité permet d'avoir un retour sur la compréhension de la logique globale de la séquence par les élèves. De plus la comparaison en binômes peut permettre de faire

exprimer par les élèves les arguments qu'ils donnent pour justifier leurs choix, ainsi que ceux qui permettent de les convaincre lors de la discussion.

La séquence complète développée, cours et activités, a été expérimentée avec un public de 17 étudiants de L1 de physique, puis avec 13 élèves de lycée (première S et terminale S). Sa durée totale a été d'environ 6 heures avec les étudiants, et de 7 heures 30 avec les lycéens, essentiellement en raison d'approfondissements supplémentaires d'aspects mathématiques.

Synthèse des résultats majeurs obtenus

Les résultats obtenus lors des expérimentations - à partir des interventions d'élèves pendant la séquence, des différents questionnaires, et des activités proposées - apportent plusieurs retours sur différents aspects de l'approche développée.

Certains choix semblent avoir eu des effets favorables pour les élèves. En particulier :

- l'utilisation des différentes interprétations de la chute libre a suscité de vives réflexions et discussions ;
- la formulation du concept de force au sens de Newton, à partir de la notion de mouvement naturel de référence, est plusieurs fois apparue comme inattendue et intéressante ;
- la définition proposée du référentiel galiléen, visant à éviter le problème de la circularité, a également été perçue positivement.

Plusieurs difficultés de compréhension ont également été pointées, notamment :

- l'utilisation de la notion de circonstances physiques associées à l'accélération, lors de la construction de la grandeur force ;
- la possibilité de plusieurs types de mouvements à partir d'un vecteur accélération similaire, lors de la comparaison de l'accélération centripète de la Lune et de l'accélération de chute sur Terre ;
- et enfin la persistance de l'idée du rôle de l'air pour la chute, lors de la présentation de la situation d'impesanteur.

Les retours obtenus suggèrent des pistes de reformulation, de réarrangements, ou d'ajouts d'exemples, qui vont permettre d'orienter le travail sur une prochaine version de la séquence.

Vis-à-vis des activités de recherche d'arguments dans la synthèse écrite du cours, les résultats obtenus témoignent dans l'ensemble de leur faisabilité. Les réponses correspondant précisément aux passages attendus ont en effet été trouvées, en proportion

la plupart du temps majoritaire par les étudiants L1 physique. D'autre part, l'hétérogénéité des résultats - en particulier chez les 1^{ère}S - semble indiquer que le niveau de difficulté de ces activités n'est pas pour autant trop faible.

Un constat similaire a été fait pour les deux activités de reconstitution de logique de cheminement. La proportion de 3/4 de réponses justes pour les étudiants de L1 à chacun des deux puzzles montre leur faisabilité. L'écart de plus de 30% de réponses justes avec un groupe d'étudiants n'ayant pas suivi la séquence, semble indiquer que celle-ci a effectivement permis de retrouver certains enchaînements logiques corrects. Lors d'une seconde résolution des puzzles par les L1 physique, environ deux mois après la séquence, un nombre total similaire de réponses justes est obtenu (de l'ordre de 3/4). Ce résultat semble rendre compte d'une certaine persistance de la compréhension de la logique du schéma.

Part ailleurs, un fort intérêt a été observé pour les deux types d'activités proposées, jugées très majoritairement utiles ou très utiles par les élèves pour l'appropriation du cours.

Une sensibilité des élèves à la justification

Un résultat particulièrement marqué a été obtenu vis-à-vis de la perception de l'état d'esprit global de l'approche proposée. 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, 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».

Ces résultats sont à rapprocher du point de vue épistémologique - à la fois trivial et fondamental - considéré à la base de ce travail : le fait que les concepts et théories physiques soient le résultat d'une certaine construction. Des expressions de cette idée se retrouvent dans 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 - L1Phy)

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

Vis-à-vis du contenu, un fort intérêt pour le rôle d'unification de la théorie de gravitation a été observé. Les passages du cours concernant la distinction historique entre mondes terrestre et céleste, ainsi que le passage crucial du raisonnement aboutissant à leur mise en relation, sont cités comme les plus intéressants par la grande majorité des élèves.

Il peut être supposé que les effets de la séquence sur la représentation de la nature de la physique - les idées de construction et de mise en relation - pourraient également contribuer à une meilleure compréhension des concepts, ainsi que cela a été mis en évidence par certains chercheurs.

« Students holding more sophisticated epistemological views tend to approach learning more actively and tend to acquire a better conceptual understanding. » (Louca et al., 2004)

La difficulté d'évaluation des idées centrales proposées

Il convient de réfléchir sur le statut et la portée des résultats obtenus. En particulier, dans quelle mesure les retours des élèves permettent-ils d'évaluer les choix centraux des approches proposées - argumentés dans les chapitre 3 et 4 - à partir desquels la séquence d'enseignement a été construite ? Il s'agit d'être conscient de la quantité d'intermédiaires séparant ces idées initiales des moyens utilisés pour obtenir des retours sur la séquence.

A partir des mêmes choix d'approches - comme par exemple celui d'utiliser la notion de mouvement naturel de référence pour définir le concept de force - le cours aurait pu être présenté d'une manière différente, avec un autre dosage des éléments utilisés pour aborder cette idée, ou un autre ordre pour les introduire.

De même à partir d'un même cours, sa présentation en classe est également sujette à une grande variabilité. Plus ou moins de temps peut être passé sur certains passages.

L'insistance sur un certain aspect peut varier, par la quantité de reformulations proposées ou d'illustrations par des exemples, autant de détails pouvant avoir un fort impact sur la compréhension de l'aspect concerné.

Pour un même cours, écrit et oral, plusieurs types d'activités pourraient être proposés. Or la nature de ces activités vont également avoir un rôle crucial pour favoriser ou non l'assimilation des idées du cours par les élèves.

Enfin, pour un type d'activité donnée, la manière dont elle va être conçue, en particulier la formulation de la consigne, des questions posées, va conditionner pour une part importante les réponses données par les élèves.

Les retours oraux des élèves, de même que les résultats obtenus aux activités proposées, dépendent potentiellement de l'ensemble de ces différents niveaux. Par exemple, pour une question d'une activité mettant en jeu un choix didactique central de l'approche proposée, un résultat particulièrement négatif peut toujours être interprété comme un effet, potentiellement combiné :

- de la formulation de la question posée,
- de la nature de l'activité proposée,
- de la manière dont l'aspect en question a été introduit, formulé, et illustré dans le cours,
- du temps passé à le développer, le reformuler à l'oral,
- et enfin, de ce que l'on cherche à évaluer : la nature même du choix didactique en jeu, et le bien-fondé de son intérêt relativement au problème d'apprentissage visé.

Cette considération est également valable pour des résultats positifs, qui peuvent aussi être interprétés comme liés à la facilité de l'activité proposée, ou encore à une insistance particulièrement forte sur l'aspect en question lors de la présentation du cours, facilitant l'obtention du résultat attendu.

La nécessaire complexité d'un enseignement, intégrant inévitablement l'ensemble des composantes citées précédemment, rend très difficile d'évaluer les idées centrales des approches proposées, pour la compréhension et l'apprentissage du sujet concerné.

Ainsi la séquence développée et expérimentée est seulement *une* manière de mettre en œuvre les approches de la dynamique et de la gravitation ayant été argumentées dans les chapitres 3 et 4. Elle implique un grand nombre de choix supplémentaires, à différents niveaux, qui sont également sujets à remise en question. Les retours obtenus via l'expérimentation ne permettent de juger que de *l'ensemble* de ces choix, nécessairement combinés.

La lucidité sur la difficulté d'interprétation des observations effectuées ne diminue pas pour autant la valeur des résultats obtenus. Ceux-ci ont notamment permis de mettre en évidence certains problèmes concernant différents aspects particuliers du cours et des activités, qui vont être très utiles pour la conception d'une nouvelle version de la séquence.

Cependant cette remarque finale a pour but de mettre en avant que les arguments principaux pour les idées centrales de l'approche développée se situent ailleurs que dans les résultats des expérimentations réalisées.

En amont de ces résultats, la pertinence des choix didactiques proposés pour introduire et formuler le contenu dépend de la valeur accordée aux argumentations qui les justifient. Bien qu'il s'agisse de réflexions essentiellement théoriques, elles restent cependant fortement ancrées à l'expérience, par leur appui central sur la littérature sur les difficultés des élèves, ayant permis d'identifier les problèmes d'apprentissage visés.

Perspectives

Les résultats obtenus lors des expérimentations ont apporté de nombreux éléments pour travailler sur une prochaine version de la séquence. Des difficultés sur des aspects particuliers ont été identifiées, des pistes de reformulation, de réarrangement, ou d'ajout d'exemple ont été dégagées. Des expérimentations ultérieures, prenant en compte ces modifications, pourront permettre de les tester, et d'affiner encore davantage la présentation développée.

D'autres méthodologies sont également à considérer pour ces expérimentations. Des entretiens individuels suite à la séquence pourraient être utilisés, afin d'approfondir les difficultés ressenties, et la perception de certains choix d'approche. Une analyse plus détaillée de la résolution des activités de puzzle, ainsi que de leur comparaison en binôme, est également à réfléchir.

Vis-à-vis du contenu, les données obtenues à propos du problème sur l'impesanteur n'ont pas encore été exploitées, et vont également donner lieu à un prolongement de cette recherche. La persistance observée des conceptions, lorsque les élèves sont face à la situation problématique de l'impesanteur, a confirmé l'importance de traiter cet aspect. Il s'agit désormais d'analyser dans quelle mesure le problème proposé permet d'avoir un impact sur ces difficultés.

Une version « allégée » de la séquence a également été expérimentée avec deux autres publics, plus éloignés du niveau initialement visé :

- des étudiants de première année de philosophie à l'université, dans le cadre d'un cours optionnel de physique,
- des étudiants en troisième année de licence pluridisciplinaire, de profils différents (scientifique, littéraire ou autre), dans le cadre d'un cours de didactique de la physique.

Des adaptations de certains passages mathématiques ont été développées, avec l'objectif de rendre accessible l'essentiel du cheminement présenté, pour des étudiants de profil majoritairement littéraire. L'analyse de résultats pourra permettre d'autres retours sur la séquence, en particulier relativement aux problèmes que posent (ou non) un bagage mathématique plus réduit.

Par ailleurs, la question de la prise en compte du point de vue des enseignants n'a pas été investie dans le développement de cette approche. Un travail de co-construction d'une autre version de la séquence - adaptée aux contraintes institutionnelles et pratiques de la classe - est à envisager, en particulier dans le but de favoriser une meilleure appropriation de cette approche par les enseignants. D'une manière générale, la réflexion sur la diffusion de la séquence est à considérer. Celle-ci nécessite la mise en place de moyens pour sensibiliser aux intérêts qu'elle peut présenter, mis en évidence dans ce travail.

Enfin, les retours très positifs sur la perception de l'approche de reconstruction proposée, encouragent la réflexion sur d'autres contenus pouvant se prêter à cette démarche. En particulier le cas de l'électromagnétisme, seconde grande théorie de la physique classique, est considéré. Le développement d'un cheminement permettant d'aboutir aux équations de Maxwell, et en particulier de justifier l'usage du langage mathématique associé, a été engagé.

Annexes

Annexe A

Diaporama de support de la séquence Dynamique et Gravitation

La théorie newtonienne de la dynamique et de la gravitation

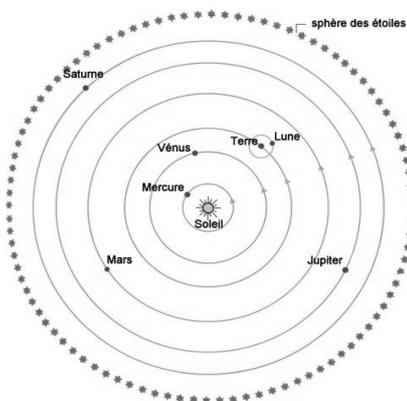
Un approche inspirée de l'histoire des idées

Valentin Maron

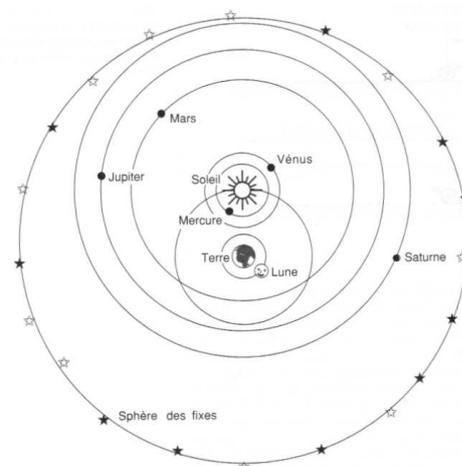
valentin.maron@gmail.com , bâtiment Condorcet, bureau 846A.

Deux modèles du mouvement des astres

2



Le modèle de Copernic (1543)



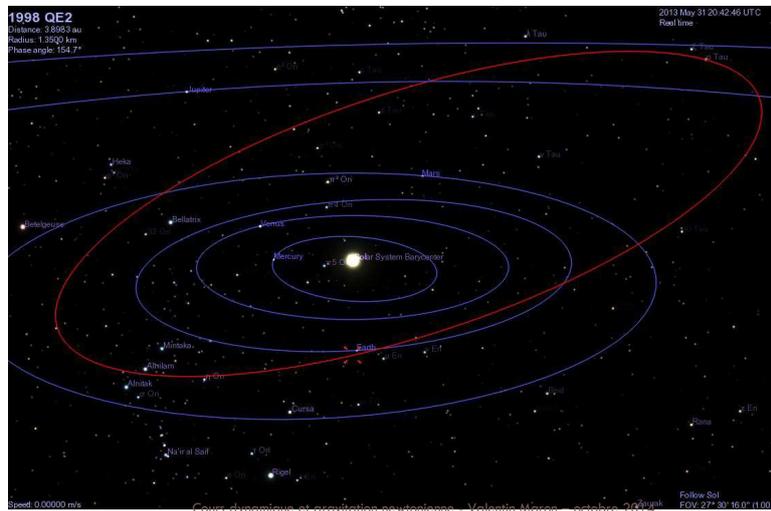
Le modèle de Tycho Brahe (1588)

Deux modèles du mouvement des astres

3



□ Visualisation 3D avec Célestia



Plan du cours

4

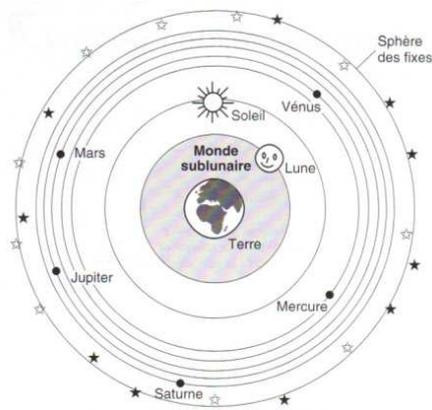
- Introduction : quelle justification du modèle héliocentrique ?
- I – La compréhension du monde avant Newton
- II – Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force
- III – L'analyse de la révolution des astres selon les lois du mouvement
- IV – La grande synthèse de Newton
- V – Un appartement en impesanteur

I La compréhension du monde avant Newton

I - La compréhension du monde avant Newton

6

□ Platon et la distinction entre Terre et Ciel.



Monde de Platon (-400 av. JC)

- **Monde terrestre, « sublunaire »**
Monde humain, lieu de diversité et d'impermanence.
- **Monde céleste**
Monde divin, lieu des astres, parfaits et éternels.

Une différence physique fondamentale :
La description du mouvement entre mondes terrestre et céleste.

I - La compréhension du monde avant Newton

7

□ Aristote et la théorie des mouvements naturels.

Mouvement naturel : mouvement qui a lieu de lui-même, qui ne nécessite pas de force pour l'expliquer (\neq « mouvements violents »)

➤ Monde terrestre

Les mouvements naturels des corps dépendent de leur composition (Terre, Eau, Air, Feu), et leur direction correspond à la hiérarchie des « lieux naturels » de chaque élément (*là où le corps « veut » aller*).

Exemples : goutte de pluie, bulle d'air dans l'eau, flamme...

Mouvement naturel le plus courant : **la chute verticale** des objets.

➤ Monde céleste

Mouvement naturel des astres : **le mouvement circulaire**.

Monde céleste nécessairement formé d'un autre élément : l'« Ether ».



feu
air
eau
terre

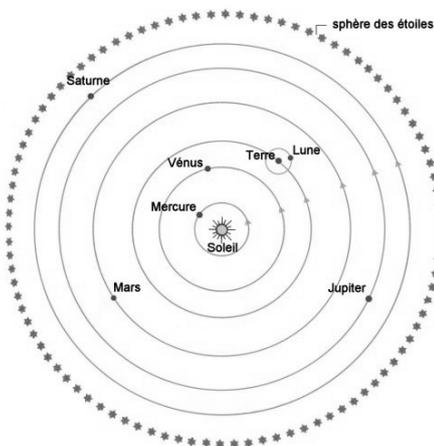
Hiérarchie des lieux naturels de chaque élément du monde terrestre

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

I - La compréhension du monde avant Newton

8

□ Copernic et la proposition de changement de centre



- Plusieurs centres de révolution ?
- Terre au milieu du Ciel ?
- Mais encore distinction entre Terre et Ciel au niveau des mouvements :
mouvement de chute sur Terre
VS mouvement de révolution des astres

Système de Copernic (1543)

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

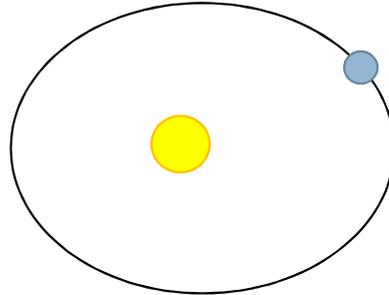
I - La compréhension du monde avant Newton

9

□ Kepler et les lois du Ciel

3 lois sur le mouvement des planètes :

- Trajectoire légèrement elliptique
- La vitesse d'une planète augmente quand elle est plus près du Soleil.
- Relation entre la période et la distance moyenne au Soleil.



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

I - La compréhension du monde avant Newton

10

□ Kepler et les lois du Ciel

- Lien entre la période de révolution T et la distance moyenne au Soleil r ?

le rapport $\frac{T^2}{r^3}$ est le même pour toutes les planètes !

$$\frac{T_{\text{mercure}}^2}{r_{\text{mercure}}^3} = \frac{T_{\text{venus}}^2}{r_{\text{venus}}^3} = \frac{T_{\text{terre}}^2}{r_{\text{terre}}^3} = \frac{T_{\text{mars}}^2}{r_{\text{mars}}^3} = \frac{T_{\text{jupiter}}^2}{r_{\text{jupiter}}^3} = \frac{T_{\text{saturne}}^2}{r_{\text{saturne}}^3} = C$$

Pour toutes les planètes : $T^2 = C r^3$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

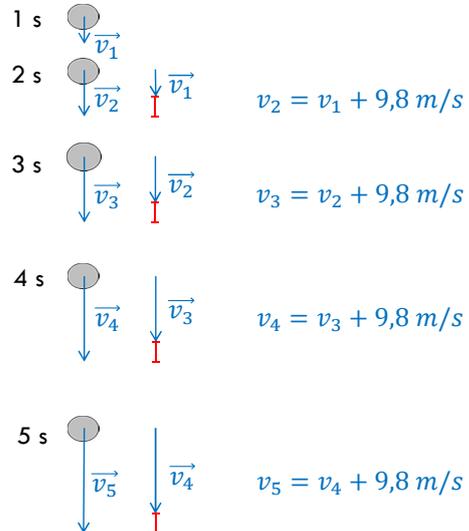
I - La compréhension du monde avant Newton

11

□ Galilée et la chute des corps

> Tous les corps tombent de la même façon, quelque soit leur masse.

> Avec une accélération constante, de valeur $9,8 \text{ m/s}^2$.



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

I - La compréhension du monde avant Newton

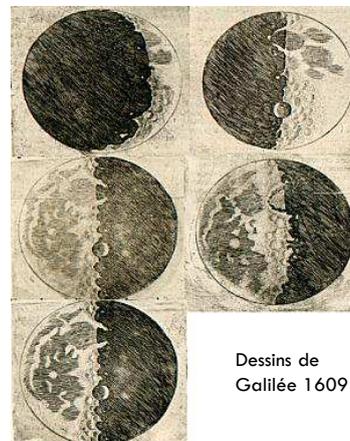
12

□ Galilée et la lunette astronomique

> Relief sur la Lune

> Taches sur le Soleil

=> Remise en question de la distinction entre monde terrestre et monde céleste



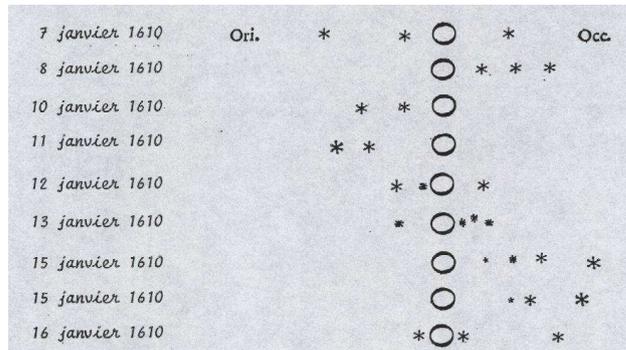
Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

I - La compréhension du monde avant Newton

13

□ Galilée et la lunette astronomique

➤ Découvertes des satellites de Jupiter



⇒ Plusieurs centres de révolution sont donc possibles...

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

I - Résumé du contexte et position du problème

14

- Possibilité de concevoir la Terre à une place non privilégiée au milieu des autres planètes plutôt qu'au centre du monde. (Copernic)
- On a perdu la perfection de la trajectoire circulaire des astres avec les orbites elliptiques. (Kepler)
- Plusieurs centres de révolution sont possibles, les satellites de Jupiter. (Galilée)
- Il y a des montagnes et des vallées sur la Lune (Galilée)
- Et même des taches sur le Soleil (Galilée)
- Disparition d'une étoile (Tycho Brahe)

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

I - Résumé du contexte et position du problème

15

Mais ,

- Dans le monde céleste, les astres tournent.
- Alors que sur Terre, les objets tombent.

Si ces deux mondes ne sont pas si différents, pourquoi ces mouvements naturels le sont-ils ?

Quels liens pourrait-il bien y avoir entre ces deux types de mouvement ?

=> Nécessité d'analyser plus précisément la notion de mouvement, réflexion qui va mener aux « trois lois du mouvement de Newton ».

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II

**Dynamique : les lois du mouvement
et le concept de force**

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

1) Force et explication

17

- « l'objet bouge parce que je le pousse »
=> « j'exerce une force sur l'objet »
- « Le clou se déplace parce qu'il est attiré par l'aimant »
=> « l'aimant exerce une force sur le clou »

- Au sens général : **la force comme la notion qui explique le mouvement.**

- A propos de la notion d'explication :
 - **Qu'est-ce qu'on explique ?** Ex : on explique un comportement anormal, relativement à ce qui est considéré comme la normalité.
 - **Comment on l'explique ?** Ex : Positions lever et coucher du Soleil expliquées par la mise en relation avec la rotation de la Terre sur elle-même.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

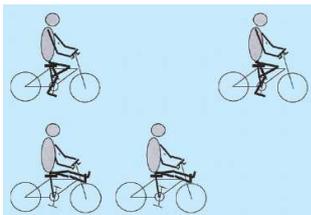
II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

1) Force et explication

18

- A propos de la notion d'explication :
 - **Qu'est-ce qu'on explique ?** « la force comme la notion qui explique le mouvement. »
 - Comment on l'explique ?

- **Quels mouvements cherchent-t-on à expliquer ? Tous les mouvements nécessitent-ils d'être expliqués par une force ?**



Dans la vie courante, comment explique t'on ces différents cas ?

L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

1) Force et explication

19

- A propos de la notion d'*explication* :

- Qu'est-ce qu'on explique ?

- **Comment on l'explique ?**

« la force comme la notion qui **explique** le mouvement. »

- D'une manière générale dans une explication, on **met en relation** ce qu'on veut expliquer avec quelque chose d'autre.

- **On explique un mouvement, en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.**

Exemples : mouvement d'un clou ↔ présence d'un aimant, distance...

vélo à vitesse constante ↔ le fait de pédaler

Le mouvement à expliquer étant **différent du mouvement considéré comme ayant lieu de lui-même, naturellement.**

(Ex : pour le vélo : le ralentissement progressif jusqu'à l'arrêt).

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

2) Force et mouvement naturel, dans l'histoire des idées

20

Aristote (*philosophe et scientifique grecque, - 300 av. JC*)

- Mouvement naturel : mouvement qui a lieu de lui-même, qui ne nécessite pas de force pour l'expliquer.
 - Les mouvements en direction du lieu naturel (Terre, Eau, Air Feu), en particulier : la chute libre des objets, rectiligne vers le bas.
 - Le mouvement des astres dans le ciel, circulaire.



- Mouvement violent : mouvement causé par force.
Exemples : le mouvement d'un objet poussé ou jeté.

Distinction encore présente chez Galilée (physicien italien du 17^{ème} siècle)

Force (au sens général): concept permettant d'expliquer un mouvement qui diffère du mouvement naturel. D'expliquer la variation du mouvement naturel.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

2) Force et mouvement naturel, dans l'histoire des idées

21

D'**Aristote** (-300) à **Galilée** (1630)

chute libre : mouvement naturel,
pas de force.

Newton (1680)

chute libre : mouvement sous
l'action d'**une force** : le poids.

Or au niveau des expériences, Galilée et Newton connaissaient exactement les mêmes choses à propos du mouvement de chute libre.

L'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter.

=> **Quelle est la définition de la force dans la théorie de Newton ?**

Or la définition du concept de force dépend du mouvement considéré comme naturel.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

3) Le concept de force au sens de Newton

22

Le concept de force au sens de Newton :

□ 1^{ère} loi (restreinte au référentiel terrestre) :

Le mouvement choisis comme mouvement naturel de référence est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \overline{cste}$), incluant le repos : ($\vec{v} = \vec{0}$).

Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \overline{cste}$).

- Un mouvement qui se conserve dans la même direction et à la même vitesse
=> alors aucune force au sens de Newton associée à ce mouvement.
=> Donc aucune force « transmise » du lanceur à l'objet, au sens de Newton.



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

4) Retour sur le cas de la chute libre

23

- La vitesse augmente au cours de la chute libre.
=> interprétation de cette accélération comme associée à une force au sens de Newton.
 - Particularité de cette définition de la force : pas nécessaire de pouvoir reconnaître les circonstances physiques associées au mouvement.
 - Pour la chute libre, a priori, pas de circonstances particulières.
 - Phénomène omniprésent, pouvant avoir lieu constamment et partout.
 - On ne peut pas le faire cesser (\neq aimants, où il suffit de l'enlever).
 - Il concerne tous les objets (\neq aimants).
- => Légitime que la chute ait été considérée comme un mouvement naturel pendant si longtemps dans l'histoire des idées (jusqu'à Newton).

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

5) Définition quantitative de la grandeur physique force

24

Résumé des étapes précédentes

- Première définition générale : « la force comme ce qui explique le mouvement ». On explique le mouvement en le reliant aux circonstances physiques auquel il est associé.
- Pas tous les mouvements, seulement ceux qui sont différents du mouvement considéré comme naturel.
- 1^{ère} loi de Newton : choix du mouvement naturel considéré : le MRU.
- **Définition newtonienne** : le concept de force (au sens de Newton) comme caractérisant les circonstances physiques associées à la variation du MRU. Circonstances la plupart du temps identifiables, mais pas nécessairement (cf. chute libre).

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

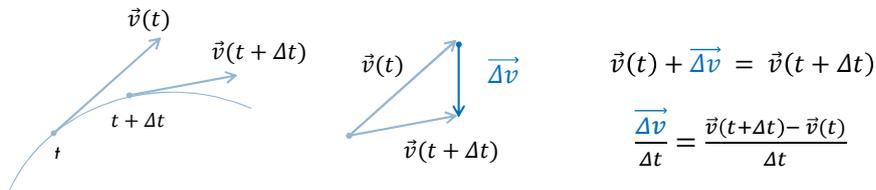
II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

5) Définition quantitative de la grandeur physique force

25

Définition mathématique de la variation du mouvement naturel :

- Le concept de force au sens de Newton est associé à la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \text{cste}$).
- Formellement : la variation du vecteur vitesse, $\overrightarrow{\Delta v}$.
- La variation du vecteur vitesse est relative à un intervalle de temps Δt qui sépare les deux instants où on compare le vecteur vitesse :



- En un point, on utilise le vecteur accélération : $\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{\Delta v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

5) Définition quantitative de la grandeur physique force

26

Le concept de force au sens de Newton comme caractérisant **les circonstances physiques** associées à **la variation du mouvement rectiligne uniforme**.

- Le concept de force au sens de Newton comme caractérisant **les circonstances physiques** associées à **l'accélération**

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{\Delta v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$$

- Définition indépendante du fait que l'on puisse identifier a priori les circonstances physiques associées à l'accélération.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

5) Définition quantitative de la grandeur physique force

27

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton

Le concept de force au sens de Newton comme caractérisant **les circonstances physiques** associées à l'**accélération** $\vec{a}(t)$

□ Dépendance en l'accélération

Exemples de différents aimants

- Avec différents aimants, on observe des accélérations différentes.
Une première façon de quantifier la « puissance » de l'aimant (les circonstances physiques associées à l'accélération) :
⇒ par le vecteur accélération lui-même.
- Une accélération plus grande sera associée à un aimant « plus puissant ».

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

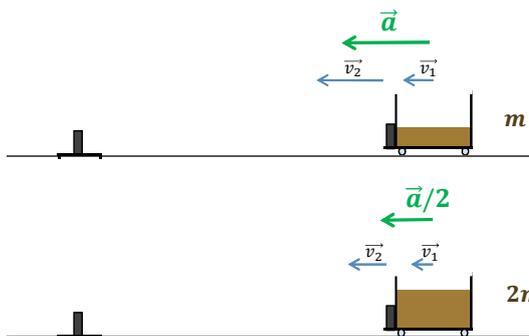
5) Définition quantitative de la grandeur physique force

28

Lorsque les circonstances associées à l'accélération sont identifiables, l'expérience montre que pour les mêmes circonstances, deux objets de masse différente n'ont pas la même accélération.

➤ Exigence pour la définition de la grandeur :

Pour les mêmes circonstances physiques, la grandeur \vec{F}^{Newt} doit avoir une même valeur.



Or expérimentalement :
pour les mêmes circonstances physiques, la valeur de l'accélération est inversement proportionnelle à la masse.
Donc le produit $m \times a$ est constant pour les mêmes conditions physiques.

On peut donc poser
comme définition :
$$\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

7) La troisième loi de Newton

31



Expérimentalement,

on observe que : $\frac{\|\vec{a}_1\|}{\|\vec{a}_2\|} = \frac{m_2}{m_1}$

soit : $m_1 \|\vec{a}_1\| = m_2 \|\vec{a}_2\|$

Avec notre définition de la grandeur force au sens de Newton : $\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$,

on peut aussi écrire : $\|\vec{F}_1^{Newt}\| = \|\vec{F}_2^{Newt}\|$

et puisque les directions de \vec{a}_1 et \vec{a}_2 sont opposées, on a : $\vec{F}_1^{Newt} = -\vec{F}_2^{Newt}$

$m_1 \|\vec{a}_1\| = m_2 \|\vec{a}_2\|$ vérifiée seulement si **les accélérations de 1 et 2 sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, et pas à d'autres circonstances physiques extérieures à 1 et 2**. Autrement dit, uniquement lorsque les circonstances en jeu extérieures au système 1 sont seulement attribuables au système 2. On peut dire que la force associée à l'accélération du système 1 est exercée par le système 2. On note : $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}^{Newt} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}^{Newt}$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

8) Force et déformation

32

- Au sens courant, notion de force pour expliquer le mouvement, mais aussi pour expliquer la déformation d'un objet ou d'un milieu.
- En effet en général, les circonstances physiques pouvant être associées à une accélération peuvent également être reliées à une déformation.
- Lorsque les circonstances physiques associées à une accélération impliquent dans un autre contexte une déformation, cela signifie que d'autres circonstances physiques sont en jeu, qui s'opposent à l'accélération qui aurait lieu en leur absence. Pour le cas de la chute, il s'agit de la résistance du sol.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

9) La décomposition en un système de force

33

Comment passer de la détermination de la force résultante à la décomposition en un système de forces ?

- Par construction, \vec{F}^{Newt} est la grandeur caractérisant les circonstances associées au mouvement accéléré.
- Souvent, on peut identifier **plusieurs circonstances distinctes** associées à l'accélération observée (pouvant aussi être une accélération nulle).
- La grandeur \vec{F}^{Newt} caractérise alors l'ensemble de celles-ci.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

9) La décomposition en un système de force

34

Cas d'un objet posé sur une table

$$\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \vec{F}_{repos}^{Newt} = \vec{0}$$

- Or **les circonstances associées à l'accélération de chute sont toujours présentes** (car si il n'y avait pas eu la table, la chute aurait continué), et à celles-ci s'ajoute la présence de la table :

$$\vec{F}_{totale}^{Newt} = \vec{F}_{chute}^{Newt} + \vec{F}_{table}^{Newt} = \vec{0}$$

- Ayant déterminé $\vec{F}_{chute}^{Newt} = m\vec{g}$ pour le cas de la chute libre, c'est-à-dire dans un autre contexte expérimental, on peut déterminer :

$$\vec{F}_{table}^{Newt} = -\vec{F}_{chute}^{Newt} = -m\vec{g}$$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

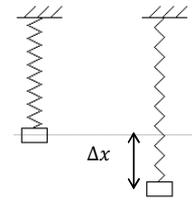
II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

9) La décomposition en un système de force

35

□ Exercice ressort

Lorsqu'un objet de masse m est accroché à un ressort, on observe en situation statique une élongation de celui-ci, notée Δx . De plus pour un même ressort, avec différentes masses, lorsque m augmente, Δx augmente proportionnellement.



Comment caractériser la grandeur $\vec{F}_{ressort}^{Newt}$ associée au ressort uniquement à partir des caractéristiques du ressort ?

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

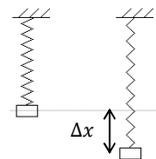
9) La décomposition en un système de force

36

□ Exercice ressort

Lorsqu'un objet de masse m est accroché à un ressort, on observe en situation statique une élongation de celui-ci, notée Δx . De plus pour un même ressort, avec différentes masses, lorsque m augmente, Δx augmente proportionnellement.

Comment caractériser la grandeur $\vec{F}_{ressort}^{Newt}$ associée au ressort uniquement à partir des caractéristiques du ressort ?



De même que pour le cas de l'objet sur une table, où l'accélération est nulle, on sait que les circonstances associées à l'accélération de chute sont toujours présentes (car si décroche l'objet du ressort, il chute), et à celles-ci s'ajoute la présence du ressort, qui s'oppose au mouvement de chute. On peut donc écrire :

$$\vec{F}_{totale}^{Newt} = \vec{F}_{chute}^{Newt} + \vec{F}_{ressort}^{Newt} = \vec{0}$$

donc

$$\vec{F}_{ressort}^{Newt} = -\vec{F}_{chute}^{Newt} = -m\vec{g}$$

De plus expérimentalement : $m \nearrow \Rightarrow \Delta x \nearrow$ d'où : $F_{ressort}^{Newt} \propto \Delta x$

Ainsi, si l'on veut caractériser la force associée au ressort par les propriétés du ressort, on utilise une expression du type : « $F = k\Delta x$ », où la constante de proportionnalité k caractérise le ressort.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

9) La décomposition en un système de force

37

Comment passer de la détermination de la force résultante à la décomposition en un système de forces ?

- Pour attribuer différentes circonstances physiques à une accélération (pouvant être nulle, dans le cas statique) **il faut considérer le mouvement qui pourrait avoir lieu avec les circonstances en présence, si l'on fait abstraction de certaines d'entre elles.**
- Pour attribuer différentes composantes de l'accélération à chacune des circonstances physique en présence, il faut d'autres expériences que celle initiale, où certaines des circonstances sont absentes.
- Dans de nombreux cas, la composante d'accélération due à certaines circonstances a lieu nécessairement en présence d'autres circonstances, par exemple le ralentissement lié à la présence de l'air pendant la chute d'un objet.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

9) La décomposition en un système de force

38

Exercice parachutiste

- Un parachutiste a sauté d'un avion, son parachute est ouvert, et il tombe à une vitesse constante V . Que vaut la force résultante qui s'exerce sur lui ?
Comment trouver la valeur de la force due à la présence du parachute, f ?
- On constate expérimentalement que si la masse du parachutiste est plus grande, la vitesse limite du parachutiste augmente proportionnellement (en première approximation). Que peut-on en conclure pour modéliser la force f liée à la résistance de l'air dans le parachute ?

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

10) Etude du mouvement circulaire uniforme (réf. terrestre)

39

- Mobile aéroporté accroché à un fil, dans le plan horizontal : mouvement circulaire uniforme (MCU).
 - la direction du mouvement change constamment, il y a donc une variation du MRU, que l'on interprète alors en termes de force au sens de Newton.
 - La circonstance physique associée à cette variation : la présence du fil qui retient le mobile.
- ⇒ Pour la quantifier la tension du fil via la grandeur force, il faut déterminer le vecteur accélération correspondant à cette variation du vecteur vitesse.

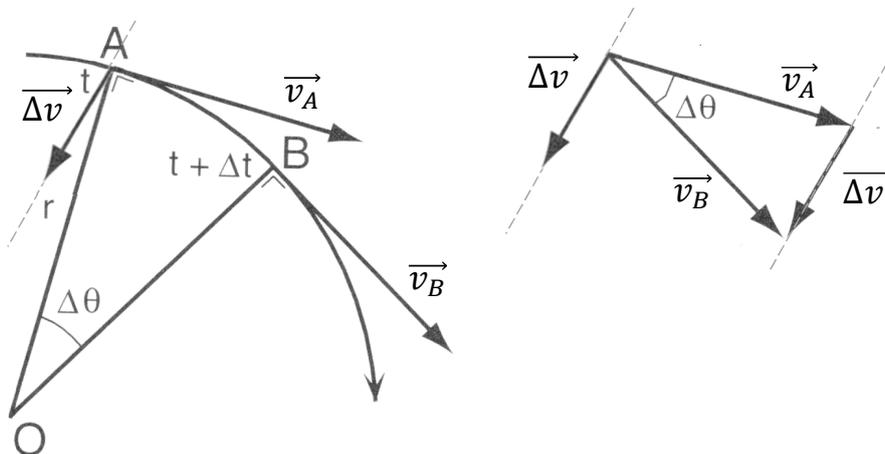
Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

10) Etude du mouvement circulaire uniforme (réf. terrestre)

40

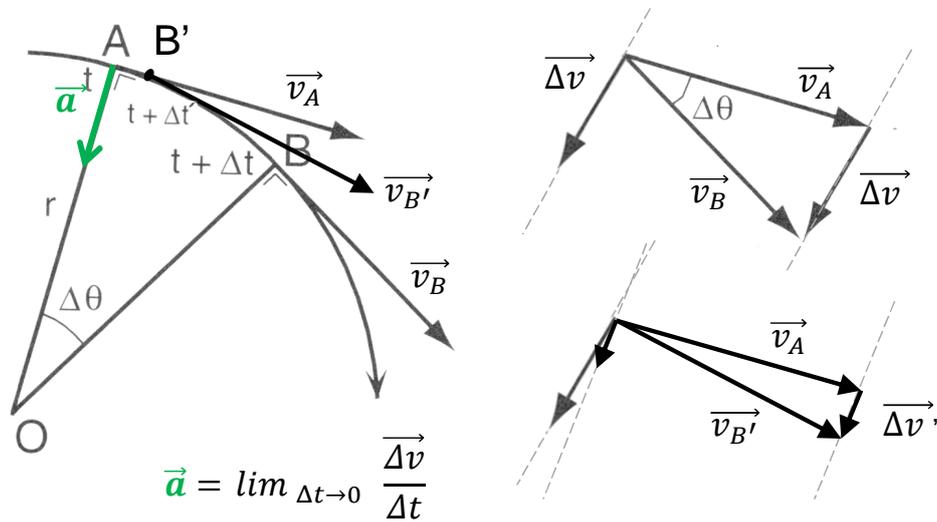
Détermination géométrique du vecteur accélération



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force
 10) Etude du mouvement circulaire uniforme (réf. terrestre)

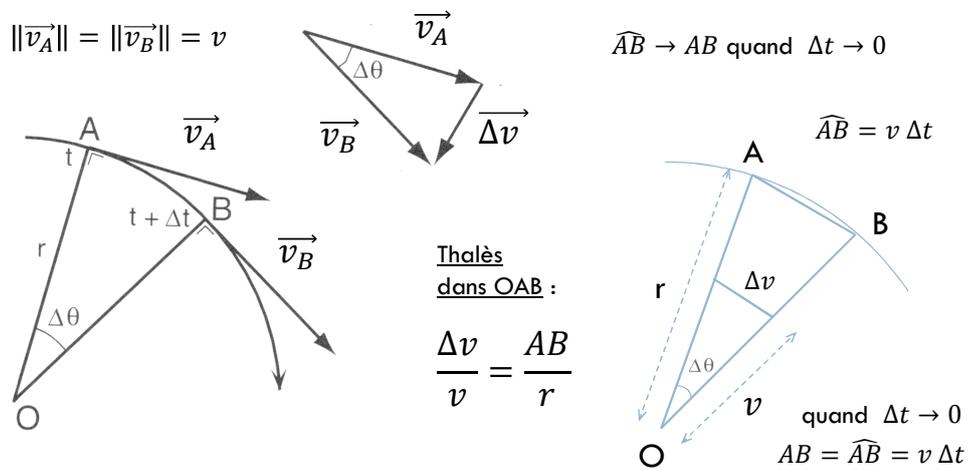
41



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force
 10) Etude du mouvement circulaire uniforme (réf. terrestre)

42



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

10) Etude du mouvement circulaire uniforme (réf. terrestre)

43

Thalès dans OAB :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{AB}{r}$$

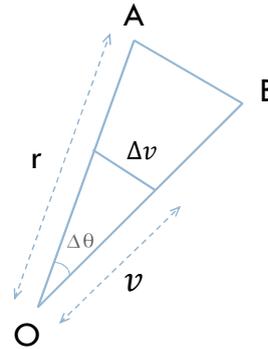
quand $\Delta t \rightarrow 0$
 $AB = v \Delta t$

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{v \Delta t}{r}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$a = \frac{v^2}{r}$$



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

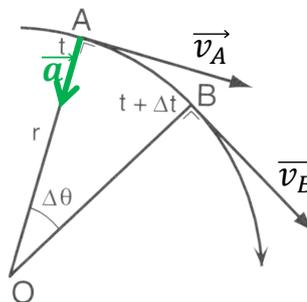
10) Etude du mouvement circulaire uniforme (réf. terrestre)

44

En résumé, pour un mouvement circulaire uniforme, on a :

- vecteur accélération \vec{a}
 dirigée vers le centre du cercle
 « accélération centripète »

- de valeur : $a = \frac{v^2}{r}$



La circonstance physique à laquelle peut être associée ce vecteur accélération et la présence du fil qui retient le mobile. On peut donc parler de la force exercée par le fil sur le mobile, que l'on quantifie

par la grandeur : $\vec{F}_{fil/mobile}^{Newt} = -m \frac{v^2}{r} \vec{u}_N$.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

11) Extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels

45

- Jusqu'ici les 3 lois du mouvement ont été établies uniquement dans le référentiel terrestre.
(En prenant comme mouvement naturel de référence le mouvement rectiligne uniforme, relativement au référentiel terrestre).
- D'une manière générale, tout mouvement est relatif au référentiel dans lequel il est décrit.
Ex : train qui accélère, tourniquet => une composante d'accélération supplémentaire relativement à celle dans le référentiel du sol, bien que les circonstances physiques soient identiques par ailleurs.
- **Deux types d'accélérations :**
 - celles pouvant être interprétées comme associées à des circonstances physiques.
 - celles que l'on peut attribuer uniquement au choix du système de référence pour décrire le mouvement.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

II - Dynamique : les lois du mouvement et le concept de force

11) Extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels

46

- Pour un certain référentiel, les accélérations observées peuvent-elles être interprétées comme liées à des circonstances physiques ?
Ou bien sont-elles uniquement liées au choix du système de référence pour décrire le mouvement ?
- Référentiel galiléen
Un référentiel dans lequel toutes les accélérations observées peuvent être reliées à des circonstances physiques, indépendamment du mouvement de référentiel (relativement à un 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 la définition $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$, ainsi que la 3^{ème} loi : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt}(t) = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}(t)$.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

III

L'analyse de la révolution des astres selon les lois du mouvement

III - L'analyse de la révolution des astres

48

- Plusieurs des éléments de remise en question de la distinction entre phénomènes terrestres et célestes => incitation à **étendre la manière de décrire les mouvements sur terre aux mouvements des astres.**
- Pour les lois du mouvement de Newton (référentiel terrestre), la caractéristique du mouvement que l'on cherche à relier aux circonstances physiques est le **vecteur accélération**
- **Possibilité d'extrapoler la description du mouvement par les lois de Newton à d'autres référentiels où les accélérations observées peuvent également être reliées aux circonstances physiques.**
- La description du mouvement des planètes est particulièrement plus simple dans le référentiel héliocentrique, dans lequel ces mouvements sont de plus caractérisés par les lois de Kepler.

III - L'analyse de la révolution des astres

1) Le mouvement des planètes

49

- Approximation du mouvement circulaire uniforme pour le mouvement des planètes

- Kepler : orbite elliptique, pas exactement circulaire.
- Mais quand même très proche du cercle.

Ex: Orbite terrestre

-> distance max : $152 \cdot 10^6 \text{ km}$

-> distance min : $147 \cdot 10^6 \text{ km}$

=> écart à une orbite circulaire moyenne : $2,5 \cdot 10^6 \text{ km}$.

- Variation de vitesse sur la trajectoire
=> très faible aussi.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

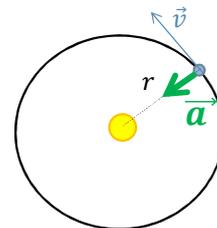
III - L'analyse de la révolution des astres

1) Le mouvement des planètes

50

- Approximation d'un mouvement circulaire uniforme

=> accélération centripète de valeur $a = \frac{v^2}{r}$



- Relation de Kepler : $\frac{T^2}{r^3} = C$ constante pour toute les planètes.

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$T^2 = C r^3$$

$$a = \frac{v^2}{r} = \left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 \times \frac{1}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \times \frac{1}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{C r^3} \times \frac{1}{r} = \underbrace{\left(\frac{4\pi^2}{C}\right)}_{\text{constante}} \times \frac{1}{r^2}$$

$$a \propto \frac{1}{r^2}$$

Hypothèse que ces accélérations soient liées à une circonstance physique particulière : la présence du Soleil aux centres des trajectoires, et la distance de chacune des planètes au Soleil.

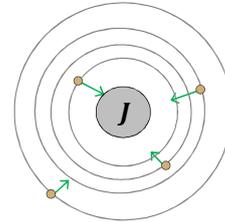
Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

III - L'analyse de la révolution des astres

2) Les satellites de Jupiter

51

Dans le référentiel centré sur Jupiter, trajectoires (quasiment) circulaires, et donc des accélérations centripètes, que l'on peut à nouveau facilement relier aux circonstances physiques : Jupiter au centre des trajectoires.



- Relation expérimentale de Kepler : $\frac{T^2}{r^3} = C_J$ pour les satellites de Jupiter.
 - Relation mathématique : $a = \frac{v^2}{r}$
- } $a \propto \frac{1}{r^2}$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

IV

La grande synthèse de Newton

IV – La grande synthèse de Newton

1) Résumé des différents éléments et rappel du problème

53

- > Pendant plus de 2000 ans : distinction fondamentale entre monde terrestre et monde céleste. (Platon, Aristote, Ptolémée)
- > Puis, proposition d'un changement de point de vue : Les planètes tournent autour du Soleil, y compris la Terre, qui se retrouve à une position quelconque dans le Ciel. (Copernic)
- > Dans ce cadre, lien entre le mouvement des planètes.
Pour toutes les planètes : $\frac{T^2}{r^3} = C$. (Kepler)

Analyse du mouvement circulaire uniforme :
accélération centripète, de valeur $a = \frac{v^2}{r}$.

En utilisant la relation $\frac{T^2}{r^3} = C$ dans cette expression on trouve : $a \propto \frac{1}{r^2}$.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

1) Résumé des différents éléments et rappel du problème

54

- > Découverte des satellites de Jupiter (-> plusieurs centres de révolution possible)
Observation du même type de relation entre le mouvement de ces satellites que pour les planètes : $\frac{T^2}{r^3} = C_J$ Donc de la même façon que pour les planètes, on a : $a \propto \frac{1}{r^2}$.
- > Sur Terre, accélération constante du mouvement de chute libre, indépendante de la masse, de valeur $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.
Force (au sens de Newton) associée à la chute : $\vec{F}_{chute}^{Newt} := \vec{P} = m \vec{g}$.

Rappel du problème :

- Phénomène de pesanteur sur Terre
- Révolutions des astres dans le Ciel

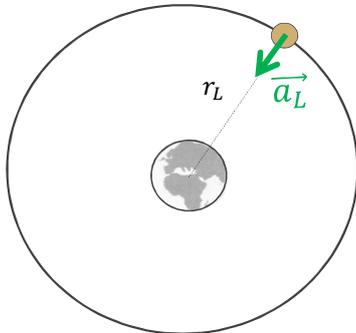
QUELS LIENS ?

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

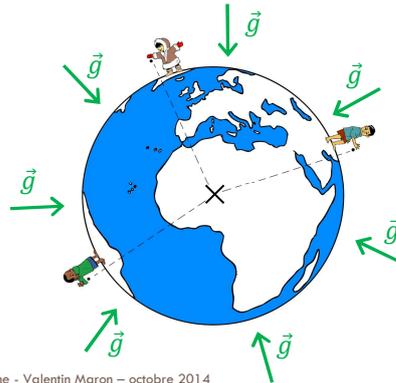
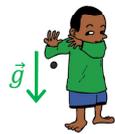
IV – La grande synthèse de Newton

2) Comparaison du cas de la Lune à la chute sur Terre

55



- > Le mouvement de la Lune est le plus simple à décrire dans le référentiel géocentrique.
- > Mouvement circulaire uniforme
=> accélération centripète \vec{a}_L



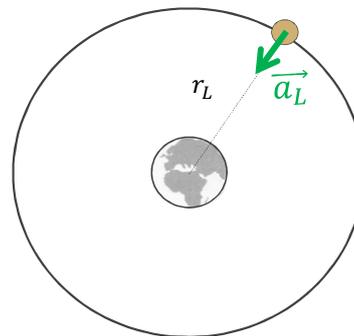
Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

2) Comparaison du cas de la Lune à la chute sur Terre

56

- Donc accélération centripète de la Lune et accélération de pesanteur, même direction : le centre de la Terre.
- **Idée** : Et si ces deux accélérations étaient liées aux mêmes types de circonstances physiques ?
- Mais on ne peut rien conclure seulement avec la même direction. Comment les comparer plus précisément ?



$$r_L = 3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$T_L = 27,3 \text{ j}$$

Détermination de a_L : $a_L = \frac{v_L^2}{r_L}$ $v_L = \frac{2\pi r_L}{T_L}$

$$a_L = 2,725 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

2) Comparaison du cas de la Lune à la chute sur Terre

N° étape	1	2
Vous répondez (sélectionnez une option)		
Vous cochez (plusieurs)		
A propos de cette question particulière ?		

57

- Cas de la révolution des planètes autour du Soleil et le cas de la révolution des satellites de Jupiter autour de Jupiter : analogues.
- Cas de la Lune et celui des satellites de Jupiter analogues dans la mesure où il s'agit dans les deux cas de satellites d'une planète.

=> Extrapolation de la dépendance en $1/r^2$ de l'accélération des satellites de Jupiter à la Lune.

- Hypothèse que dans le cas de la Terre aussi, si elle avait d'autres satellites, on aurait : $a \propto \frac{1}{r^2}$
- En supposant $a \propto \frac{1}{r^2}$ pour l'accélération de la Lune, on peut calculer la valeur qu'aurait cette accélération à la surface de la Terre, sachant que la Lune est située à environ 60 rayons terrestres.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

2) Comparaison du cas de la Lune à la chute libre sur Terre

58

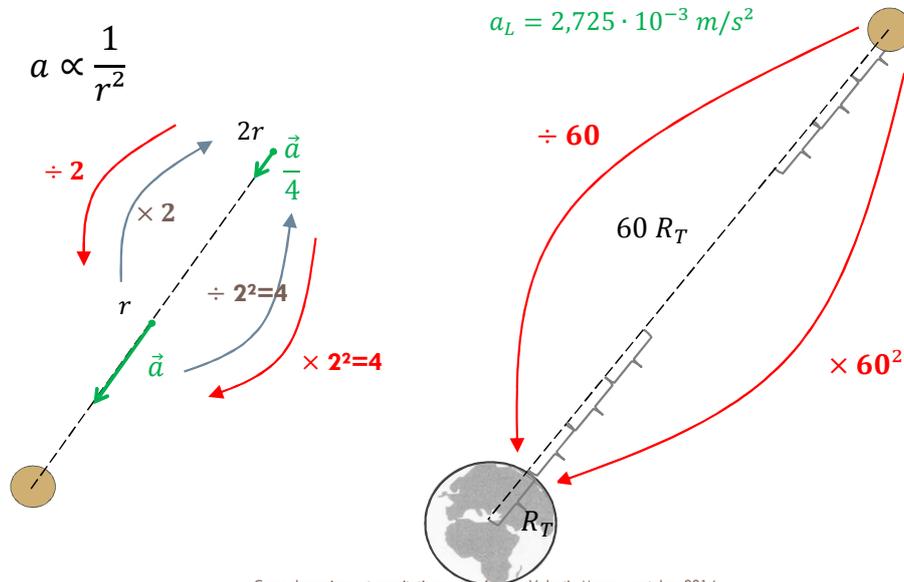
- Le cas des planètes autour du Soleil et le cas de la révolution des satellites de Jupiter autour de Jupiter sont analogues au sens où il s'agit dans les deux cas de plusieurs astres tournant autour d'un autre astre plus gros.
Or pour chacun des deux, la 3^{ème} loi de Kepler est vérifiée => $a \propto \frac{1}{r^2}$
- D'autre part, le cas de la Lune et celui des satellites de Jupiter sont analogues dans la mesure où il s'agit dans les deux cas de satellites d'une planète.
- Hypothèse que pour la Terre aussi, si elle avait d'autres satellites, leur accélération dépendrait également de la distance, en $1/r^2$. Ou encore, que si la Lune était située plus ou moins loin de la Terre par rapport à sa distance actuelle, son accélération varierait également en $1/r^2$ relativement à sa valeur actuelle.
- Donc en supposant par analogie que l'accélération centripète de la Lune varie en $1/r^2$, on peut calculer la valeur qu'aurait cette accélération à la surface de la Terre, sachant que la Lune est située à environ 60 rayons terrestres.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

2) Comparaison du cas de la Lune à la chute sur Terre

59



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

2) Comparaison du cas de la Lune à la chute sur Terre

60

- Donc si on suppose que l'accélération centripète de la Lune varie en $\frac{1}{r^2}$ avec la distance

=> à la surface de la Terre, elle vaudrait... $9,8 \text{ m/s}^2$!

Soit exactement la valeur de l'accélération de pesanteur g .

- **Conclusion** : l'accélération de pesanteur sur Terre g et l'accélération centripète de la Lune a_L pourrait donc bien être liées aux mêmes types de circonstances physiques, à des distances différentes.
- Ainsi la force (au sens de Newton) associée à l'accélération de pesanteur, le poids, pourrait alors être généralisée pour le cas de Lune, en prenant en compte la dépendance en la distance.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

3) Caractérisations des circonstances physiques associées à \vec{g} et \vec{a}_L

61

□ Des accélérations liées à la présence de la Terre

Une circonstance 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 : $F_{Terre/corps}$.

□ Des accélérations liées à la distance au centre de la Terre

On vient de voir que $a \propto \frac{1}{r^2}$: relation entre \vec{g} et \vec{a}_L .

=> une circonstance physique essentielle associée à ces accélérations, qui se retrouve donc dans la grandeur force, définie comme proportionnelle au vecteur accélération.

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

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

3) Caractérisations des circonstances physiques associées à \vec{g} et \vec{a}_L

62

□ L'accélération de pesanteur liée à la valeur de la masse du corps

Pour la chute libre : $\vec{P} = m \vec{g} \propto m$, (puisque \vec{g} ne dépend pas de 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 :

$$P = F_{Terre/corps}(r = R_T)$$

alors d'une manière générale :

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

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

3) Caractérisations des circonstances physiques associées à \vec{g} et \vec{a}_L

63

□ 3^{ème} loi du mouvement et lien à la valeur de la masse de la Terre

$$m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\| \quad , \quad \|\vec{F}_{B/A}^{Newt}\| = \|\vec{F}_{A/B}^{Newt}\|$$

Appliqué à la Terre : une force exercée par le corps sur la Terre, $F_{corps/Terre}$, qui devrait donc a priori correspondre à une accélération.

Mais telle que : $\|\vec{a}_{Terre}\| = \frac{m_{corps}}{m_{Terre}} \|\vec{a}_{corps}\|$

$$\left. \begin{array}{l} F_{Terre/corps} \propto m_{corps} \\ F_{corps/Terre} \propto m_{Terre} \end{array} \right\} \begin{array}{l} F_{Terre/corps} = F_{corps/Terre} \\ \propto m_{corps} \times m_{Terre} \end{array}$$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

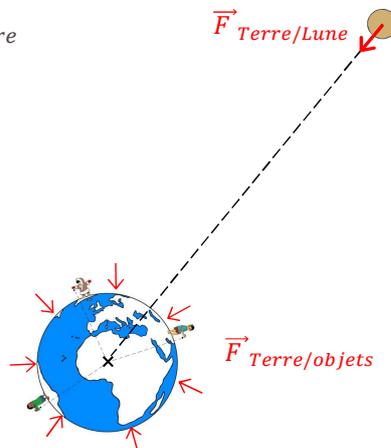
3) Caractérisations des circonstances physiques associées à \vec{g} et \vec{a}_L

64

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

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

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



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

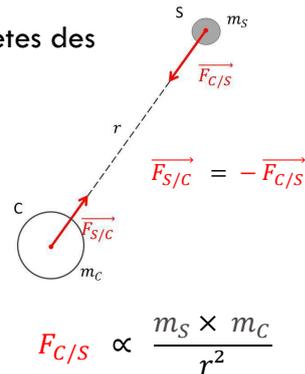
4) Généralisation

65

- Utilisation de la dépendance en $1/r^2$, extrapolée à partir des satellites de Jupiter. Donc en supposant que l'accélération de la Lune est liée aux mêmes circonstances physique que l'accélération des satellites de Jupiter.

- Elles mêmes : analogues aux accélérations centripètes des planètes : $a \propto \frac{1}{r^2}$

- ⇒ **Généralisation des circonstances physiques extrapolées de l'accélération de chute libre à l'accélération de la Lune :**
- aux accélérations des satellites de Jupiter.
 - aux accélérations des planètes.



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

IV – La grande synthèse de Newton

4) Généralisation

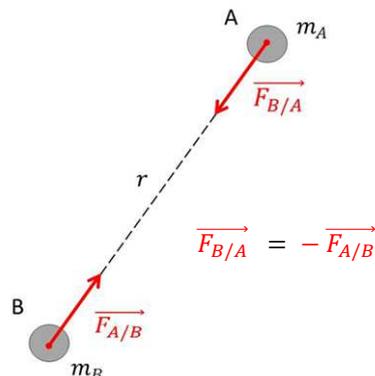
66

- Finalement, les seules circonstances physiques associées à ces accélérations sont uniquement la masse des corps et leur distance relative.
- Or tous les corps ayant une masse, on pourrait même aller jusqu'à supposer que ces accélérations pourraient avoir lieu entre tous corps deux à deux.
- Pour tout corps A et B quelconques :

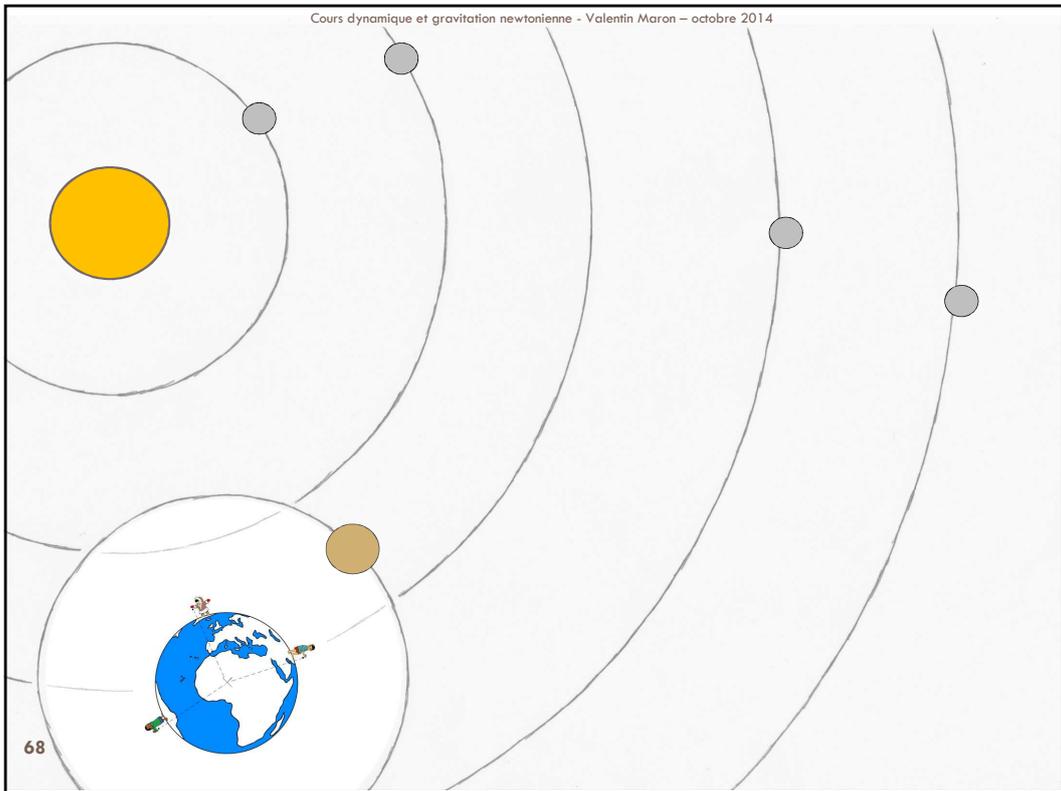
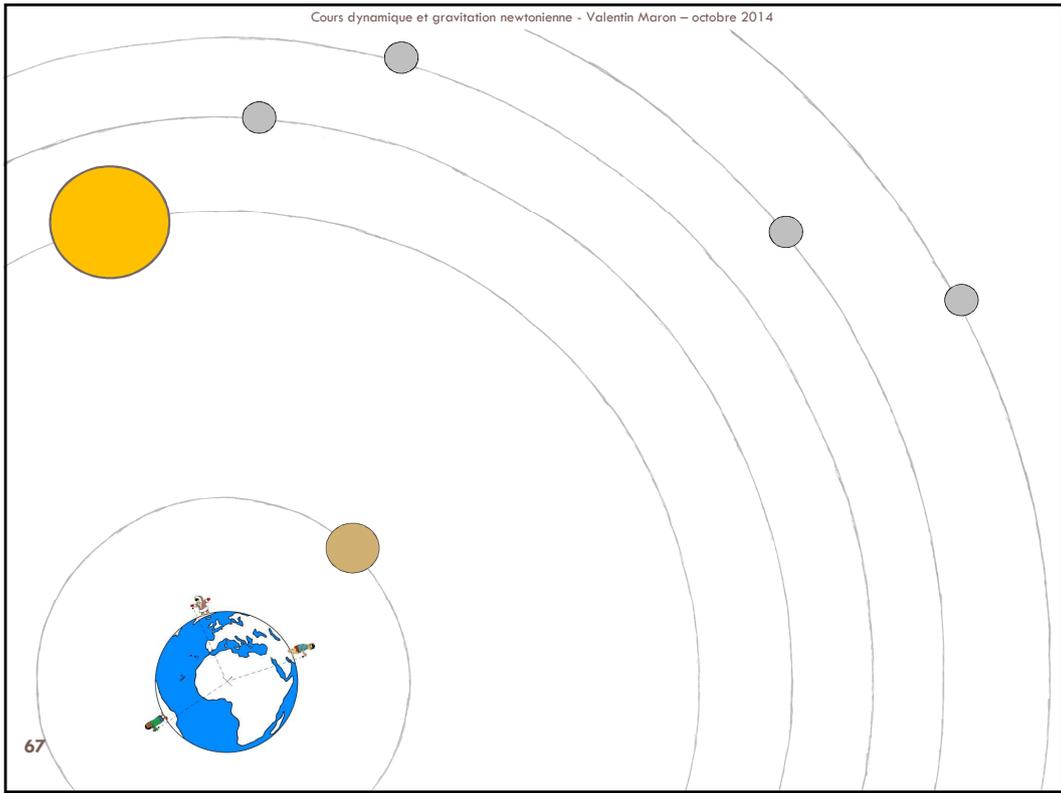
$$F_{A/B} \propto \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

$$F_{A/B} = G \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

G : constante de proportionnalité dont la valeur est fixée par le choix de nos unités : la masse en kg , la distance en m , et la force en N .



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Observations : $\frac{T^2}{r^3} = C$

Relation mathématique : $a = \frac{v^2}{r}$

$a \propto \frac{1}{r^2}$

$F_{A/B} \propto \frac{1}{r^2} \times m_A \times m_B$

$\frac{T^2}{r^3} = C_J$

$a = \frac{v^2}{r}$

$a \propto \frac{1}{r^2}$

3^{ème} loi du mouvement :
 $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$
 => Présence des deux masses

$\Rightarrow F_{A/B} = G \frac{m_A \times m_B}{r^2}$

$\vec{p} = m \vec{g}$

$R_{Terre} = 1/60 r_{Terre/Lune}$

$a_{Lune} \times 60^2 = 9,8 m/s^2 !$

$a \propto \frac{1}{r^2} ?$

69

IV – La grande synthèse de Newton

5) Interprétation

70

- Après plus de 2000 ans de distinction, Newton établit un lien explicite le monde terrestre et le monde céleste :

Les phénomènes de chute sur Terre et de révolution des astres dans le Ciel peuvent être interprétés avec une même force.

- Cette force généralise la notion de poids aux astres : la force centripète associée à leur révolution, c'est finalement leur poids.

La pesanteur est **universelle**.

- Le système du monde peut donc désormais être décrit de façon unique, avec une même force expliquant autant les mouvements terrestres que célestes. Par cette unification de la Terre et du Ciel, Newton donne naissance à la notion d'**Univers**.

Retour sur le modèle héliocentrique

71

- Le but d'une théorie physique :
- **L'unification ou la mise en relation des phénomènes :**
La théorie apporte une nouvelle information inattendue, une nouvelle connaissance : il existe une relation entre tel et tel type de phénomènes, que l'on pensait distincts au départ.

« Maintenant qu'est-ce que la science ? [...] c'est avant tout une classification, une façon de rapprocher des faits que les apparences séparaient, bien qu'ils fussent liés par quelque parenté naturelle et cachée. La science, en d'autres termes, est un système de relations. »
(Poincaré, 1905) (p. 265)

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Retour sur le modèle héliocentrique

72

- Pourquoi donc, au final, c'est effectivement le modèle héliocentrique qui est préféré ?
- « Une théorie physique, avons-nous dit, est d'autant plus vraie, qu'elle met en évidence plus de rapports vrais. [...] si l'une nous révèle des rapports vrais que l'autre nous dissimule, on pourra néanmoins la regarder comme physiquement plus vraie que l'autre, puisqu'elle a un contenu plus riche. »
(Poincaré, 1905) (p.272)

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

v

Un appartement en impesanteur

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Vocabulaire : Apesanteur / Impesanteur

74



□ Apesanteur/impesanteur : absence totale de force de gravitation ?

□ Pesanteur, au sens courant :

Le fait que les objets tombent au sol (la chute libre), et le fait qu'ils appuient ou déforment sur le support sur lequel ils sont posés (ou qui le retient).

□ Apesanteur/impesanteur (considérés comme synonymes)

Le fait que les objets ne tombent pas, « flottent », ni n'appuient ou déforme un support.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Premières propositions

75

□ **Problème :**

Construire un appartement dans une tour sur Terre dans lequel on soit en impesanteur.

- Une proposition : une tour extrêmement haute (entre 400 et 500 km de haut), allant au delà de l'atmosphère.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

1^{ère} étape

76

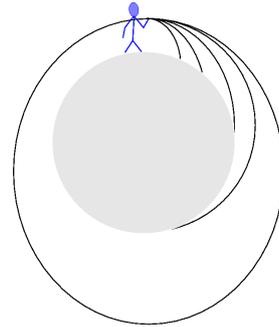
- Quel serait le mouvement d'un objet lâché d'une tour très haute, au delà de l'atmosphère ?
- Fait : du haut d'une tour (exemple tour Eiffel) un objet ne tombe pas tout à fait à son aplomb (2cm d'écart).
- Pour un appartement pour une tour au pôle, à une hauteur d'un rayon terrestre, quelle serait la valeur de l'accélération de chute libre ?

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

2^{ème} étape

77

- Si à n'importe quelle altitude on a peut avoir une chute vers le bas, même depuis l'espace, comment se fait-il qu'il puisse y avoir des mouvements de révolution?
(comme ceux des satellites par exemple)



Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

3^{ème} étape

78

- Qu'est-ce que l'impesanteur ?

L'accélération gravitationnelle ne dépend pas de la masse.

Comparaison chute libre / vol parabolique / navette en orbite

Conclusion :

On est en impesanteur relativement à un système lorsqu'on est immobile, en « flottement », par rapport à celui-ci, et donc que relativement à un autre référentiel, on a le même mouvement que ce système.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron – octobre 2014

Retour sur le problème

79

- Comment construire un appartement dans une tour sur Terre dans laquelle on puisse être en impesanteur ?

Éléments obtenus jusqu'ici :

- Déviation vers l'Est : un objet lâché d'une tour (ailleurs qu'aux pôles) ne retombe pas au pied de la tour car sa vitesse initiale en haut de la tour (dans le référentiel géocentrique) est plus grande que celle du sol (car en hauteur on est plus éloigné de l'axe de rotation). En particulier à l'équateur.
- Pour un même vecteur accélération (centripète), plusieurs mouvements possibles selon la vitesse initiale, de la chute rectiligne, la trajectoire courbe touchant le sol, à la révolution.
- On est en impesanteur relativement à un système lorsqu'on est immobile, en « flottement », par rapport à celui-ci, et donc que relativement à un autre référentiel, on a le même mouvement que le système considéré.

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Retour sur le problème

80

- Pour être en impesanteur par rapport à la tour, il faut avoir le même mouvement que la tour. C'est-à-dire un mouvement circulaire uniforme.
- Le mouvement d'un objet lâché/jeté du haut de la tour, à une certaine hauteur h , dépend :
 - de l'accélération : l'accélération gravitationnelle à cette hauteur
 $a = GM/r^2$ (où $r = R + h$)
 - de la vitesse initiale.
- **Idée** : utiliser la rotation de la Terre pour fournir une vitesse initiale à l'objet. Par exemple en se plaçant à l'équateur où on est le plus loin de l'axe de rotation. On peut choisir la vitesse en fonction de la hauteur, plus on monte haut, plus la vitesse sera grande.
- Pour une distance donnée r au centre de la Terre, quelle serait la vitesse initiale à fournir à l'objet pour que son mouvement soit circulaire uniforme ?

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Démarche de résolution

81

- Pour une distance donnée r , accélération gravitationnelle : $a = \frac{gM}{r^2}$
- Si l'objet à un mouvement circulaire uniforme de vitesse v , alors mathématiquement on sait que son accélération est reliée à sa vitesse et son rayon : $a = v^2/r$ (cf.cours)
- Donc pour une distance donnée r , avec l'accélération $a = \frac{gM}{r^2}$, pour que le mouvement soit circulaire uniforme, il faut que la vitesse soit telle que
$$\frac{gM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$
- Or sur la tour, on peut choisir l'altitude qu'on veut h , et donc $r = h + R_T$, pour avoir la vitesse qu'on veut : $v = 2\pi r/T$

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Comparaison au pôle

82

- Que se passe-t-il si on lâche un objet du haut d'une tour de 35600 km de haut au pôle ?
- Quelles sont les différences et points communs entre la tour au pôle et la tour à l'équateur ?

Cours dynamique et gravitation newtonienne - Valentin Maron - octobre 2014

Conclusion

83

- Quelles sont les différences et points communs entre la tour au pôle et la tour à l'équateur ?
- **Points communs** : exactement la même situation matérielle, présence de la force et de l'accélération gravitationnelle identique dans les deux cas, (dans le référentiel géocentrique).
- **Différence** : l'effet de la rotation de la Terre. Le fait que la tour à l'équateur correspond à un référentiel en rotation relativement au centre de la Terre, contrairement à la tour au pôle.

Annexe B

Synthèse de la séquence Dynamique et Gravitation - partie 1

Dynamique et gravitation newtonienne

Synthèse du cours – partie 1

<p>• Le problème de Newton</p> <p>S'il y a des raisons de penser que les mondes terrestre et céleste ne soient pas si différents, pourquoi les mouvements naturels le sont-ils ? Quels liens pourrait-il bien y avoir entre ces deux types de mouvements ?</p> <p><i>Nécessité d'avoir une description du mouvement plus précise.</i></p>	4
II - Dynamique	
<p>Première restriction à l'étude des mouvements dans le référentiel terrestre.</p> <p>Point de départ, sens général de la notion de force comme ce qui explique le mouvement.</p> <p>• Force et mouvement naturel de référence</p> <p>Explication du mouvement relative à un mouvement naturel de référence qui ne nécessite pas d'explication.</p> <p><i>(Exemple : on explique le maintien de la vitesse d'un cycliste - par le fait qu'il pédale - relativement au fait que de lui-même, « naturellement », le mouvement du vélo serait de ralentir progressivement jusqu'à l'arrêt).</i></p>	5
<p>La notion de force correspond à ce qui permet d'expliquer un mouvement qui est différent de celui qui aurait lieu de lui-même naturellement, ou encore : d'expliquer la variation d'un mouvement naturel.</p> <p>Définition de la force qui se retrouve dans l'histoire des idées : pour Aristote, distinction entre mouvement violent (attribué à une force) et mouvement naturel, n'ayant pas besoin d'être expliqué par une force, en particulier : la chute verticale vers le bas. Façon de voir encore partagée par Galilée, pour qui la chute est un mouvement naturel et non liée à une force (on parle de « chute libre »).</p> <p>Dans la théorie de Newton, seulement 50 ans après Galilée, on parle de force pour la chute verticale (« le poids »). Que signifie cette contradiction entre les deux interprétations du même phénomène ? (à partir des mêmes observations).</p> <p><i>L'interprétation d'un phénomène dépend toujours de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter. => Une autre définition de la force chez Newton.</i></p>	6
<p>1</p> <p>• Les arguments justifiant la distinction entre monde terrestre et céleste, pendant l'Antiquité</p> <p>- Dimension culturelle. Monde terrestre : monde des humains, lieu de diversité et d'irrégularité. Monde céleste : monde divin, lieu d'uniformité et de perfection.</p> <p>- Au niveau de la physique (considération des phénomènes) : différence entre les mouvements naturels sur Terre et dans le Ciel : sur Terre, mouvements verticaux rectilignes, en particulier le mouvement de chute verticale d'un objet. Dans le monde céleste : mouvement de révolution circulaire.</p>	7
<p>• Éléments remettant en question la séparation entre monde terrestre et céleste</p> <p>- Possibilité et 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)</p> <p>- Plusieurs centres de révolution sont effectivement possibles avec les satellites de Jupiter (Galilée)</p> <p>- Perte de la perfection du mouvement circulaire uniforme des planètes. (Kepler)</p> <p>- Observation de relief sur la Lune et de tâches sur le Soleil (Galilée)</p> <p>- Disparition d'une étoile (explosion d'une supernova) : impermanence du ciel (Tycho Brahe)</p> <p>Malgré ces remises en question, et même dans la description héliocentrique, les mouvements naturels des objets sur Terre et des astres, chute verticale et révolution, restent distincts.</p>	8
<p>2</p> <p>3</p>	9
<p>10</p>	10

• **Le concept de force au sens de Newton**

Définition d'un **autre** mouvement naturel de référence, basée sur d'autres observations (mouvements horizontaux avec très peu de frottement).

1^{ère} loi (restreinte au référentiel terrestre) :

Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \overline{cste}$), incluant le repos : ($\vec{v} = \vec{0}$).

Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \overline{cste}$).

En particulier, après le lancer d'un objet, s'il conserve son mouvement dans la même direction et à la même vitesse (ex : boule de bowling), alors aucune force au sens de Newton n'est associée à ce mouvement. Donc on ne peut pas dire que le lanceur « transmet » de force à l'objet, au sens de Newton.

• **Retour sur le cas de la chute libre**

Chute libre : la vitesse augmente => interprétation de cette accélération comme associée à une force au sens de Newton, bien que l'on ne puisse pas reconnaître a priori les circonstances physiques associées à ce mouvement (phénomène ayant lieu partout, concernant tous les objets, qu'on ne peut pas faire cesser). Raison pour laquelle il est compréhensible et légitime d'avoir considéré la chute libre comme un mouvement naturel.

• **Définition quantitative de la grandeur physique force**

On explique un mouvement, en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.

Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, charge, masse...).

Le concept de force, au sens de Newton, comme caractérisant les circonstances physiques associées à la variation du mouvement rectiligne uniforme.
Circonstances la plupart du temps identifiables, mais pas nécessairement (cf. chute libre).

Expression mathématique décrivant la variation du mouvement rectiligne uniforme : le vecteur accélération $\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$.

La grandeur force (au sens de Newton), \vec{F}^{Newt} , caractérise les circonstances physiques associées au vecteur accélération.

- Caractérisation par l'accélération

Pour des aimants s'attirant ou se repoussant, plus leur accélération est grande plus leur « efficacité » est grande, à une certaine distance (une façon de désigner les circonstances physiques associées à l'accélération). On peut poser $\vec{F}^{Newt} \propto \vec{a}$.

- Relation à la masse.

Pour que la grandeur physique force caractérise les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques.

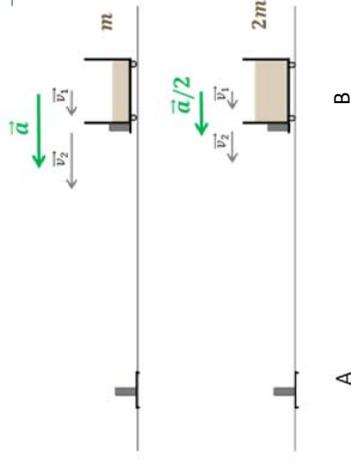
Or pour les mêmes circonstances, en un point donné, on observe $a \propto \frac{1}{m}$, donc le produit $m \times a$ est invariant pour les mêmes circonstances physiques.

On peut donc poser $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$ pour la grandeur force au sens de Newton.

Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que **A exerce une force (au sens de Newton) sur B**.

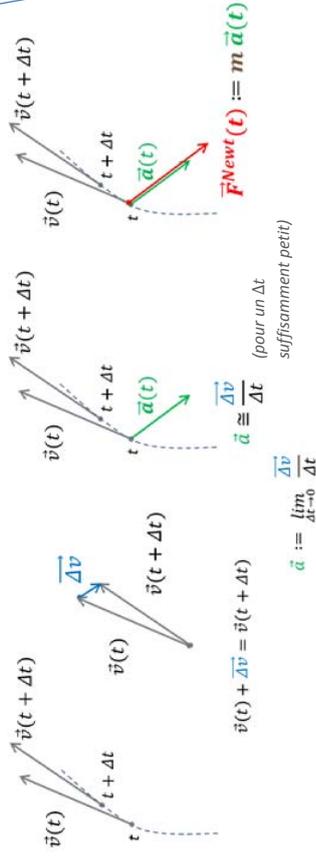
D'autre part le vecteur accélération étant défini à chaque instant t , de même la grandeur force est définie à chaque instant : $\vec{F}^{Newt}(t) := m \vec{a}(t)$.

La grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt}(t)$ caractérise ainsi les circonstances physiques associées à l'accélération d'un objet, à l'instant t où l'on considère cette accélération : $\vec{a}(t)$. La force au sens de Newton ne correspond donc pas à quelque chose qui aurait été transmis *plus tôt* à l'objet, et pourrait ensuite maintenir le mouvement.



33 30 D'autre part la grandeur $\vec{F}^{Newt}(t)$ étant définie à partir du vecteur accélération, il s'agit bien d'un vecteur, dont la direction est celle du vecteur accélération, qui en première approximation est la direction du vecteur $\Delta\vec{v}$ (variation du vecteur vitesse), pour un intervalle de temps entre les deux, Δt , suffisamment petit.

25



28 On peut donc dire que la force associée à l'accélération du système A est exercée par le système B. Et réciproquement pour la force associée à A, exercée par le système B. On note : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$.

29 Enfin, l'égalité $m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\|$ ainsi que l'opposition de direction des deux vecteurs accélération sont vérifiées à chaque instant le long de la trajectoire. On peut donc écrire finalement : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt}(t) = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}(t)$.

• **Force et déformation**

30 Notion de force pour expliquer le mouvement, mais aussi la déformation d'un objet. En effet en général, les circonstances physiques pouvant être associées à une accélération peuvent également être reliées à une déformation.

31 Lorsque les circonstances physiques associées à une accélération impliquent dans un autre contexte une déformation, cela signifie que d'autres circonstances physiques sont en jeu, qui s'opposent à l'accélération qui aurait lieu en leur absence.

• **De la force résultante à la décomposition en un système de forces.**

32 La grandeur force associée à un vecteur accélération caractérise l'ensemble des circonstances physiques associées à cette accélération.

33 Lorsque plusieurs types de circonstances physiques sont en jeu, on peut relier différentes composantes de l'accélération observée à différentes circonstances physiques, par l'intermédiaire d'autres expériences où certaines de ces circonstances sont absentes.

34 En particulier, pour attribuer différentes circonstances physiques à une accélération nulle dans le cas $\vec{v} = \text{constante}$ (parachutiste à sa vitesse limite), ou $\vec{v} = \vec{0}$ (objet posé sur une table), il faut penser à l'autre mouvement qui pourrait avoir lieu avec les circonstances en présence, si l'on fait abstraction de certaines d'entre elles (le parachute ou la table). On peut ainsi déterminer la valeur de la grandeur force caractérisant ces circonstances (le parachute ou la table) sachant que la force totale associée à l'accélération est nulle (puisque $\vec{a} = \vec{0}$). Il faut donc que cette grandeur force compense celle associée à la chute libre, le poids \vec{P} , la chute libre étant le mouvement qui *aurait* lieu en l'absence du parachute ou de la table. La détermination de la composante de force associée au parachute ou à la table nécessite d'avoir fait une autre expérience : ici l'expérience de chute libre.

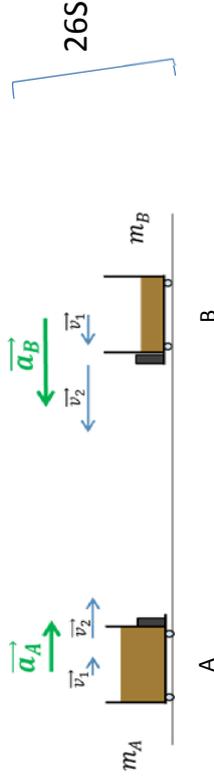
33 30

• **La troisième loi du mouvement**

26 Expérimentalement, pour deux systèmes A et B en interaction exclusive, c'est-à-dire dont l'accélération de l'un est liée uniquement à la présence de l'autre, on observe que :

26 $\frac{\|\vec{a}_A\|}{\|\vec{a}_B\|} = \frac{m_B}{m_A}$ soit : $m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\|$. Soit avec la définition $\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$: $\|\vec{F}_A^{Newt}\| = \|\vec{F}_B^{Newt}\|$. D'autre part les directions des deux vecteurs accélération étant opposées, on a : $\vec{F}_A^{Newt} = -\vec{F}_B^{Newt}$

27 La relation $m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\|$ est vérifiée seulement si les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, et pas à d'autres circonstances physiques extérieures à A et B. Autrement dit, seulement lorsque les circonstances extérieures au système A sont seulement attribuables au système B.



Annexe C

Synthèse de la séquence Dynamique et Gravitation - partie 1 - Version lycéens

Dynamique et gravitation newtonienne

Synthèse du cours – partie 1

Version Lycéens

I - La compréhension du monde avant Newton

- **Les arguments justifiant la distinction entre monde terrestre et céleste, pendant l'antiquité**

- Dimension culturelle. Monde terrestre : monde des humains, lieu de diversité et d'irrégularité. Monde céleste : monde divin, lieu d'uniformité et de perfection).

- Au niveau de la physique (considération des phénomènes) : différence entre les mouvements naturels sur Terre et dans le Ciel : sur Terre, mouvements verticaux rectiligne, en particulier le mouvement de chute verticale d'un objet. Dans le monde céleste : mouvement de révolution circulaire des astres (planètes, Soleil, Lune).

- **Éléments remettant en question la séparation entre monde terrestre et céleste**

- Possibilité et 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)

- Plusieurs centres de révolution sont effectivement possibles avec les satellites de Jupiter (Galilée)

- Perte de la perfection du mouvement circulaire uniforme des planètes. (Kepler)

- Observation de relief sur la Lune et de tâches sur le Soleil (Galilée)

- Disparition d'une étoile (explosion d'une supernova) : impermanence du ciel (Tycho Brahe)

Malgré ces remises en questions, et même dans la description héliocentrique, les mouvements naturels des objets sur Terre et des astres, chute verticale et révolution, restent distincts.

- Le problème de Newton

S'il y a des raisons de penser que les mondes terrestre et céleste ne soient pas si différents, pourquoi les mouvements naturels le sont-ils ? Quels liens pourrait-il bien y avoir entre ces deux types de mouvement ?

Nécessité d'avoir une description du mouvement plus précise.

II - Dynamique

Première restriction à l'étude des mouvements dans le référentiel terrestre.

Point de départ, sens général de la notion de force comme ce qui explique le mouvement.

- **Force et mouvement naturel de référence**

Explication du mouvement relative à un mouvement naturel de référence qui ne nécessite pas d'explication.

(Exemple : on explique le maintien de la vitesse d'un cycliste - par le fait qu'il pédale - relativement au fait que de lui-même, « naturellement », le mouvement du vélo serait de ralentir progressivement jusqu'à l'arrêt).

La notion de force correspond à ce qui permet d'expliquer un mouvement qui est différent de celui qui aurait lieu de lui-même naturellement, ou encore : d'expliquer la variation d'un mouvement naturel.

Définition de la force qui se retrouve dans l'histoire des idées : pour Aristote, distinction entre mouvement violent (attribué à une force) et mouvement naturel, n'ayant pas besoin d'être expliqué par une force, en particulier : la chute verticale vers le bas. Façon de voir est encore partagée par Galilée, pour qui la chute est un mouvement naturel et non liée à une force (on parle de « chute libre »).

Dans la théorie de Newton, seulement 50 ans après Galilée, on parle de force pour la chute verticale (« le poids »). Que signifie cette contradiction entre les deux interprétations du même phénomène ? (à partir des mêmes observations).

L'interprétation d'un phénomène dépend toujours de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter. => Une autre définition de la force chez Newton.

4

5

6

7

8

9

10

- **Le concept de force au sens de Newton**

Définition d'un **autre** mouvement naturel de référence, basée sur d'autres observations (mouvements horizontaux avec très peu de frottement).

1^{ère} loi (restreinte au référentiel terrestre) :

Le mouvement choisit comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \text{cste}$), incluant le repos : ($\vec{v} = \vec{0}$).

Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \text{cste}$).

En particulier, après le lancer d'un objet, s'il conserve son mouvement dans la même direction et à la même vitesse (ex : boule de bowling), alors aucune force au sens de Newton n'est associée à ce mouvement. Donc on ne peut pas dire que le lanceur « transmet » de force à l'objet, au sens de Newton.

- **Retour sur le cas de la chute libre**

Chute libre : la vitesse augmente => interprétation de cette accélération comme associée à une force au sens de Newton, que l'on nomme la force de « poids ». Et ce malgré que l'on ne puisse pas reconnaître a priori les circonstances physiques associées à ce mouvement (phénomène ayant lieu partout, concernant tous les objets, qu'on ne peut pas faire cesser), raison pour laquelle il est compréhensible et légitime d'avoir considéré la chute libre comme un mouvement naturel.

- **Caractérisation mathématique du mouvement**

Pour un observateur donné, le mouvement d'un objet dessine une certaine trajectoire, et en chaque instant le mouvement est défini par sa direction, son sens sur cette trajectoire, et la valeur de sa vitesse. On met ensemble ces trois informations sur le mouvement avec la notion mathématique de vecteur vitesse, noté \vec{v} .

Le mouvement rectiligne uniforme est caractérisé par un vecteur vitesse constant, ce qui signifie que la valeur de la vitesse ainsi que la direction du mouvement sont constantes.

Pour quantifier « la variation du mouvement rectiligne uniforme », on utilise un la notion mathématique de vecteur accélération, noté \vec{a} , qui contient à la fois l'information :

- du taux de variation de la vitesse (de combien la vitesse varie),
- du changement de direction du mouvement.

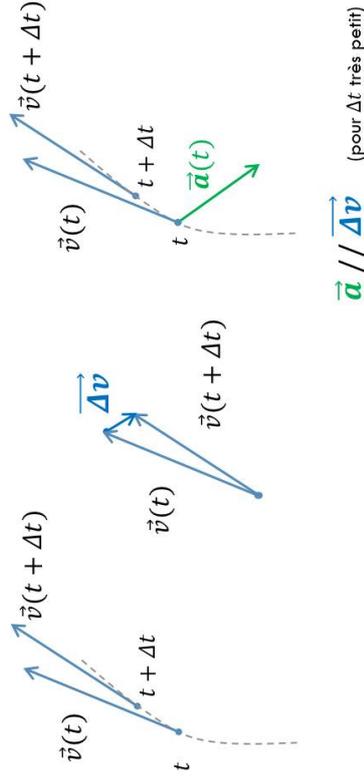
Le vecteur accélération est défini à partir du vecteur noté $\Delta\vec{v}$ caractérisant la variation du vecteur vitesse entre deux instants proches. Il s'agit du vecteur « qu'il faut ajouter à celui d'avant pour aller jusqu'à celui d'après ».



Mathématiquement, $\Delta\vec{v}$ est tel que : $\vec{v}(t) + \Delta\vec{v} = \vec{v}(t + \Delta t)$

Le vecteur accélération moyenne pendant l'intervalle de temps Δt est donnée par $\vec{a}_{\text{moy}} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$, il caractérise la variation du mouvement relativement à un mouvement rectiligne uniforme pendant l'intervalle de temps Δt .

Le vecteur accélération instantanée $\vec{a}(t)$ est définie comme la limite de l'accélération moyenne quand l'intervalle de temps devient extrêmement court (« tend vers zéro ») : $\vec{a}(t) := \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$



L3

L12

LS12

L4

L5

L6

LS6

$\vec{a} // \Delta\vec{v}$ (pour Δt très petit)

• **Le concept de force en tant qu'associé à l'explication du mouvement**

On explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.

Circumstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, charge, masse...).

Le concept de force, au sens de Newton, comme caractérisant les circonstances physiques associées à la variation du mouvement rectiligne uniforme.

Ou encore formellement : **le concept de force au sens de Newton comme caractérisant les circonstances physiques associées au vecteur accélération \vec{a} .**

• **Définition quantitative de la grandeur physique force**

Pour des aimants s'attirant ou se repoussant, plus leur accélération est grande plus leur « efficacité » est grande, à une certaine distance. La mesure de l'accélération permet de juger de l'intensité des circonstances en jeu.

- Caractérisation par l'accélération

Pour des aimants s'attirant ou se repoussant, plus leur accélération est grande plus leur « efficacité » est grande, à une certaine distance (une façon de désigner les circonstances physiques associées à l'accélération). On peut poser $\vec{F}^{Newt} \propto \vec{a}$.

- Relation à la masse.

Pour que la grandeur physique force caractérise les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques.

Or pour les mêmes circonstances, en un point donné, on observe $a \propto \frac{1}{m}$, donc le produit $m \times a$ est invariant pour les mêmes circonstances physiques.

On peut donc poser $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$ pour la grandeur force au sens de Newton.

15

22 Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que **A exerce une force (au sens de Newton) sur B**.

16

23 D'autre part le vecteur accélération étant défini à chaque instant t , de même la grandeur force est définie à chaque instant : $\vec{F}^{Newt}(t) := m \vec{a}(t)$.

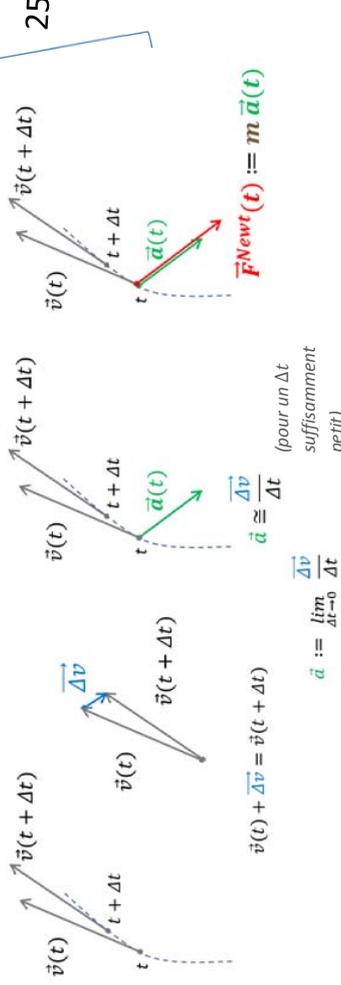
17

24 La grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt}(t)$ caractérise ainsi les circonstances physiques associées à l'accélération d'un objet, à l'instant t où l'on considère cette accélération : $\vec{a}(t)$. La force au sens de Newton ne correspond donc pas à quelque chose qui aurait été transmis *plus tôt* à l'objet, et pourrait ensuite maintenir le mouvement.

19

25 D'autre part la grandeur $\vec{F}^{Newt}(t)$ étant définie à partir du vecteur accélération, il s'agit bien d'un vecteur donc la direction est celle du vecteur accélération, qui en première approximation est la direction du vecteur $\vec{\Delta v}$ (variation du vecteur vitesse), pour un intervalle de temps entre les deux, Δt , suffisamment petit.

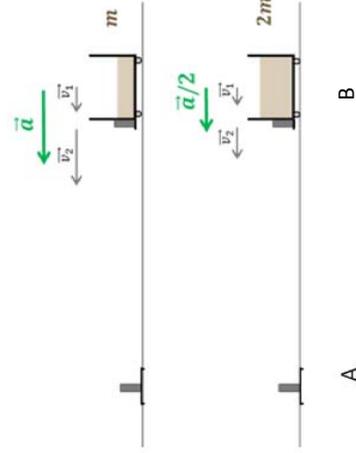
L7



• **Notion d'interaction**

Dans certains cas, par exemple dans le cas de deux aimants A et B, on observe que les deux systèmes sont en mouvement, et l'accélération de l'un est lié à la présence de l'autre, on dit qu'ils sont en interaction. Lorsque les circonstances associées à l'accélération de B sont attribuables au système A, on dit que **l'aimant A exerce une force sur l'aimant B**, noté $F_{A/B}$ (et vice versa pour la force exercée par B sur A). Cependant la force exercée par A sur B dépend de la fois des propriétés de A et de B (si B n'était pas un aimant, il ne serait pas affecté par l'aimant A). On peut donc préciser en disant :

21



Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B.

- La troisième loi du mouvement

Expérimentalement, pour deux systèmes A et B en interaction exclusive, c'est-à-dire dont l'accélération de l'un est liée uniquement à la présence de l'autre, on observe que :

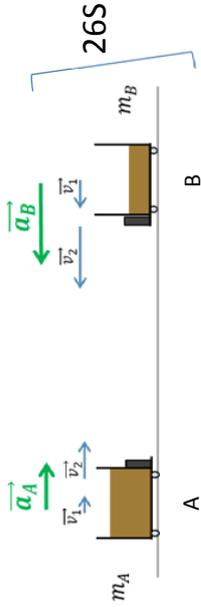
$$\frac{\|\vec{a}_A\|}{\|\vec{a}_B\|} = \frac{m_B}{m_A}$$

Donc : $m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\|$.

Soit avec la définition

$$\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}, \text{ on a :}$$

$$\|\vec{F}_A^{Newt}\| = \|\vec{F}_B^{Newt}\|$$



D'autre part les directions des deux vecteurs accélération étant opposées, on a :

$$\vec{F}_A^{Newt} = -\vec{F}_B^{Newt}$$

La relation $m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\|$ est vérifiée seulement si les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, et pas à d'autres circonstances physiques extérieures à A et B. Autrement dit, seulement lorsque les circonstances extérieures au système A sont seulement attribuables au système B.

On peut donc dire que la force associée à l'accélération du système A est exercée par le système B. Et réciproquement pour la force associée à A, exercée par le système B. On note : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$.

Enfin, l'égalité $m_A \|\vec{a}_A\| = m_B \|\vec{a}_B\|$ ainsi que l'opposition de direction des deux vecteurs accélération sont vérifiées à chaque instant le long de la trajectoire. On peut donc écrire finalement : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt}(t) = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}(t)$.

- Force et déformation

Notion de force pour expliquer le mouvement, mais aussi la déformation d'un objet. En effet en général, les circonstances physiques pouvant être associées à une accélération peuvent également être liées à une déformation, lorsque d'autres circonstances s'opposent à cette accélération. Lorsque les circonstances physiques associées à une accélération impliquent dans un autre contexte une déformation, cela signifie que d'autres circonstances physiques sont en jeu, qui s'opposent à l'accélération qui aurait lieu en leur absence.

- De la force résultante à la décomposition en un système de forces.

La grandeur force associée à un vecteur accélération caractérise l'ensemble des circonstances physiques associées à cette accélération.

Lorsque plusieurs types de circonstances physiques sont en jeu, on peut relier différentes composantes de l'accélération observée à différentes circonstances physiques, par l'intermédiaire d'autres expériences où certaines des circonstances sont absentes.

En particulier, pour attribuer différentes circonstances physiques à une accélération nulle, dans le cas $\vec{v} = \text{constante}$ (parachutiste à sa vitesse limite), ou $\vec{v} = \vec{0}$ (objet posé sur une table), il faut penser à l'autre mouvement qui pourrait avoir lieu avec les circonstances en présence, si l'on fait abstraction de certaines d'entre elles (le parachute ou la table). On peut ainsi déterminer la valeur de la grandeur force caractérisant ces circonstances (le parachute ou la table) sachant que la force totale associée à l'accélération est nulle (puisque $\vec{a} = \vec{0}$). Il faut donc que cette grandeur force compense celle associée à la chute libre, le poids \vec{P} , la chute libre étant le mouvement qui aurait lieu en l'absence du parachute ou de la table. La détermination de la composante de force associée au parachute ou à la table nécessite d'avoir fait une autre expérience : ici l'expérience de chute libre.

- Cas de la chute libre, circonstance associée à la déformation.

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 ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$) est la masse de l'objet en jeu.

Puisque la notion de force (au sens de Newton) caractérise les circonstances physiques associées à une accélération, alors la force associée à l'accélération de chute, le « poids », dépend de la masse de l'objet en jeu. Formellement, on peut quantifier la force de poids à partir de l'expression $\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$. Puisque ici $\vec{a} = \vec{g}$, en notant la force de poids par \vec{P} , on a simplement : $\vec{P} = m\vec{g}$. Ce qui signifie que la grandeur force de poids est proportionnelle à la masse.

L8

26

26S

27

28

29

30

31

32

33

34

L9

L10

Annexe D

Synthèse de la séquence Dynamique et Gravitation - partie 2

Dynamique et gravitation newtonienne Synthèse du cours – partie 2

• Etude du mouvement circulaire uniforme

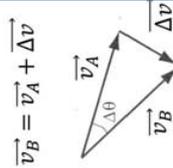
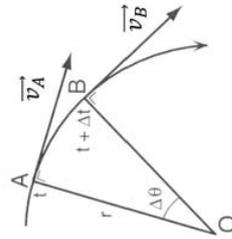
Mobile aéroporté accroché à un fil, dans le plan horizontal : mouvement circulaire uniforme (MCU), dans le référentiel terrestre.

La circonstance physique associée à cette variation : la présence du fil qui retient le mobile. Pour la quantifier la tension du fil via la grandeur force, il faut déterminer le vecteur accélération correspondant à cette variation du vecteur vitesse.

Détermination du vecteur accélération pour le mouvement circulaire uniforme :

- Direction : $\vec{\Delta v}$ est dirigé vers l'intérieur de la trajectoire.

Quand Δt est très court, c'est-à-dire quand B est très proche de A, les directions de \vec{v}_A et \vec{v}_B sont très proches, et Δv devient de plus en plus perpendiculaire à \vec{v}_A . Donc Δv est de plus en plus dans la direction du rayon, c'est-à-dire dirigé vers le centre du cercle.



Ce qui donne la direction de l'accélération :

Quand $\Delta t \rightarrow 0$, $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ est dirigée vers le centre de la trajectoire circulaire. On dit qu'il s'agit d'une accélération « centripète ».

Détermination de la valeur de cette accélération de façon géométrique, à partir des deux paramètres du mouvement, la vitesse et le rayon du cercle :

Le triangle des vitesses est semblable au triangle OAB, ils sont isocèles tous les deux et ont même angle d'ouverture $\Delta\theta$. Cela implique une relation de proportionnalité entre les différents cotés.

Ou une autre façon de voir est que géométriquement, on peut les dessiner l'un dans l'autre, et on est dans la situation du théorème de Thalès :

Par ailleurs, l'arc de cercle \widehat{AB} tend vers le segment AB lorsque les deux rayons OA et OB se rapprochent de plus en plus : $\widehat{AB} \rightarrow AB$ quand $\Delta t \rightarrow 0$

D'autre part $\widehat{AB} = v \Delta t$
Donc quand $\Delta t \rightarrow 0$, $AB = \widehat{AB} = v \Delta t$ 40

La relation de proportionnalité de Thalès entre les côtés donne :

En remplaçant AB par $v \Delta t$, on a donc : $\frac{\Delta v}{v} = \frac{v \Delta t}{r}$

D'où on trouve :

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

Donc quand $\Delta t \rightarrow 0$, on a

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

En résumé, pour un mouvement circulaire uniforme, l'accélération $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ est dirigée vers le centre du cercle (centripète) est a pour valeur :

$$a = \frac{v^2}{r}$$

35

36

37

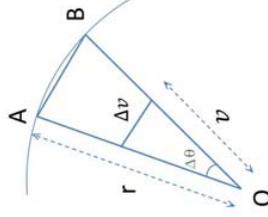
37

38

39

41

42



Extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels

Les accélérations, comme la vitesse et la trajectoire, dépendent du référentiel dans lequel elles sont décrites. Dans un certain référentiel, deux types d'accélérations :

- celles pouvant être associées à des circonstances physiques.
- celles que l'on peut attribuer uniquement au choix du système de référence pour décrire le mouvement.

43

Référentiel galiléen : référentiel où les accélérations observées peuvent être reliées aux circonstances physiques, et non au mouvement du référentiel dans lequel elles sont déterminées relativement à un autre. Ou également : référentiel dans lequel aucune composante d'accélération n'est interprétable comme uniquement liée au mouvement du référentiel lui-même, relativement à un autre.

Dans un tel référentiel, on peut extrapoler la définition de la grandeur force au sens de Newton $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$, ainsi que la 3^{ème} loi : $\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt}(t) = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}(t)$.

44

III - L'analyse de la révolution des astres selon les lois du mouvement

- Dans la première partie, plusieurs des éléments de remise en question de la distinction entre phénomènes terrestres et célestes => incitation à étendre la manière de décrire les mouvements sur terre aux mouvements des astres.

45

- Pour les lois du mouvement de Newton, dans le référentiel terrestre, la caractéristique du mouvement que l'on cherche à relier aux circonstances physiques est le vecteur accélération (quantifiant la variation du mouvement rectiligne uniforme).

46

- Enfin, on peut extrapoler la description du mouvement par les lois de Newton à d'autres référentiels où les accélérations observées peuvent également être reliées aux circonstances physiques, (et pas uniquement au mouvement du référentiel relativement à un autre système de référence).

47

Pour étudier le mouvement des astres de la même façon que les mouvements sur Terre, il faut donc trouver un référentiel dans lequel les vecteurs accélération correspondant au mouvement puissent être interprétés en les reliant aux circonstances physiques du contexte.

48

Le mouvement des planètes

La description du mouvement des planètes est particulièrement simple dans le référentiel héliocentrique, dans lequel on a de plus les lois de Kepler.

- Approximation du mouvement circulaire uniforme (ellipse très proche du cercle)
- Mouvement circulaire uniforme : accélération centripète de valeur : $a = \frac{v^2}{r}$ (cf. démonstration géométrique)

49

- Relation de Kepler $\frac{T^2}{r^3} = C \Rightarrow a \propto \frac{1}{r^2}$ (en utilisant $v = 2\pi r/T$)

Vecteur accélération de chacune des planètes : centripètes et de valeur $a \propto \frac{1}{r^2}$

Cela permet ainsi de faire l'hypothèse que ces accélérations soient liées à une circonstance physique particulière : la présence du Soleil au centre des trajectoires, et la distance de chacune des planètes au Soleil.

50

Les satellites de Jupiter

Dans le référentiel centré sur Jupiter, des trajectoires (quasiment) circulaires, et donc des accélérations centripètes, que l'on peut à nouveau facilement relier aux circonstances physiques : Jupiter au centre des trajectoires.

51

Relation expérimentale de Kepler : $\frac{T^2}{r^3} = C_J$ vraie également pour les satellites de Jupiter (avec une autre constante que pour les planètes)

Vecteurs accélération des satellites de Jupiter : centripètes et de valeur $a \propto \frac{1}{r^2}$

Ainsi dans les deux cas, les accélérations centripètes des astres en révolution ont comme caractéristique commune de dépendre de la distance au centre autour duquel ils tournent de la même façon, en $1/r^2$.

52

IV – La grande synthèse de Newton

• Résumé des différents éléments et rappel du problème

- Pendant plus de 2000 ans : distinction fondamentale entre monde terrestre et monde céleste. (Platon, Aristote, Ptolémée)

53

- Puis, proposition d'un changement de point de vue : Les planètes tournent autour du Soleil, y compris la Terre, qui se retrouve à une position quelconque dans le Ciel. (Copernic)
- Dans ce cadre, un lien entre le mouvement des planètes : $T^2/r^3 = C$. (Kepler)
- Analyse du mouvement circulaire uniforme : accélération centripète, $a = v^2/r$.
- En utilisant la relation $T^2/r^3 = C$ dans $a = v^2/r$ on trouve pour l'accélération centripète des planètes : $a \propto 1/r^2$.
- Sur Terre, accélération de chute libre constante : $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.
- Force (au sens de Newton) associée à la chute : $\vec{F}_{\text{chute}}^{\text{Newt}} := \vec{P} = m \vec{g}$.

366

- **Extrapolation de la dépendance en $1/r^2$ de l'accélération des satellites de Jupiter à la Lune.**

Loi $a \propto \frac{1}{r^2}$ valable pour les planètes autour du Soleil, pour les satellites de Jupiter autour de Jupiter. On peut faire l'hypothèse que cela est vrai également pour le cas de la Lune, qui est également un satellite, celui de la Terre.

Sachant que $R_{\text{Terre}} = 1/60 R_{\text{Terre}/\text{Lune}}$, en supposant que l'accélération centripète de la Lune varie en $1/r^2$, sa valeur à la surface de la Terre vaudrait $a_L \times 60^2$

$$\text{Or } a_L \times 60^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$$

On retrouve la valeur de l'accélération de chute libre g . On peut donc voir l'accélération de chute libre terrestre comme un cas particulier de l'accélération centripète céleste, lorsqu'on est à la surface de la Terre.

Conclusion : l'accélération de chute libre sur Terre g et l'accélération centripète de la Lune a_L sont de même nature, c'est-à-dire liées aux mêmes types de circonstances physiques, à des distances différentes.

Ainsi la force au sens de Newton 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.

- **Quelles sont les circonstances physiques associées à ces accélérations ?**

- Des accélérations liées à la présence de la Terre

Le phénomène de chute libre peut avoir lieu de la même façon partout sur Terre, quel que soit les types de matériaux. On pourrait donc supposer qu'il est associé à des circonstances physiques qui sont toujours présentes à la surface de la Terre. 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. On note sa valeur par $F_{\text{Terre}/\text{corps}}$.

- Puis, proposition d'un changement de point de vue : Les planètes tournent autour du Soleil, y compris la Terre, qui se retrouve à une position quelconque dans le Ciel. (Copernic)
- Dans ce cadre, un lien entre le mouvement des planètes : $T^2/r^3 = C$. (Kepler)
- Analyse du mouvement circulaire uniforme : accélération centripète, $a = v^2/r$.
- En utilisant la relation $T^2/r^3 = C$ dans $a = v^2/r$ on trouve pour l'accélération centripète des planètes : $a \propto 1/r^2$.
- Sur Terre, accélération de chute libre constante : $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.
- Force (au sens de Newton) associée à la chute : $\vec{F}_{\text{chute}}^{\text{Newt}} := \vec{P} = m \vec{g}$.

Rappel du problème :

Chute libre sur Terre, révolution des astres dans le Ciel. Quels liens pourrait-il bien y avoir entre ces deux types de mouvement ?

Considération du cas de la Lune : limite entre le monde terrestre et le monde céleste.

- **Comparaison du cas de la Lune à la chute libre sur Terre**

Le mouvement de la Lune est le plus simple à décrire dans le référentiel géocentrique. Dans ce référentiel, mouvement quasiment circulaire uniforme, et donc accélération centripète.

Sur Terre, l'accélération de chute libre est dirigée également vers le centre de la Terre.

=> accélération centripète de la Lune et accélération de chute libre : même direction.

Idée : Et si ces deux accélérations étaient liées aux mêmes types de circonstances physiques ? Autrement dit est-ce que l'accélération centripète de la Lune et l'accélération de chute libre sur Terre pourraient être deux cas particuliers d'un même type de phénomène, à des endroits différents.

Mais il n'est pas possible de conclure seulement avec la même direction.

Détermination de la valeur de l'accélération centripète de la Lune :

$$a_L = \frac{v_L^2}{r_L}, \quad v_L = \frac{2\pi r_L}{T_L}, \quad a_L = 2,725 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

60

61

62

63

64

65

- Des accélération 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, en $1/r^2$. Il s'agit donc d'une circonstance physique essentielle associée à ces accélérations :

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

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

Pour le cas de la chute libre, $\vec{P} = m\vec{g} \propto m$, puisque \vec{g} ne dépend pas de 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 :

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

- 3^{ème} loi du mouvement et lien à la valeur de la masse de la Terre

D'après la 3^{ème} loi, 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 :

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

Généralisation

Dans le raisonnement menant à cette expression, un point crucial : la mise en relation de l'accélération de chute libre sur Terre et l'accélération de la Lune, par 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 est à la fois de même nature :
- les accélérations centripètes des astres (satellites de Jupiter et planètes autour

du Soleil),
- que l'accélération de chute libre sur Terre.

66

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, puisque toutes ces accélérations sont finalement des cas particuliers d'un même type de phénomène.

67

Enfin, finalement les seules circonstances physiques associées à ces accélérations (celles des objets en chute sur Terre et celles des astres en révolution) sont uniquement la masse des corps et leur distance relative. **Or tous les corps ayant une masse, on peut même supposer que ces accélérations pourraient avoir lieu entre tous corps deux à deux.** C'est-à-dire qu'un corps pourrait 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. Le fait que les accélérations entre deux objets sur Terre ne soit pas perceptibles serait simplement due au fait qu'elles sont proportionnelles à la masse de ces objets, et donc infime relativement à l'accélération de chute libre, proportionnelle à la masse de la Terre.

68

La grandeur force associée d'abord à l'accélération de chute libre, le poids \vec{P} , a donc finalement pu être généralisé 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**.

69

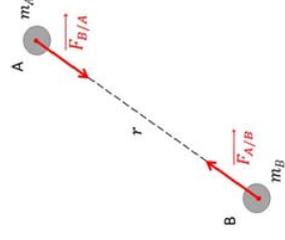
Pour tout corps A et B *quelconques*, de masse m_A et m_B , à une distance r l'un de l'autre, une force s'exerce de A sur B et de B sur A, dirigée de l'un vers l'autre, selon la direction de la droite qui relie A et B. Ces deux forces ont même valeur $F_{B/A} = F_{A/B}$, tel que :

$$F_{A/B} \propto \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

En écrivant cette formule avec une **constante de proportionnalité**, notée **G** :

$$F_{A/B} = G \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

70



75

La grandeur force associée d'abord à l'accélération de chute libre, le poids \vec{P} , a donc finalement pu être généralisé 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**.

Pour tout corps A et B *quelconques*, de masse m_A et m_B , à une distance r l'un de l'autre, une force s'exerce de A sur B et de B sur A, dirigée de l'un vers l'autre, selon la direction de la droite qui relie A et B. Ces deux forces ont même valeur $F_{B/A} = F_{A/B}$, tel que :

$$F_{A/B} \propto \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

En écrivant cette formule avec une **constante de proportionnalité**, notée **G** :

$$F_{A/B} = G \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

- **Interprétation**

Après plus de deux millénaires où on a pensé le monde comme divisé entre le Ciel et la Terre, comme deux zones distinctes et incompatibles - le monde terrestre avec ses irrégularités, le monde céleste dans sa perfection divine, la théorie de Newton permet d'établir un lien explicite entre ces deux mondes :

77

Les phénomènes de chute sur Terre et de révolution des astres dans le Ciel peuvent être interprétés avec une même force.

78

Le système du monde peut donc désormais être décrit de façon **unique**, avec une même force expliquant autant les mouvements terrestres que célestes. Par cette unification des mondes terrestres et célestes, Newton donne naissance à la notion d'**Univers**.

V - Définitions finales du vocabulaire

Le point sur la définition des termes, pour la suite.

- **La pesanteur, au sens courant** : le fait que les objets tombent au sol (la chute libre), et le fait qu'ils appuient ou déforment sur le support sur lequel ils sont posés (ou qui le retient).
(il s'agit d'un phénomène, c'est-à-dire quelque chose que l'on observe directement, sans l'interpréter avec des concepts définis dans la théorie).

- **La gravité, au sens courant**, synonyme de pesanteur.

- **L'accélération de pesanteur, g** : l'accélération au cours de la chute libre des objets, notée \vec{g} , de valeur $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Cette valeur est constante au cours de la chute, (dans le cas où on peut négliger l'influence des frottements de l'air), et ne dépend pas de la masse des objets.

- **Le concept de force au sens de Newton** : ce qui caractérise les circonstances physiques associées au vecteur accélération d'un objet. (Qualitativement : à la variation du mouvement rectiligne uniforme). Définition quantitative de la grandeur physique : $\vec{F}^{Newt} := m \vec{a}$.

- Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, masse...).

- Lorsque plusieurs types de circonstances physiques sont en jeu, on peut relier différentes composantes de l'accélération observée à différentes circonstances physiques. (Par l'intermédiaire d'autres expériences où certaines de ces circonstances sont absentes).

- Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on peut dire que A exerce une force (au sens de Newton) sur B.

- Par construction, le concept de force est construit au départ dans le référentiel terrestre, puis généralisé aux référentiels où les accélérations observées peuvent effectivement être reliées aux circonstances physiques en présence, et non au mouvement du référentiel dans lequel elles sont déterminées, relativement à un autre référentiel.

- **Référentiel galiléen** : référentiel où les accélérations observées peuvent être reliées aux circonstances physiques, et non au mouvement du référentiel dans lequel elles

sont déterminées relativement à un autre.

- **Le poids (ou force de gravité)** : force, au sens de Newton, associée à l'accélération de chute libre (dans le référentiel terrestre).

$$\vec{P} := \vec{F}_{chute}^{Newt} := m \vec{g}.$$

Or puisque l'accélération de chute libre et les accélérations centripètes des astres peuvent être reliées aux mêmes types de circonstances physiques, on peut les caractériser avec une même force : la force gravitationnelle. Ainsi le poids est finalement un cas particulier, à la surface de la Terre, de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur les corps, c'est-à-dire :

$$\vec{P} = \vec{F}_{Terre/corps}(r = R_T)$$

- **Force gravitationnelle (ou force de gravitation, ou interaction gravitationnelle)** : force exercée entre tout corps A et B, dépendant de la masse de chacun des corps et de leur distance :

$$\vec{F}_{A/B} = G \frac{m_A \times m_B}{r^2}$$

Il s'agit de la force obtenue en généralisant le poids (ou force de gravité) sur Terre à la Lune puis aux planètes (en faisant le lien entre l'accélération de chute libre et l'accélération centripète de la Lune), avant d'être enfin généralisée entre tous corps. Elle est donc valable à la fois sur Terre et dans l'espace, et sur Terre elle correspond au poids : $\vec{F}_{Terre/corps}(r = R_T) = \vec{P}$ (en négligeant la part d'accélération centrifuge liée à la rotation de la Terre dans l'accélération de chute libre).

Annexe E

Questionnaire supplémentaire sur la perception de la dynamique pour les lycéens

1 Pour chaque point : Dans quelle mesure penses-tu que cet aspect du cours - est important pour la compréhension du sens physique ?
- est utile dans les situations concrètes ?

2 Classe par ordre d'importance (pour toi) les différents aspects :
- le (ou les) plus important(s) : 1
- le (ou les) deuxième(s) plus important(s) : 2
- le (ou les) troisième(s) plus important(s) : 3

- pour la compréhension du sens physique
- pour l'utilisation dans les situations concrètes

- **La réflexion générale sur la notion d'explication avant d'aborder l'explication du mouvement en termes de forces.**
(« Qu'est-ce qu'on explique ? Comment on l'explique ? »)
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **L'idée que ce qu'on cherche à expliquer est toujours relatif à une situation considérée comme « normale », que l'on ne cherche pas à expliquer. On cherche à expliquer ce qui diffère de cette situation jugée normale.**
(l'exemple du thé qui refroidit, du vélo qui s'arrête, de la personne qui va manger à midi)
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **L'idée qu'une explication consiste à mettre en relation ce qu'on veut expliquer avec quelque chose d'autre.**
(extinction des dinosaures et météorite, trouble du comportement et traumatisme de l'enfance, position du lever du soleil et rotation de la terre)
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **La notion de mouvement naturel de référence. Le fait que l'on cherche à expliquer en termes de force uniquement les mouvements qui sont différents du mouvement considéré comme naturel.**
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **La mise en évidence de la contradiction entre les interprétations de la chute libre par Galilée et Newton.**
(« Quelle définition de la notion de force chez Newton ? Quel mouvement naturel de référence ? »)
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **Le fait d'utiliser l'appellation « force au sens de Newton » plutôt que juste « force ».**
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **Le fait de passer du temps sur la construction de la définition de la grandeur physique force au sens de Newton.**
(avec les chariots de sable et les aimants)
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **Les schémas qui montrent les liens entre $\overline{\Delta v}$, $\vec{a}(t)$ et $\vec{F}^{Newt}(t)$**
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **Le schéma pour déterminer le vecteur $\overline{\Delta v}$, et la relation $\vec{v}(t) + \overline{\Delta v} = \vec{v}(t + \Delta t)$**
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile
- **Un autre aspect du cours que tu aurais trouvé utile ou important :**
 pas vraiment important peu important important très important
 pas vraiment utile peu utile utile très utile

Annexe F

Catégorisation pour l'activité A1

Le tableau suivant rassemble les différentes propositions de passages, en réponses aux questions de l'activité A1, tels qu'elles ont été catégorisés, selon les quatre catégories suivantes :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajouté] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

Les numéros de paragraphe correspondent à la numérotation de la synthèse, annexe B p.353. Un numéro suivi d'un # signifie que seulement une partie du paragraphe a été mentionnée. Lorsque le paragraphe est situé dans la catégorie A, la partie du paragraphe sélectionnée correspond à celle donnée dans les « arguments pertinents attendus » de la question correspondante, dans l'analyse des résultats de cette activité (cf. 6.3.2 p.221). Pour les numéros avec les # dans les autres paragraphes, voir les tableaux excels des données, accessibles à la demande.

A1

Différentes combinaisons ayant été attribuées à chacune des catégories

	A	B	C	D
	Arguments pertinents attendus	Arguments pertinents + passages cohérents mais moins directement liés à la question OU Certains des arguments attendus, mais aurait pu être complété	Passages cohérents mais moins directement liés, pas suffisamment d'arguments attendus	Majorité de passages sans rapport avec la question
a)	- 7 - 12# - 14# - - 6# - 7 - 11 - 12 - 14# - - 9 - 10 - 12# - 14# - - 10 - 14 - 19 - - 11 - 14# - 17# - - 14 - 19 - - 10 - 12# - 14 - - 12# - 14# - 19 - - 12# - 14# -	- 12# - - 7 - 14# - - 10 - 14 - - 14 - 16 - 17 - - 14 -	- 7 - 9# - 10 - 17# - - 6 - 7 - 8 - - 7 - - 8 - 9 - 10 - - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - L9 - L10 -	- 16# - 18 - 21# - 22# - - L9 - L10 -
b)	- 12 - - 25 - - 24# - 25 - - 25# - - 12# - 21# - 25 - - 19 - - 17# - 18 - 19 - - 19 - 20 - 25 -	- 10 - 11 - 12 - 13 - L12 - Ls12 - L4 - L5 - L6 - Ls6 - 30 - 31 - - 18 - 26 - 29 -	- 17# - 26# - - 18# -	- 22 - - 13 - - L1# - L2 - - L12 - - L9 - L10 -
c)	- 23# - 24# - - 13 - 24 - - 6# - 24# - - 24# - - 24 -	- 13 -		- 33 - L10 - - 32 - 33 - 34 - - 14 -

Annexe G

Catégorisation pour l'activité A2

Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton

Point de départ

1 La notion de force, au sens général : ce qui permet d'expliquer le mouvement.

L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication.

a1 Force (au sens général): concept permettant d'expliquer un mouvement différent du mouvement considéré comme naturel, d'expliquer la « variation » du mouvement naturel.

Interprétation de la chute verticale :

D'Aristote (-300) à Galilée (1630) : mouvement naturel, pas de force.

Newton (1680) : mouvement associé à une force : le poids.

$$\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$$

i6 Puisque les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, les circonstances extérieures au système B sont seulement attribuables au système A, on parle donc de la force exercée par A sur B. Et réciproquement. **J**

3 On explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.
Exemples : mouvement d'un clou ↔ présence et distance d'un aimant
vélo à vitesse constante ↔ le fait de pédaler.

1^{ère} « loi » de Newton (restreinte au référentiel terrestre) :
Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = \text{cste}$), incluant le repos ($\vec{v} = \vec{0}$).
Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq \text{cste}$).

c2 Une autre définition de la notion de force pour Newton, donc une autre définition du mouvement considéré comme naturel. **C**

b2 L'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter. **B**

i6 Expérimentalement, pour deux systèmes A et B en interaction exclusive, c'est-à-dire dont l'accélération de l'un est liée uniquement à la présence de l'autre, on observe que : $m_A \vec{a}_A = -m_B \vec{a}_B$

6 Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B, notée : $\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$

d3

D Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques mises en relation avec la variation du mouvement rectiligne uniforme.
Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, masse...).

f4 Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques associées à $\vec{a}(t)$. **F**

e4 Définition mathématique de la variation du mouvement rectiligne uniforme en un point :
$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$$
 E

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton, \vec{F}^{Newt}

Caractérisation par le vecteur accélération
Exemples : pour différents aimants, différents $\vec{a}(t)$.
Une première façon de quantifier l'« efficacité » de l'aimant (les circonstances physiques associées à l'accélération) est de poser $\vec{F}^{Newt} \propto \vec{a}$.
Une accélération plus grande sera associée à un aimant « plus efficace ».

5 Constat expérimental :
Pour les mêmes circonstances physiques (par ex. les mêmes aimants aux mêmes positions), deux objets de masse différente n'ont pas la même accélération.

95 Pour que la grandeur physique force caractérisée les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques. **G**

h5 Or pour les mêmes circonstances, en un point donné, on observe pour différents objets : $a \propto 1/m$, donc le produit $m \times a$ est invariant pour les mêmes circonstances physiques associées à l'accélération. Ce produit peut donc être utilisé pour définir la grandeur force au sens de Newton. **H**

2^{ème} « loi » de Newton : Définition quantitative de la grandeur physique force au sens de Newton

$$\vec{F}^{Newt} := m\vec{a}$$

Le tableau ci-dessous donne la catégorisation des différentes configurations ayant été obtenues pour le puzzle de l'activité A2.

Chacun des emplacements du puzzle est désigné par une lettre en minuscule, suivi du numéro de l'étape correspondante (cf. schéma ci-contre). Les lettres en majuscule correspondent aux différents éléments à positionner.

La première ligne signifie qu'avoir placé les éléments B ou C à l'emplacement a1 a été catégorisé comme localement cohérent.

Dans la seconde ligne, C & (c2 B) signifie que l'élément C placé en b2 a été catégorisé comme localement cohérent seulement si l'élément B a été placé en c2.

La manière la plus simple de visualiser les différentes configurations est d'imprimer et de découper les éléments (p.188) et les disposer sur une version papier du schéma.

	<i>Interversion valide</i>	<i>Localement cohérent</i>
a1		B, C
b2		- C & (c2 B) - C & (c2 A)
c2		B & (b2 C)
d3		G
e4	F & (f4 E)	- G & (d3 D) & (f4 E) - G & (d3 E) & (f4 F) - G & (d3 F) & (f4 E)
f4	E & (e4 F)	- E & (e4 G) & (d3 D) - F & (e4 G) & (d3 G)
g5	H & (h5 G)	H
h5	G & (g5 H)	E
i6		F
j6		I

Annexe H

Catégorisation pour l'activité A3

Le tableau suivant rassemble les différentes propositions de passages, en réponses aux questions de l'activité A3, tels qu'elles ont été catégorisés, selon les quatre catégories suivantes :

- A : présence des arguments pertinents attendus,
- B : [certains des arguments attendus, mais d'autres auraient pu être ajouté] OU [l'ensemble des arguments attendus, mais dilués parmi d'autres passages cohérents mais moins directement liés à la question],
- C : majorité de passages cohérents mais moins directement liés à la question, pas suffisamment d'arguments attendus,
- D : majorité de passages sans rapport avec la question.

Les numéros de paragraphe correspondent à la numérotation de la synthèse, annexe D p.363. Un numéro suivi d'un # signifie que seulement une partie du paragraphe a été mentionnée. Lorsque le paragraphe est situé dans la catégorie A, la partie du paragraphe sélectionnée correspond à celle donnée dans les « arguments pertinents attendus » de la question correspondante, dans l'analyse des résultats de cette activité (cf. 6.3.2 p.221). Pour les numéros avec les # dans les autres paragraphes, voir les tableaux excels des données accessibles à la demande.

A3

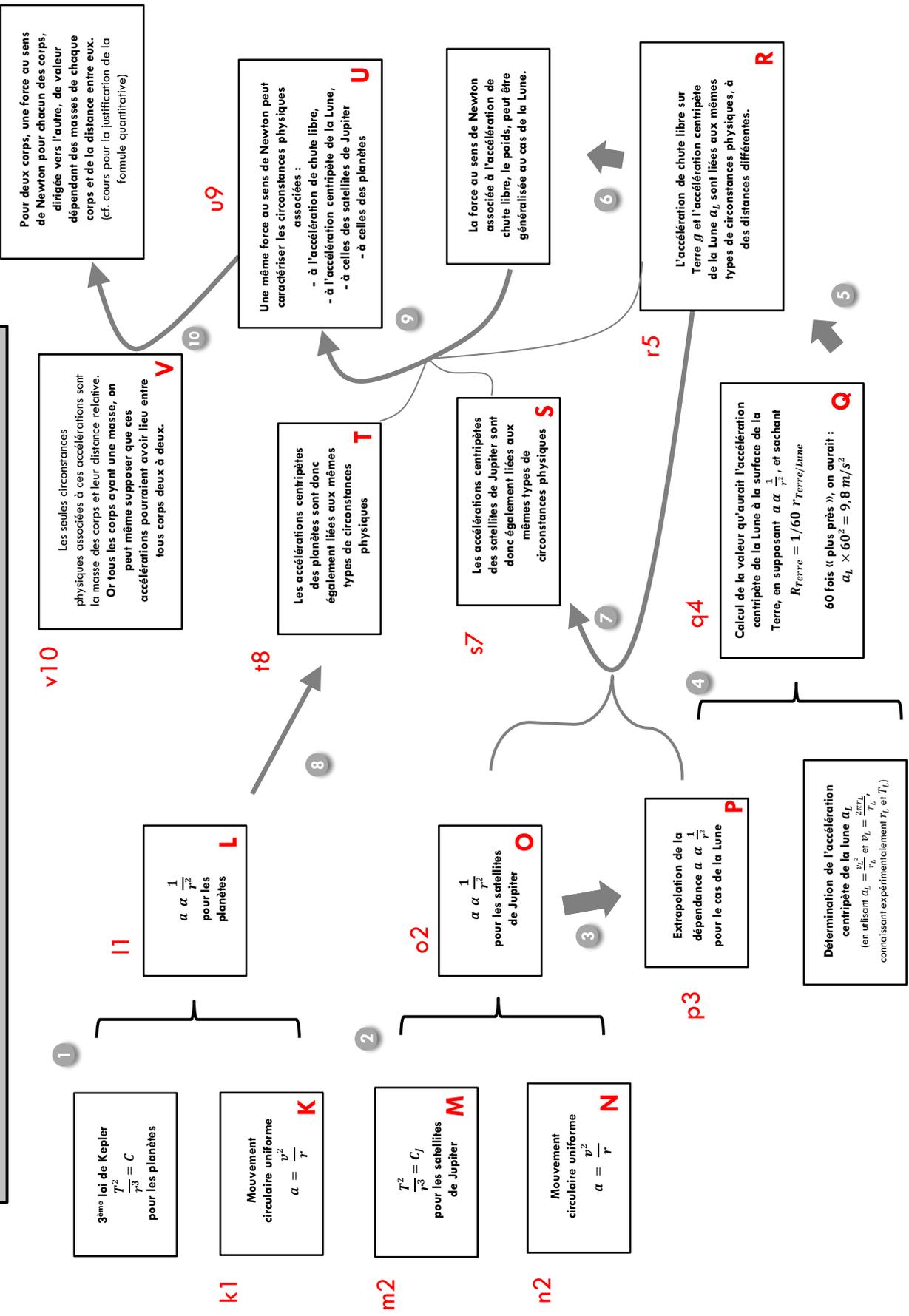
Différentes combinaisons ayant été attribuées à chacune des catégories

	A	B	C	D
	Arguments pertinents attendus	Arguments pertinents + passages cohérents mais moins directement liés à la question OU Certains des arguments attendus, mais aurait pu être complété	Passages cohérents mais moins directement liés, pas suffisamment d'arguments attendus	Majorité de passages sans rapport avec la question
d)	- 62 - - 57 - 58# - 61 - 63 - 64 - 65# - - 62 - 65# - - 57 - 62 - - 55 - 56 - 61 - 63 - 65 - - 60 - 61 - 62 - 63 - 64 - 72 -	- 61 - 62 - 63 - 64 - 71 - 73# - 78# - - 48 - 57 - 63 - 71 - 75 - 77# - 78 - - 73# - 67 - 66 - 70 - 63 - 49# - - 63 - 64 - 55 - 56 - 57 - - 52 - 57 - 63 - 64 - - 49 - 50 - 70 - - 63 - - 73# - 77# -	- 45 - 46 - 47 - 48 - 49 - 50 - - 55 - 56 - 57 - 58 - 59 - - 45 - 46 - 47 - 48 - - 57 - - 63 - 64 -	- 36# - 42 - - 53# - - 49 -
e)	- 62 - 63 - 64 - 57 - - 65 - 70 - 71 - - 45 - 53 - 63 - 70 - 72 -	- 57 - 65 - - 36# - 42# - 55 - 56 - 57 - 63 - 64 - 65# - 69 - 76 -	- 69 - 74 - - 65# - - 78 - - 55 - 56 - 57 - 58 - 59 - - 73# - - 76# - 65 -	- 52 -
f)	- 65# - - 70# - 72 - 73# - - 66 - 72 - 65 -	- 65 - 68# - - 52 - 55 - 56 - 57 - 63 - 64 - 65# - 71 - 76 - 78# - - 73# - - 66 - - 63 - 64 -	- 77# - 78# - - 77# -	- 67 - (x4 chez les 1S) - 50 -
g)	- 65 - - 65# -	- 75 - 65 -	- 57 - 75# - 76# - - 70 - 74 - - 76# - - 73# - 74# - - 73 - 74 -	- 57 - 60 - 66 - 71 - 72 - - 49# - 35# - 55 - 56 - 62 - - 55 - 56 - 57 - 60 - 63 - 64 - 76 - - 53 - 56 - 67 - - 76# - 56 - - 66# - - 68# -

Annexe I

Catégorisation pour l'activité A4

Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle



Le tableau ci-dessous donne la catégorisation des différentes configurations ayant été obtenues pour le puzzle de l'activité A4. voir schéma.

Chacun des emplacements du puzzle est désigné par une lettre en minuscule, suivi du numéro de l'étape correspondante (cf. schéma ci-contre). Les lettres en majuscule correspondent aux différents éléments à positionner.

La manière la plus simple de visualiser les différentes configurations est d'imprimer et de découper les éléments (p.190) et les disposer sur une version papier du schéma.

	<i>Interversion valide</i>	<i>Localement cohérente</i>
k1	N	
l1		T & (k1 L)
m2		
n2	K	O & (m2 M) S & (o2 O) & (m2 M)
o2		S & (n2 O) & (m2 M)
p3		
q4		P & (r5 Q)
r5		Q & (q4 P)
s7		V & (r5 U) & (p3 P) & (q4 Q) & (o2 S) R & (r5 Q)
t8		
u9	V & (v10 U) & (t8 T) & (s7 S) & (r5R)	V & (v10 U) & (t8 T) & (s7 R) & (r5S)
v10	U & (u9 V) & (t8 T) & (s7 S) & (r5R)	U & (u9 V) & (t8 T) & (s7 S) & (r5R)

Annexe J

Résultats de l'activité A2

Schéma des étapes du cheminement menant aux trois lois de Newton

Point de départ

1 La notion de force, au sens général : ce qui permet d'expliquer le mouvement.

1 L'explication du mouvement suppose toujours un état de mouvement de référence qui aurait lieu naturellement, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'explication.

a1 Force (au sens général): concept permettant d'expliquer un mouvement différent du mouvement considéré comme naturel, d'expliquer la « variation » du mouvement naturel.

Interprétation de la chute verticale :

D'Aristote (-300) à Galilée (1630) : mouvement naturel, pas de force.

Newton (1680) : mouvement associé à une force : le poids.

3^{ème} loi de Newton :

$$\vec{F}_{B \rightarrow A}^{Newt} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}^{Newt}$$

i6 Puisque les accélérations de A et B sont liées uniquement à la présence de ces deux systèmes, les circonstances extérieures au système B sont seulement attribuables au système A, on parle donc de la force exercée par A sur B. Et réciproquement.

3 On explique un mouvement en le mettant en relation avec certaines circonstances physiques.

Exemples : mouvement d'un clou ↔ présence et distance d'un aimant
vélo à vitesse constante ↔ le fait de pédaler

1^{ère} « loi » de Newton (restreinte au référentiel terrestre) : Le mouvement choisi comme mouvement naturel de référence (dans le référentiel terrestre) est le mouvement rectiligne uniforme ($\vec{v} = cste$), incluant le repos ($\vec{v} = \vec{0}$).

Le concept de force au sens de Newton désigne alors ce qui permet d'expliquer la variation du mouvement rectiligne uniforme (lorsque $\vec{v} \neq cste$).

c2 Une autre définition de la notion de force pour Newton, donc une autre définition du mouvement considéré comme naturel.

b2 L'interprétation d'un phénomène dépend de la définition des concepts que l'on utilise pour l'interpréter.

i6 Expérimentalement, pour deux systèmes A et B en interaction exclusive, c'est-à-dire dont l'accélération de l'un est liée uniquement à la présence de l'autre, on observe que : $m_A a_A = -m_B a_B$

6 Parmi les circonstances physiques pouvant être associées à l'accélération d'un système B, lorsque celles extérieures au système B sont attribuables à un système donné A, on dit que A exerce une force (au sens de Newton) sur B, notée : $F_{A \rightarrow B}^{Newt}$

d3

Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques mises en relation avec la variation du mouvement rectiligne uniforme. D

Circonstances physiques : présences, positions et vitesses de certains objets alentours, à distance ou en contact avec l'objet considéré, et les propriétés physiques des objets en jeu (type de matériaux, masse...).

f4

Force (au sens de Newton) : grandeur caractérisant les circonstances physiques associées à $\vec{a}(t)$. F

4

e4 Définition mathématique de la variation du mouvement rectiligne uniforme en un point :

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} := \frac{d\vec{v}}{dt}$$

E

Construction de la grandeur physique force au sens de Newton, \vec{F}^{Newt}

Caractérisation par le vecteur accélération

Exemples : pour différents aimants, différents $\vec{a}(t)$. Une première façon de quantifier l'« efficacité » de l'aimant (les circonstances physiques associées à l'accélération) est de poser $\vec{F}^{Newt} \propto \vec{a}$. Une accélération plus grande sera associée à un aimant (plus efficace).

5 Constat expérimental : Pour les mêmes circonstances physiques (par ex. les mêmes aimants aux mêmes positions), deux objets de masse différente n'ont pas la même accélération.

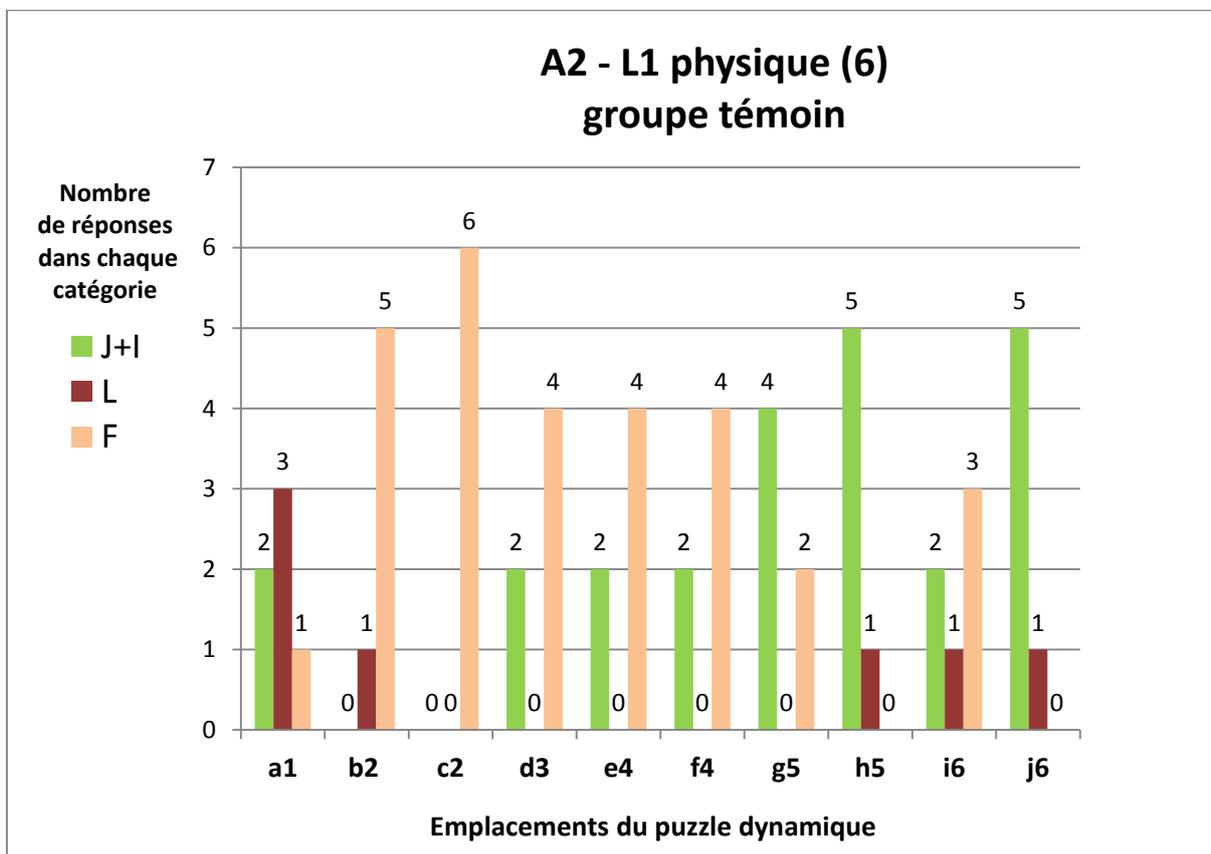
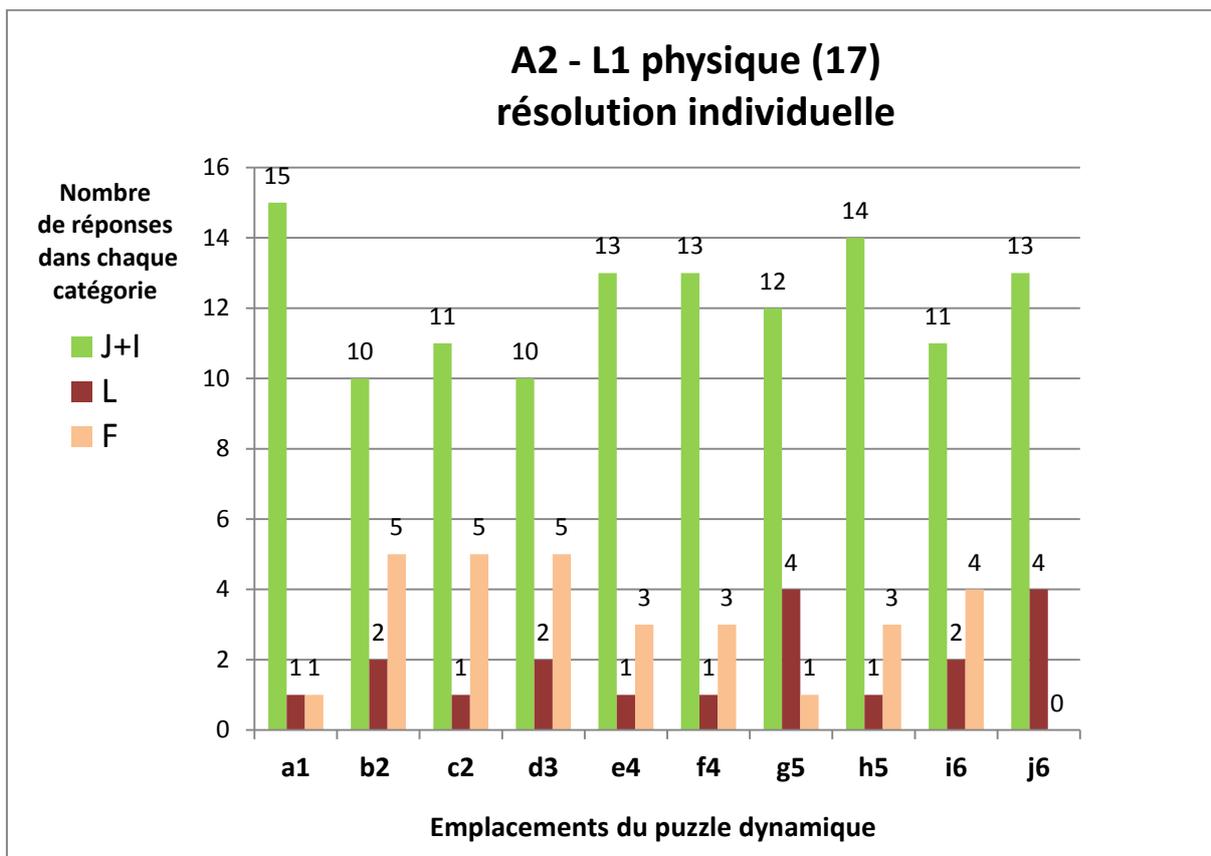
g5

Pour que la grandeur physique force caractérisé les circonstances physiques associées à l'accélération, elle doit avoir la même valeur pour les mêmes circonstances physiques. G

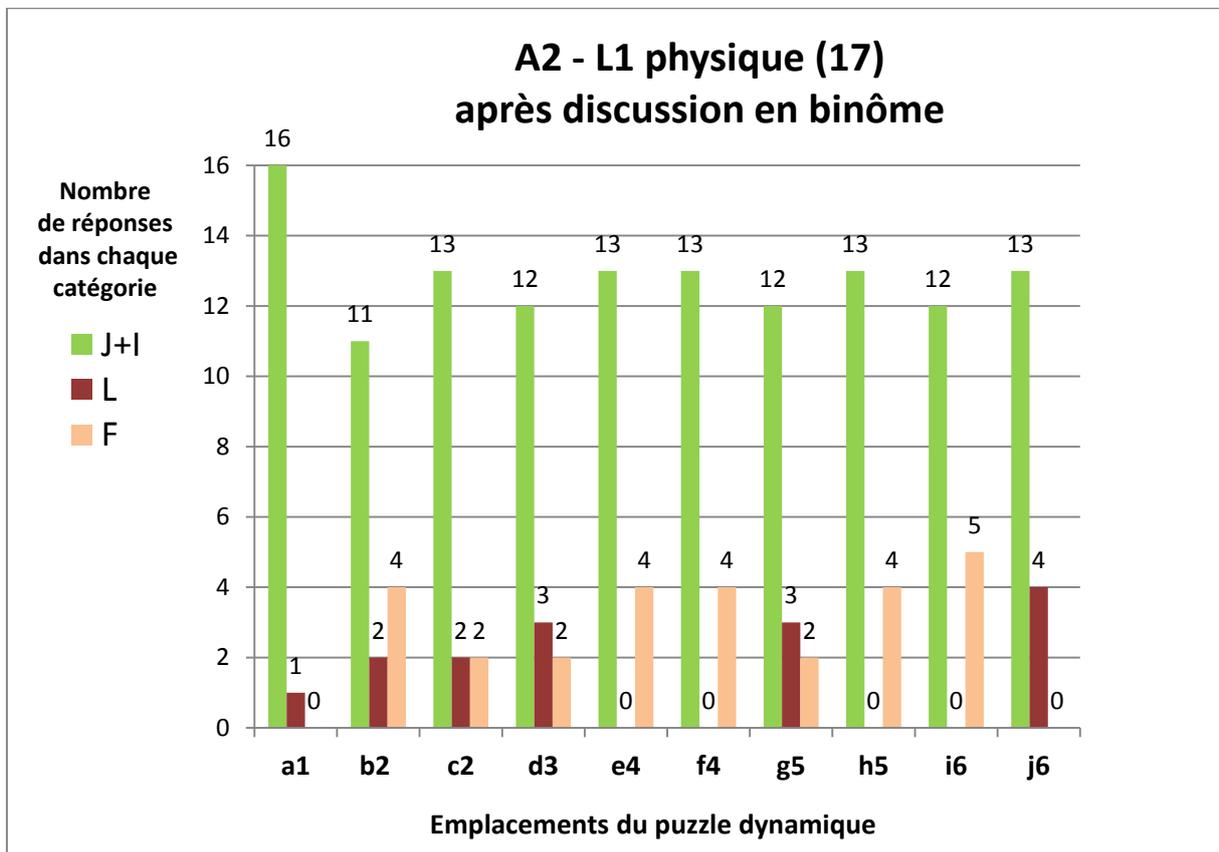
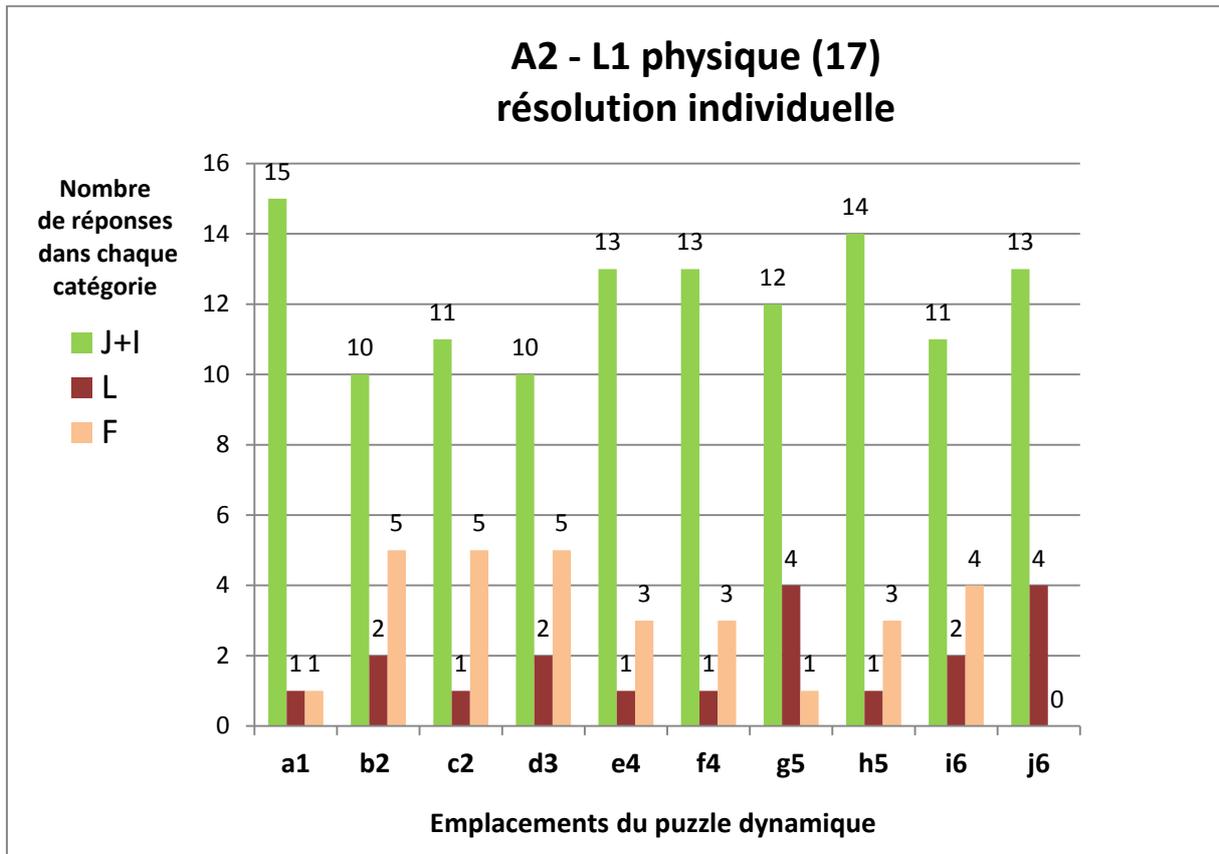
h5

Or pour les mêmes circonstances, en un point donné, on observe pour différents objets : $a \propto 1/m$, donc le produit $m \times a$ est invariant pour les mêmes circonstances physiques associées à l'accélération. Ce produit peut donc être utilisé pour définir la grandeur force au sens de Newton. H

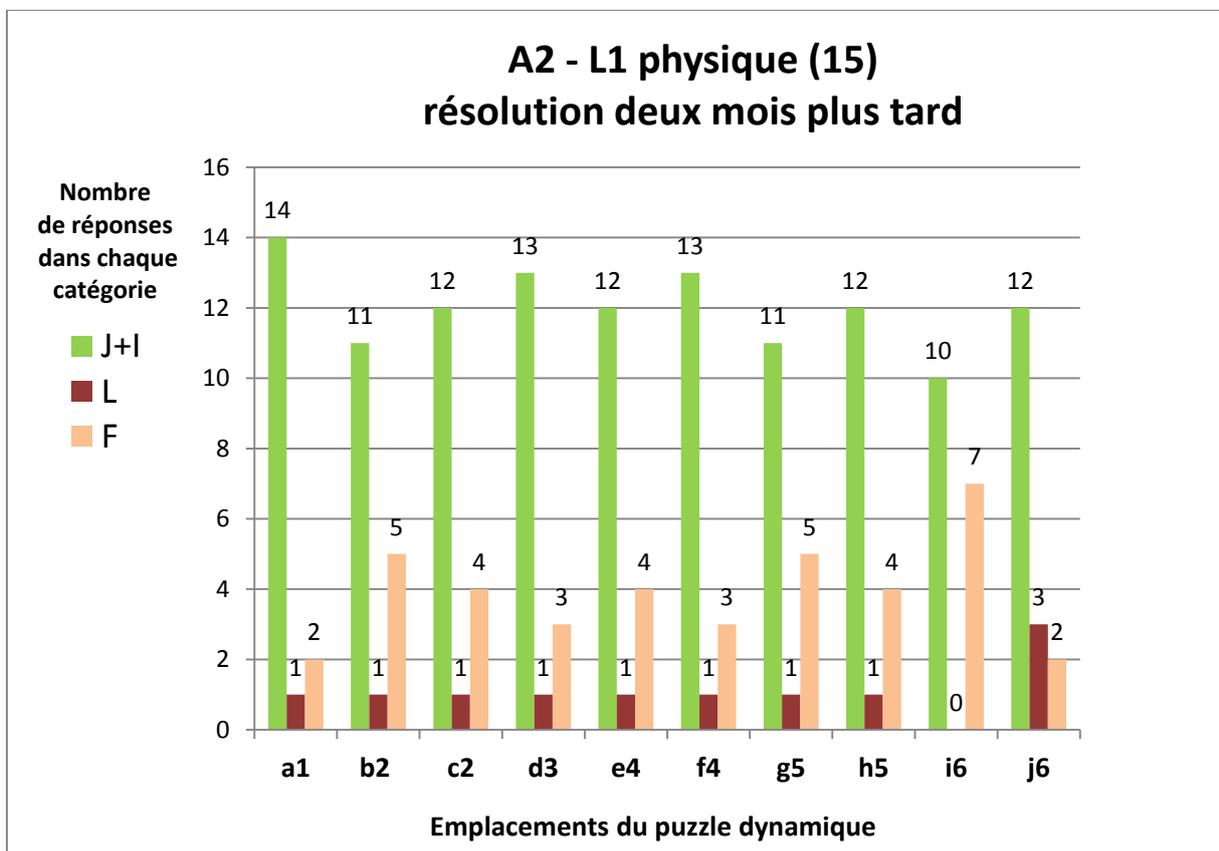
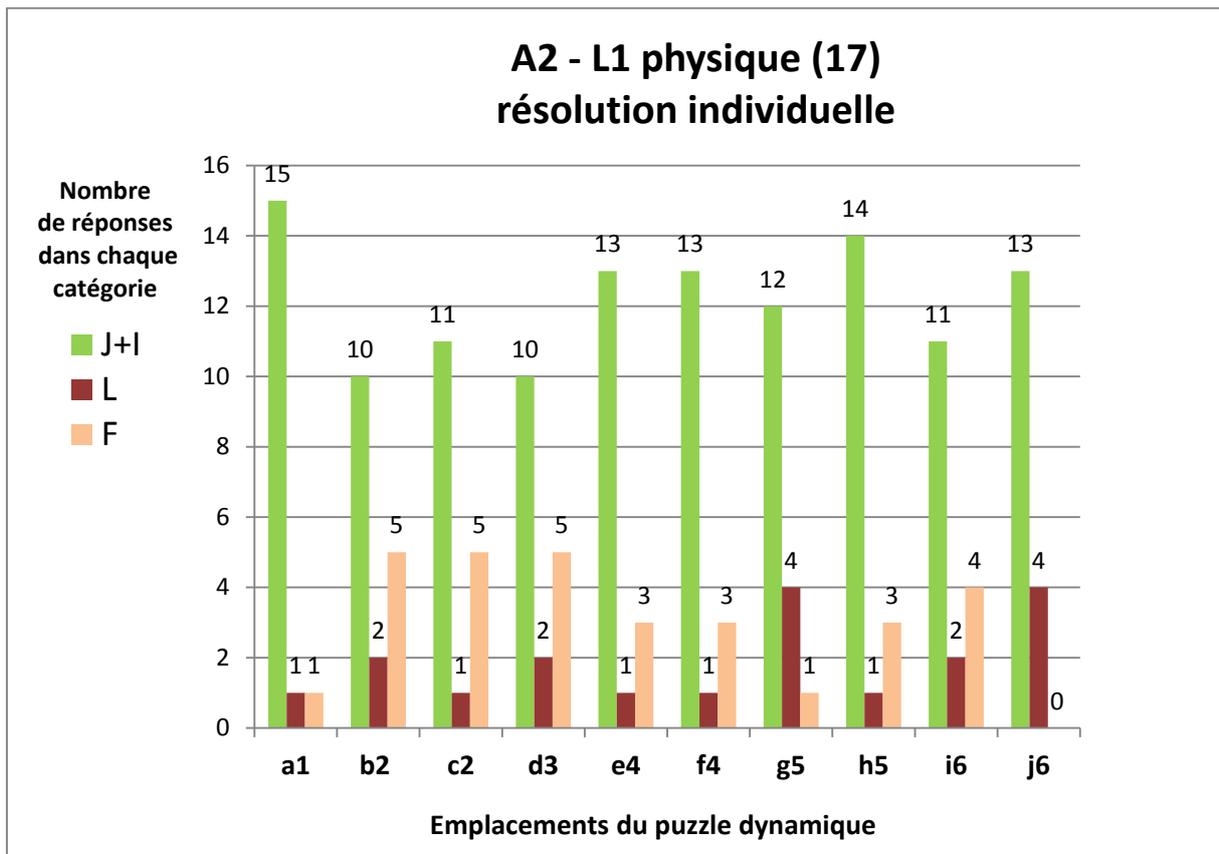
D1 – L1 physique (individuelle & groupe témoin)



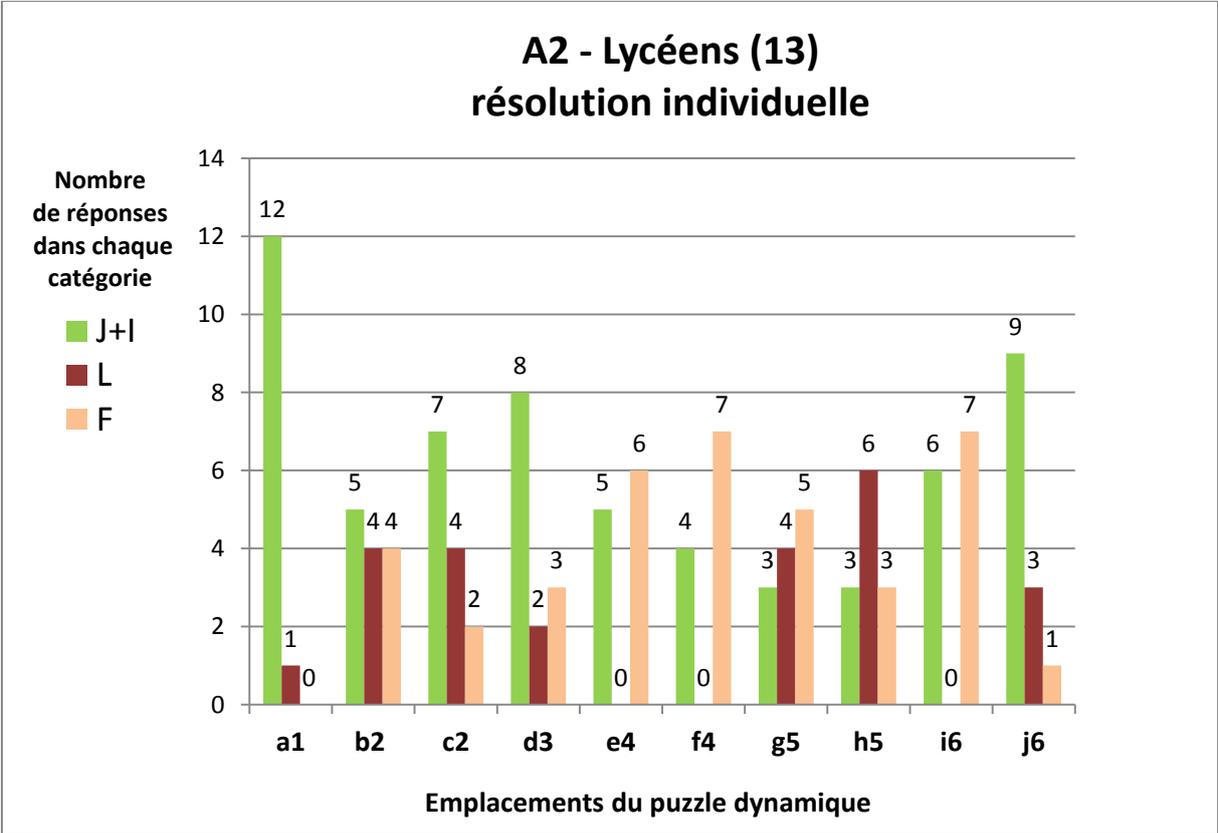
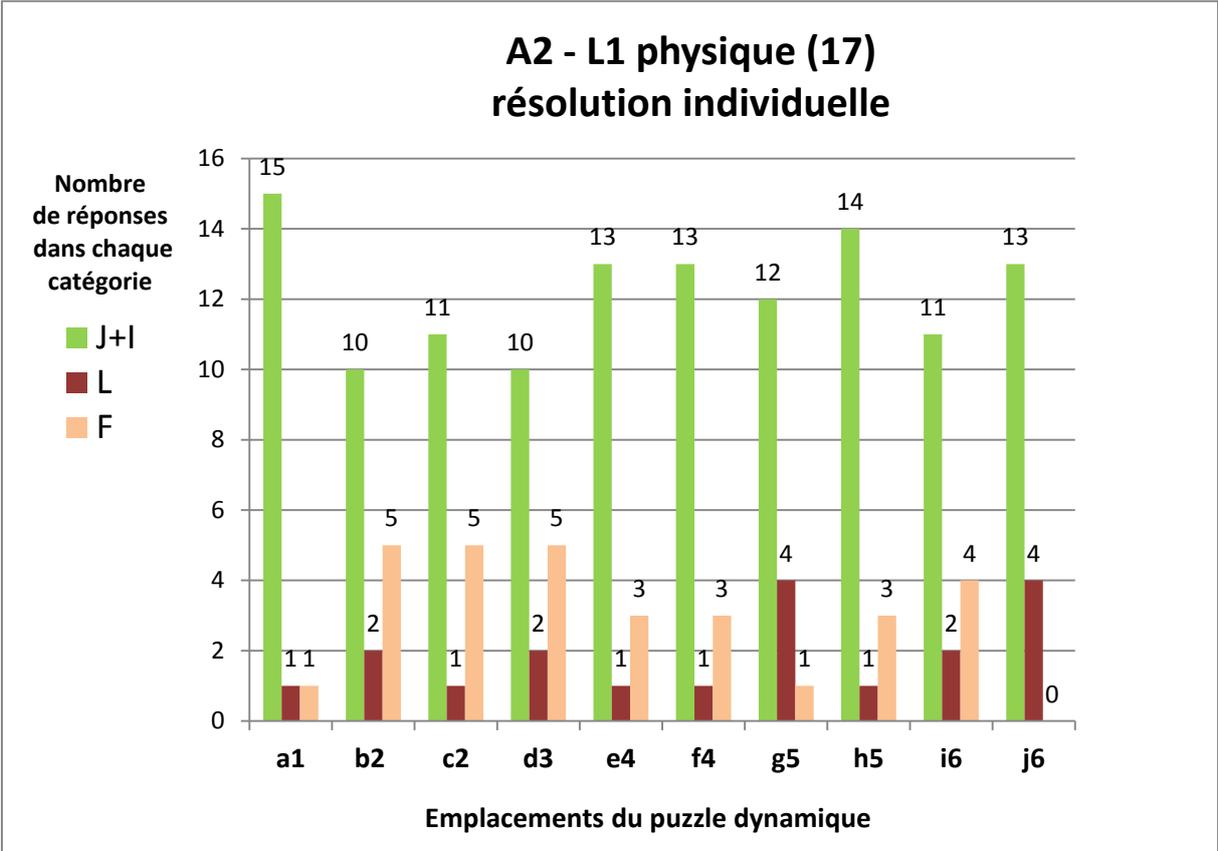
D2 – L1 physique (individuelle & après discussion)



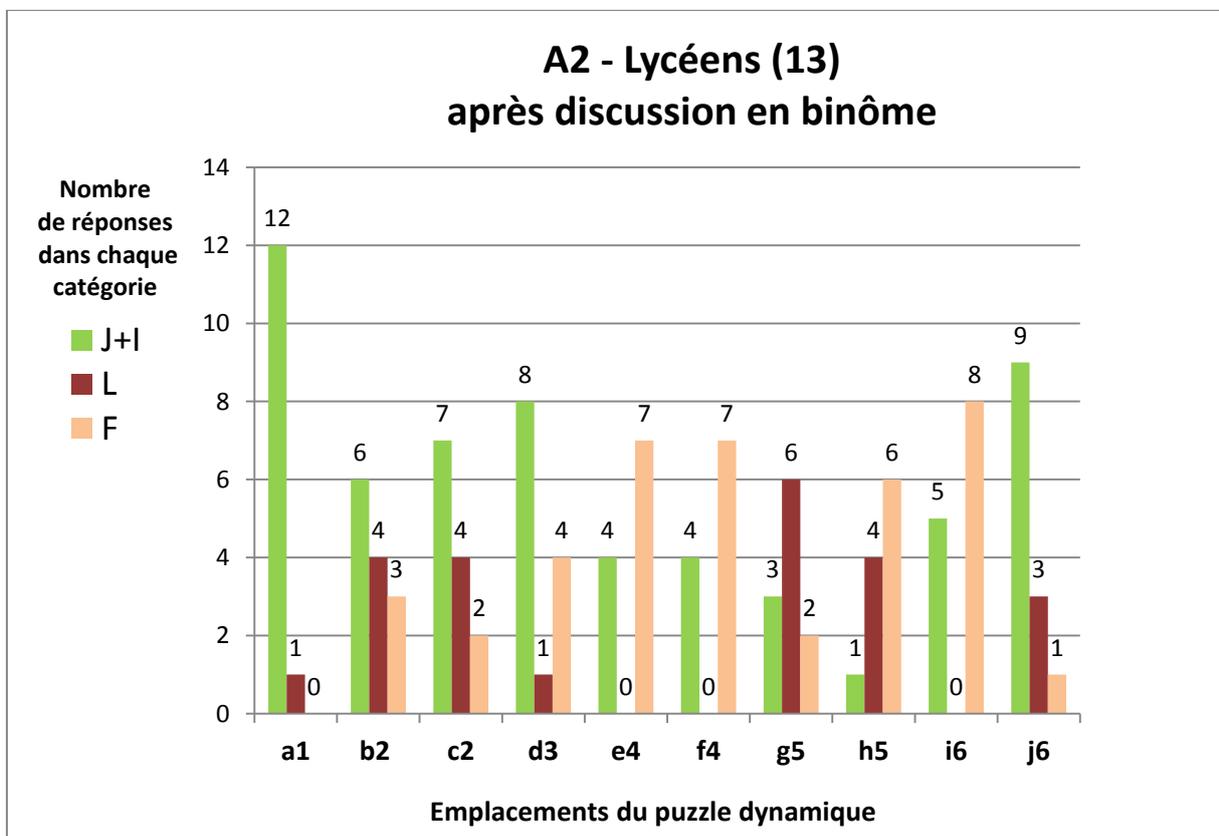
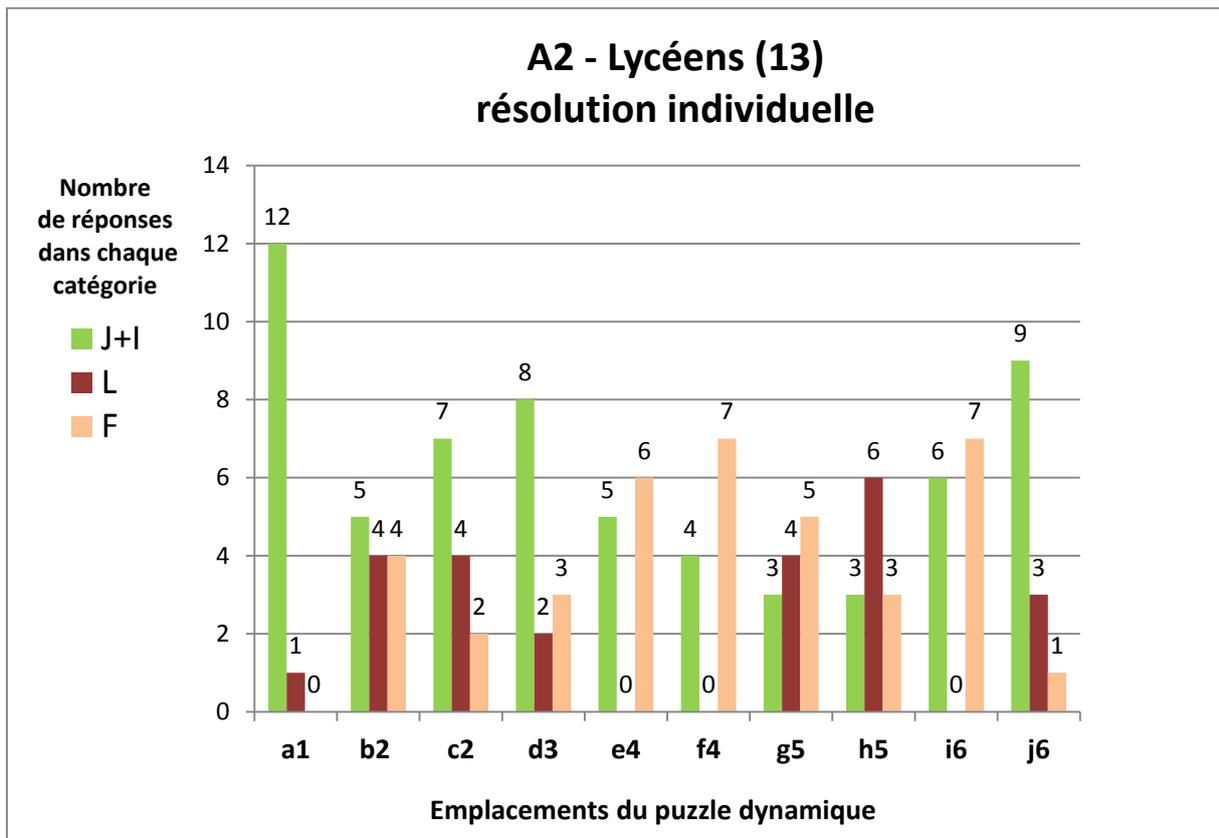
D3 – L1 physique (individuelle & deux mois plus tard)



D4 – L1 physique & Lycéens (individuelle)



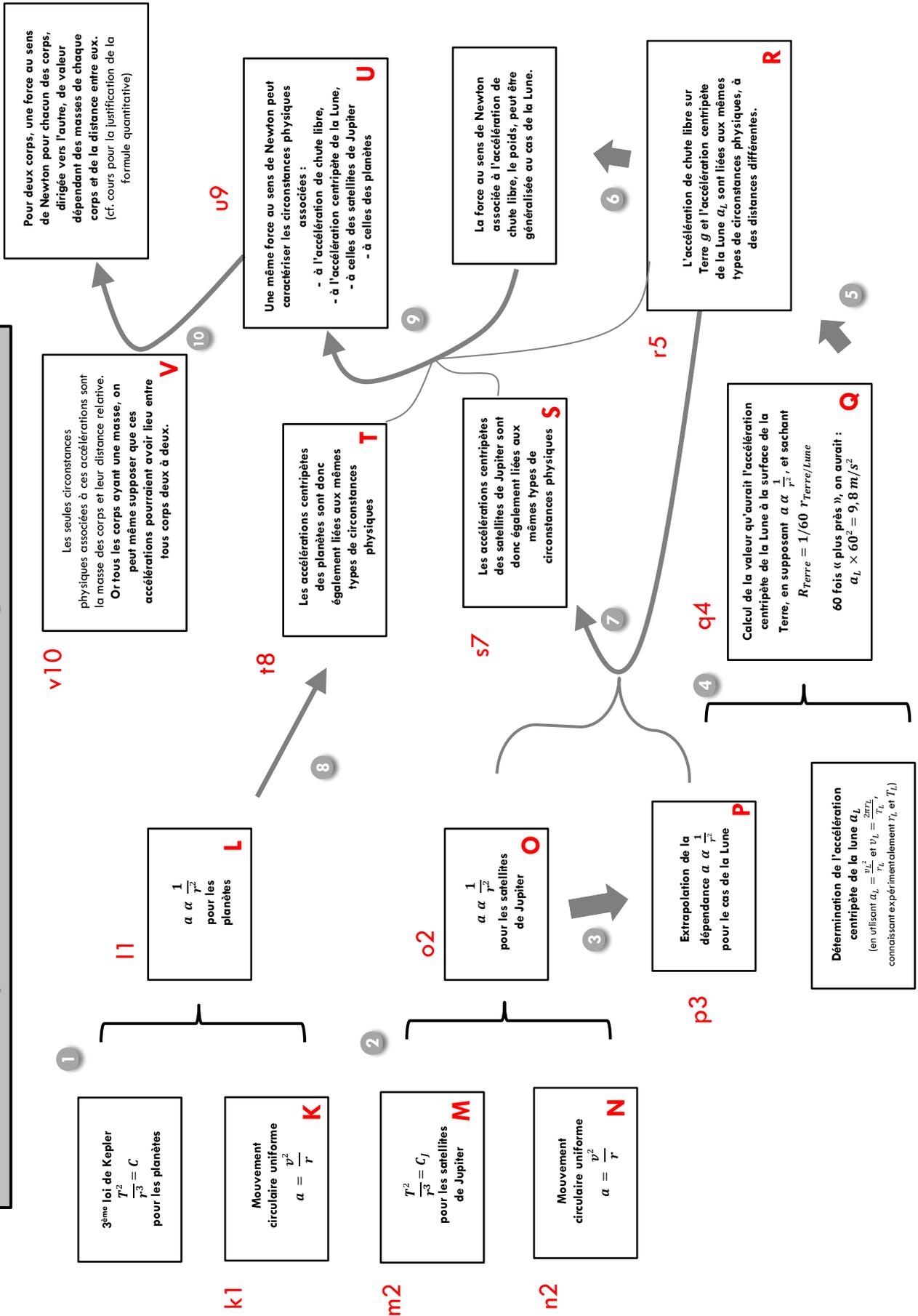
D5 – Lycéens (individuelle & après discussion)



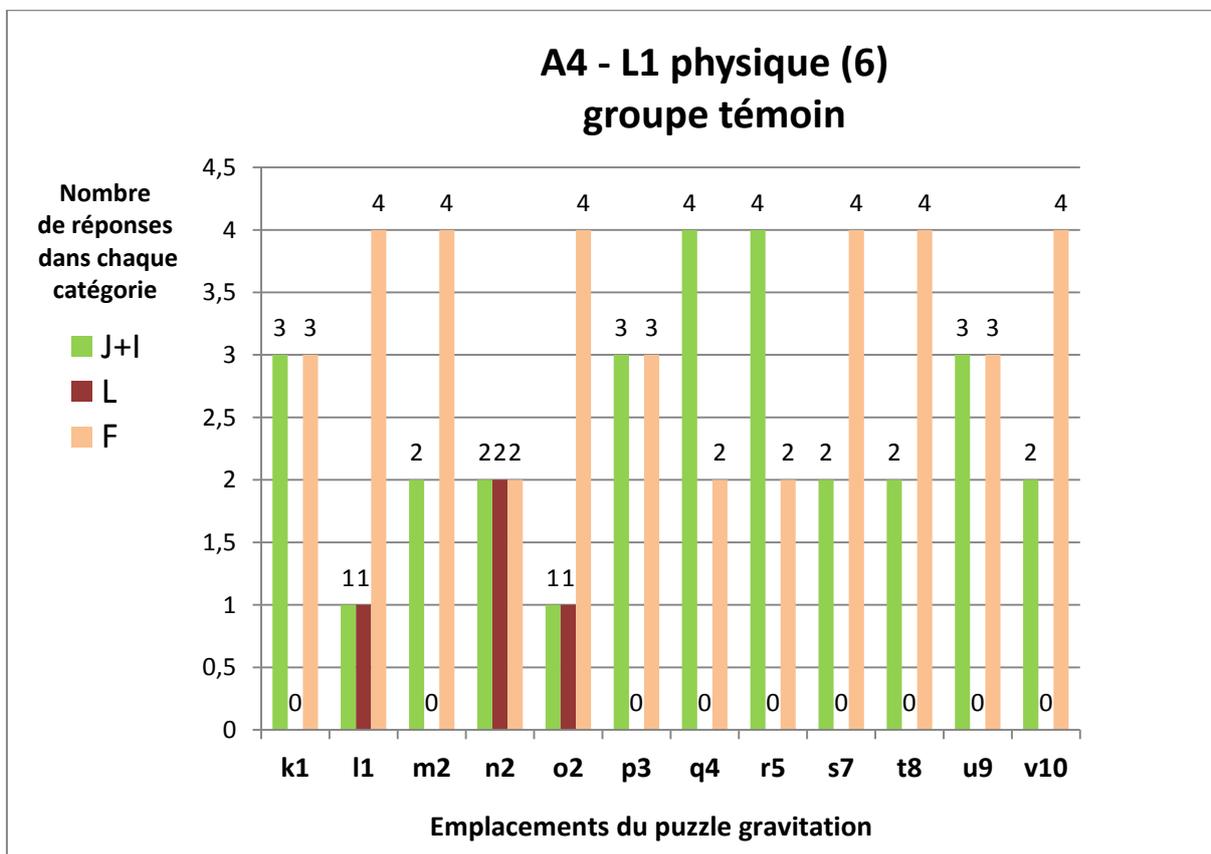
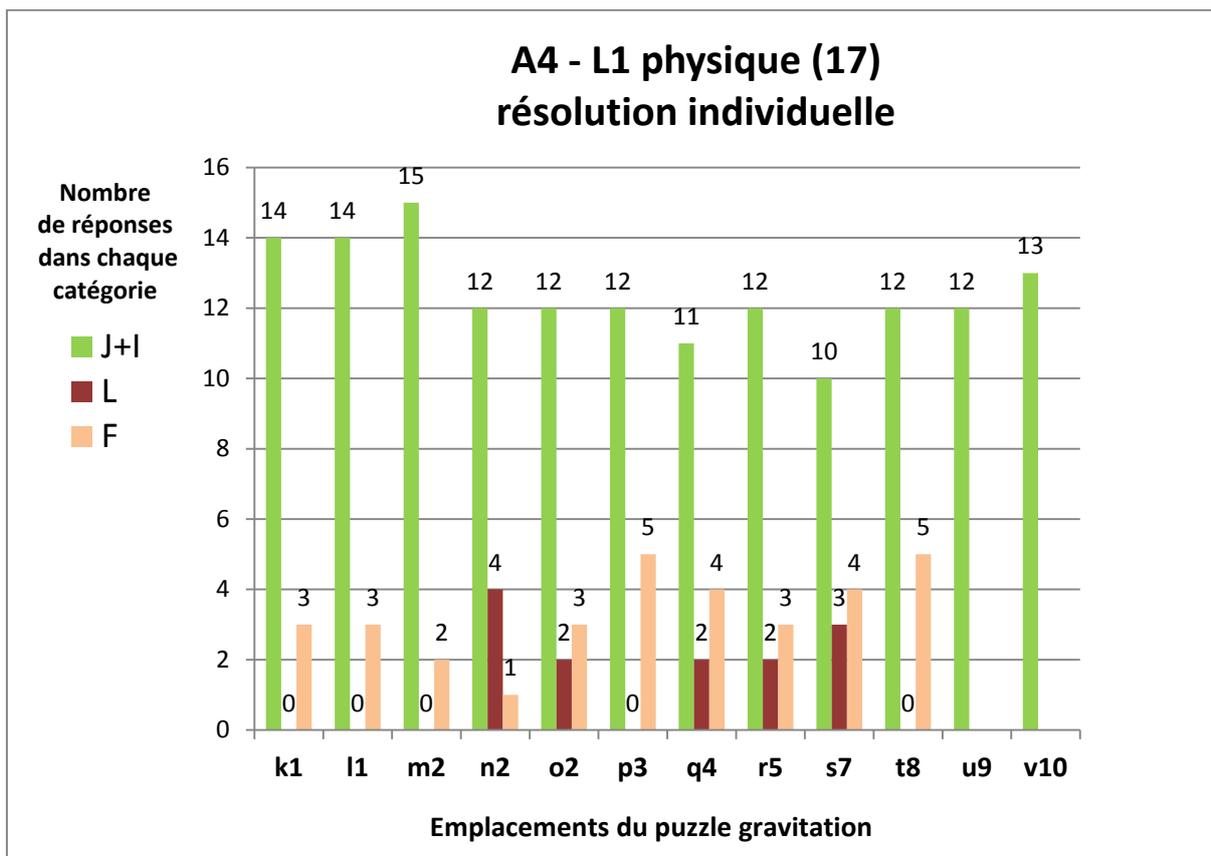
Annexe K

Résultats de l'activité A4

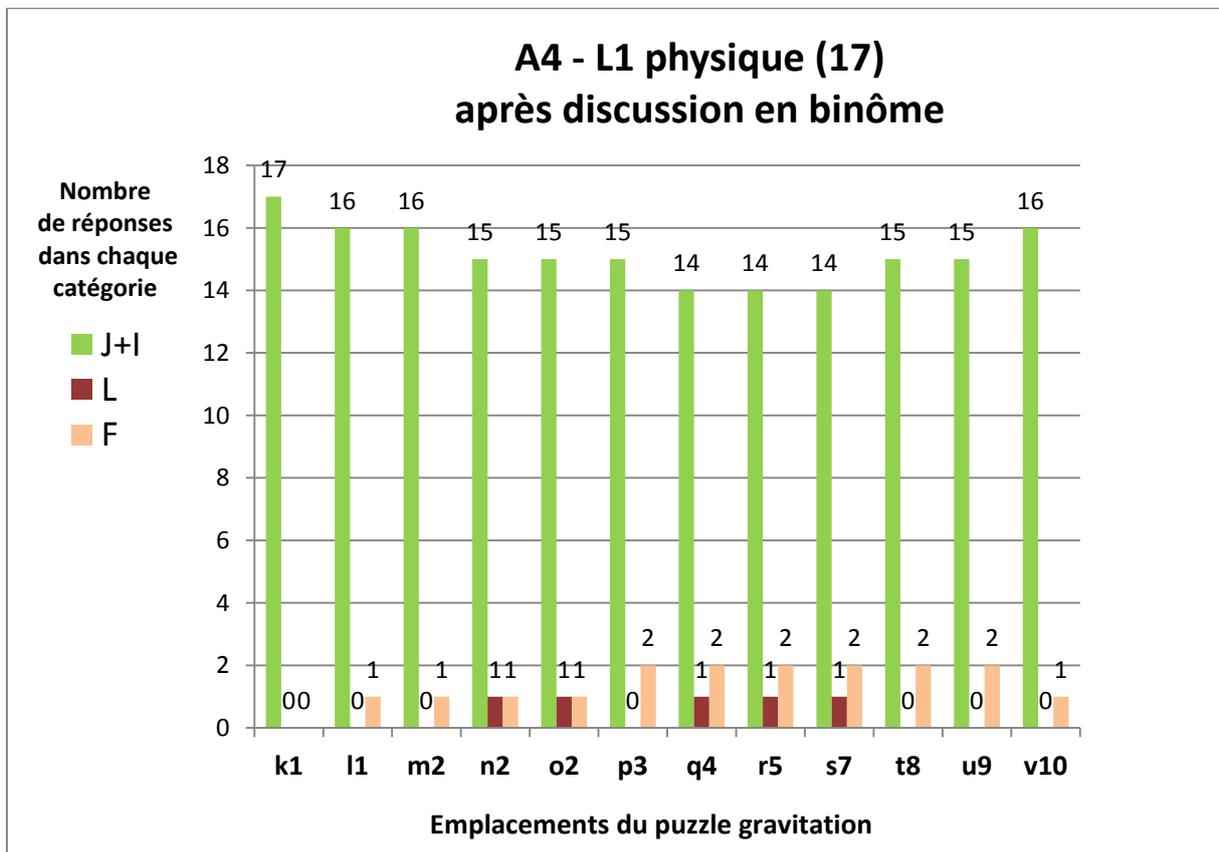
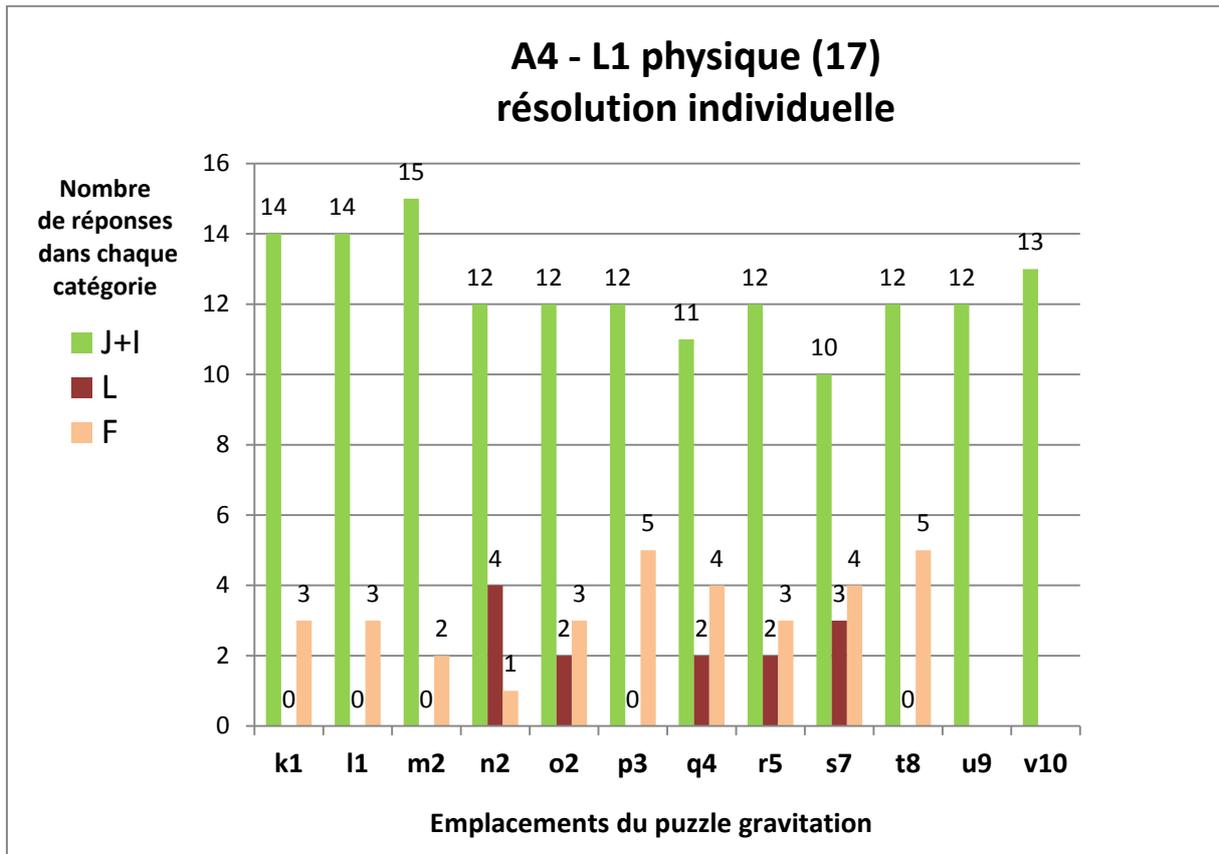
Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle



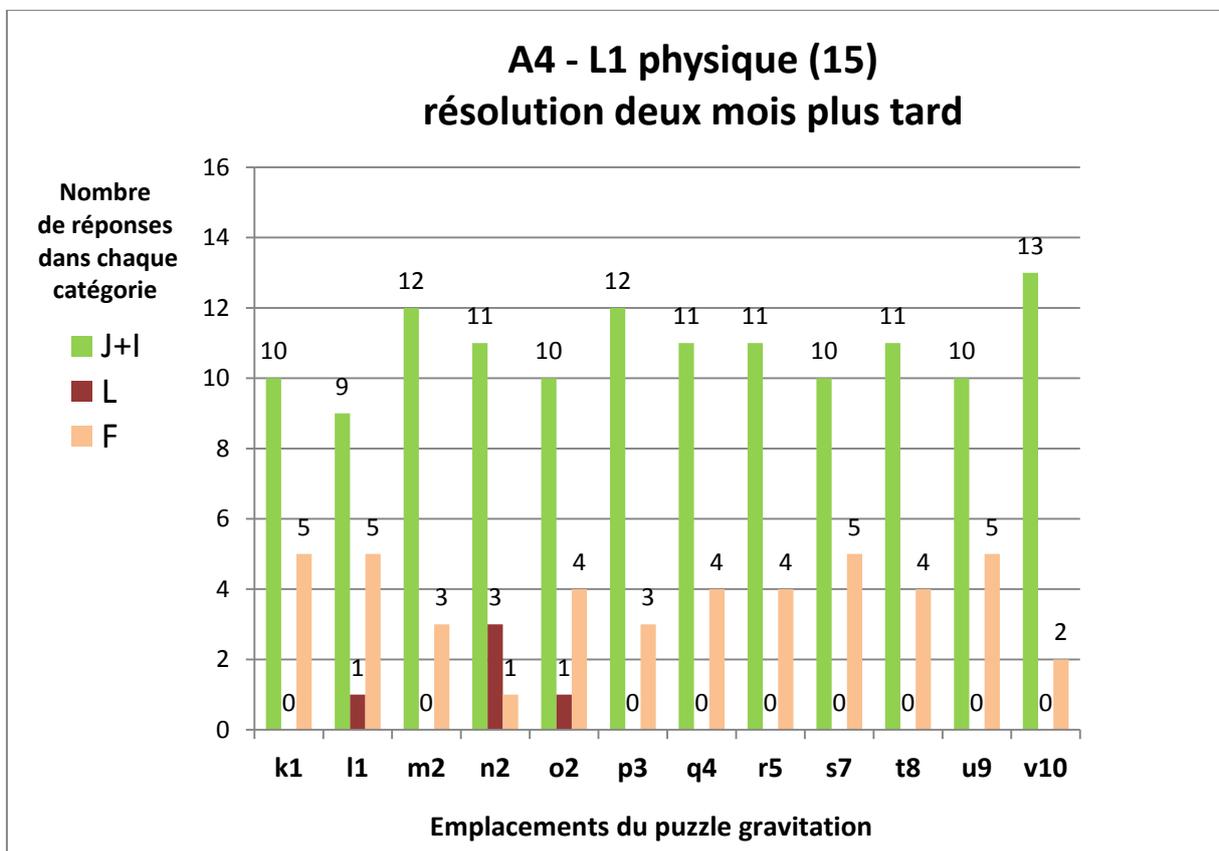
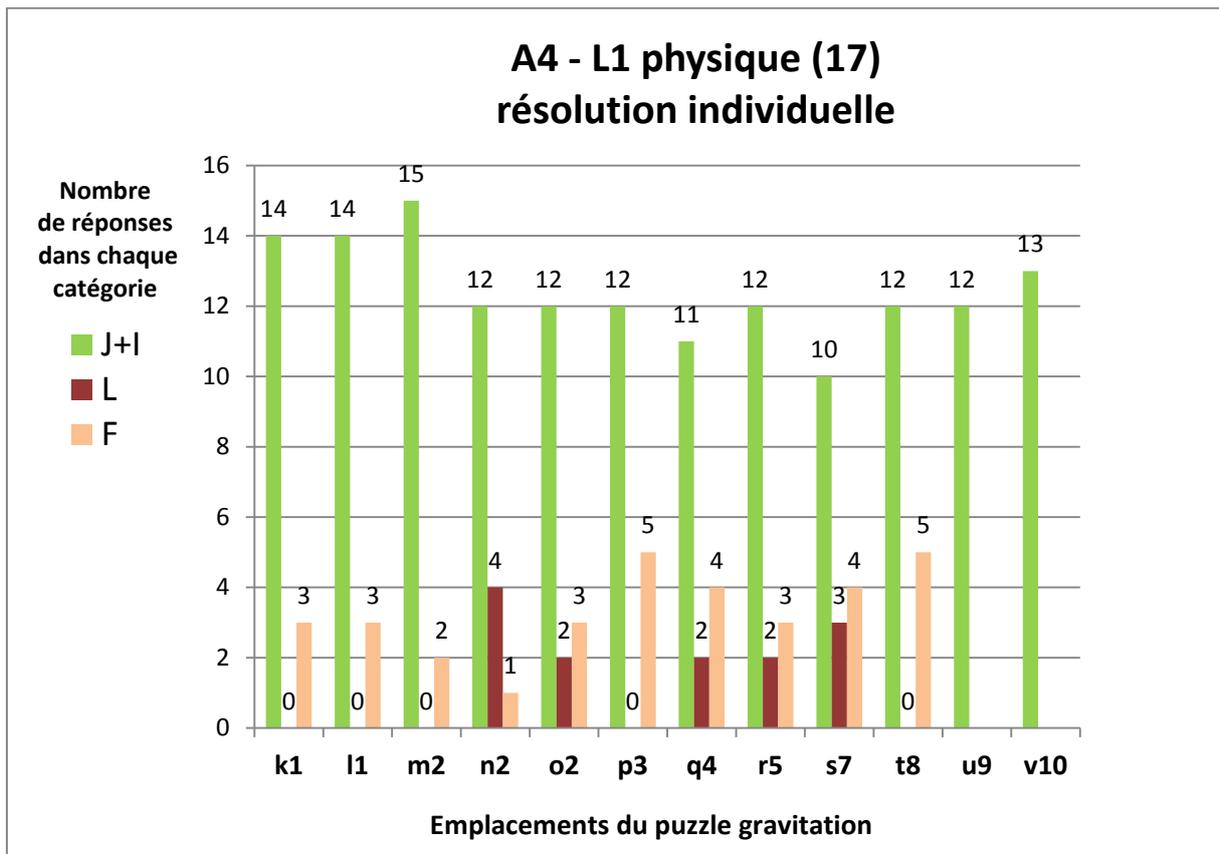
D6 – L1 physique (individuelle & groupe témoin)



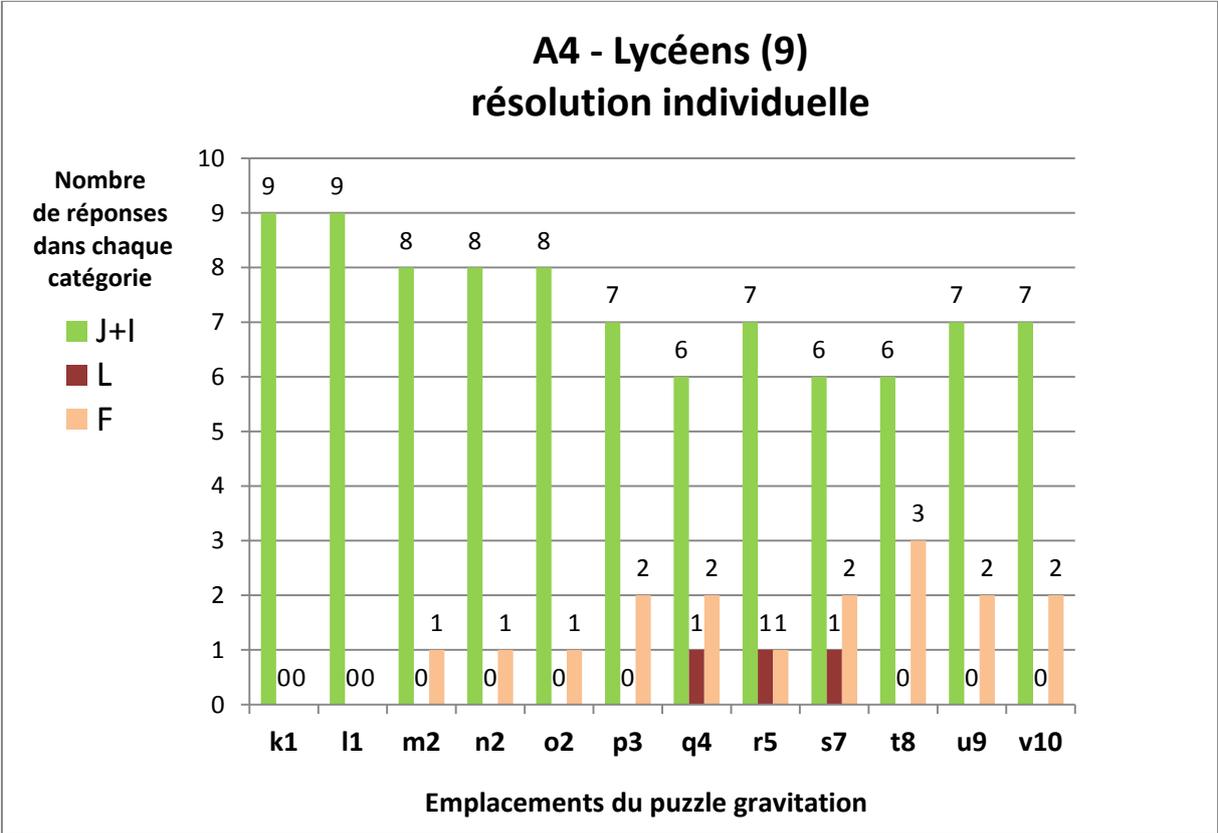
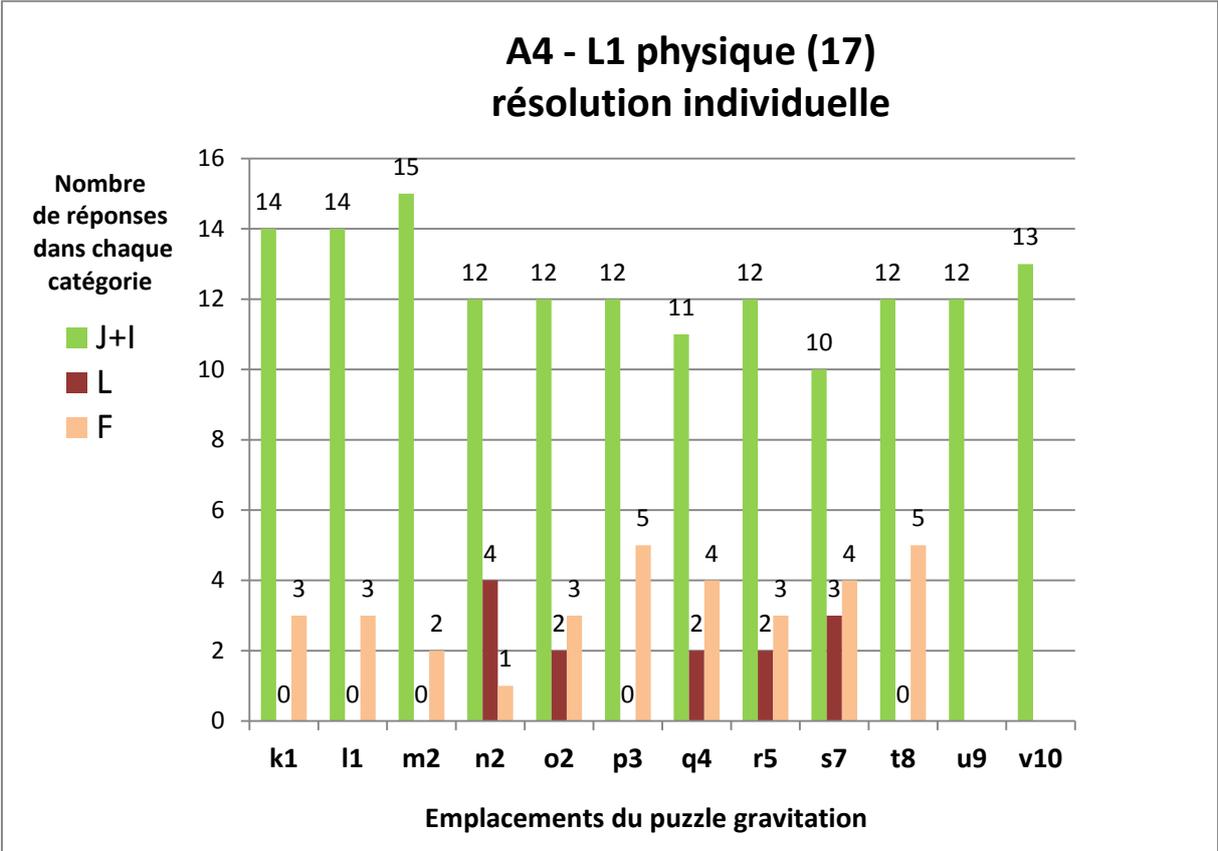
D7 – L1 physique (individuelle & après discussion)



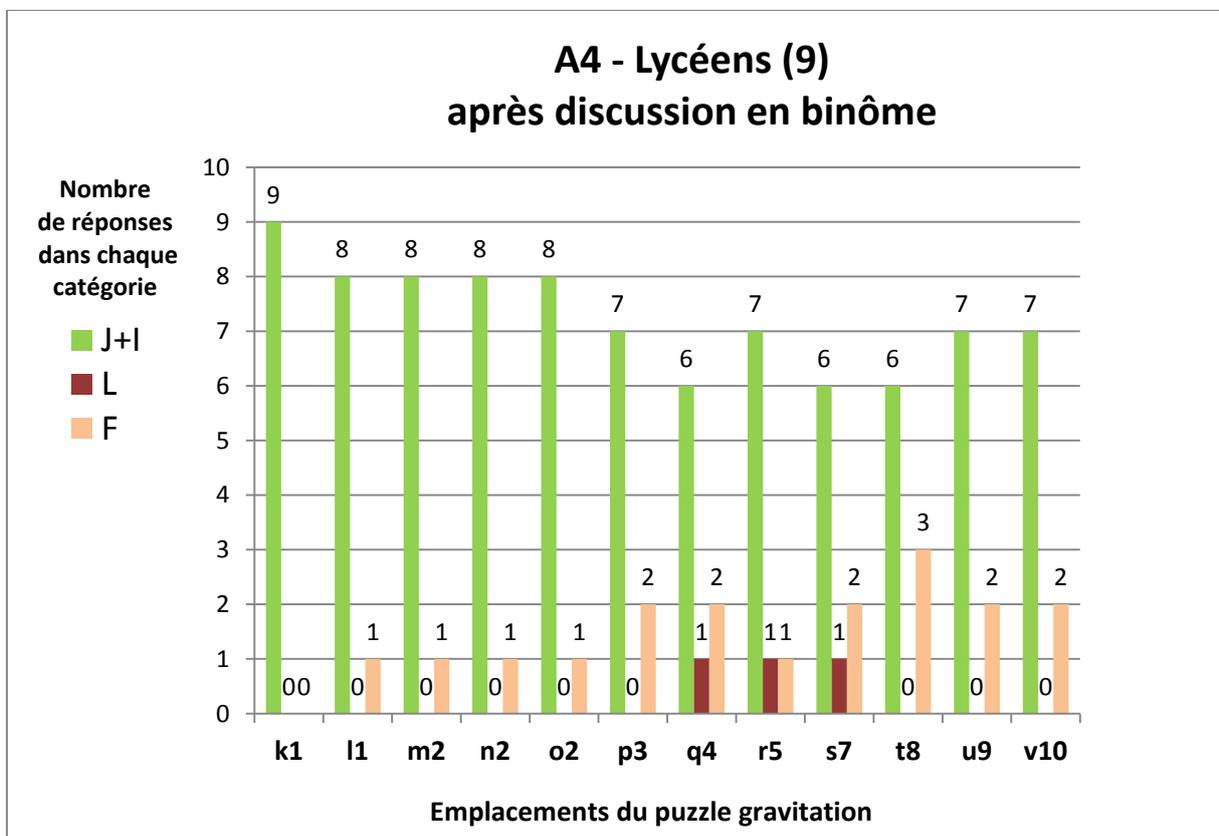
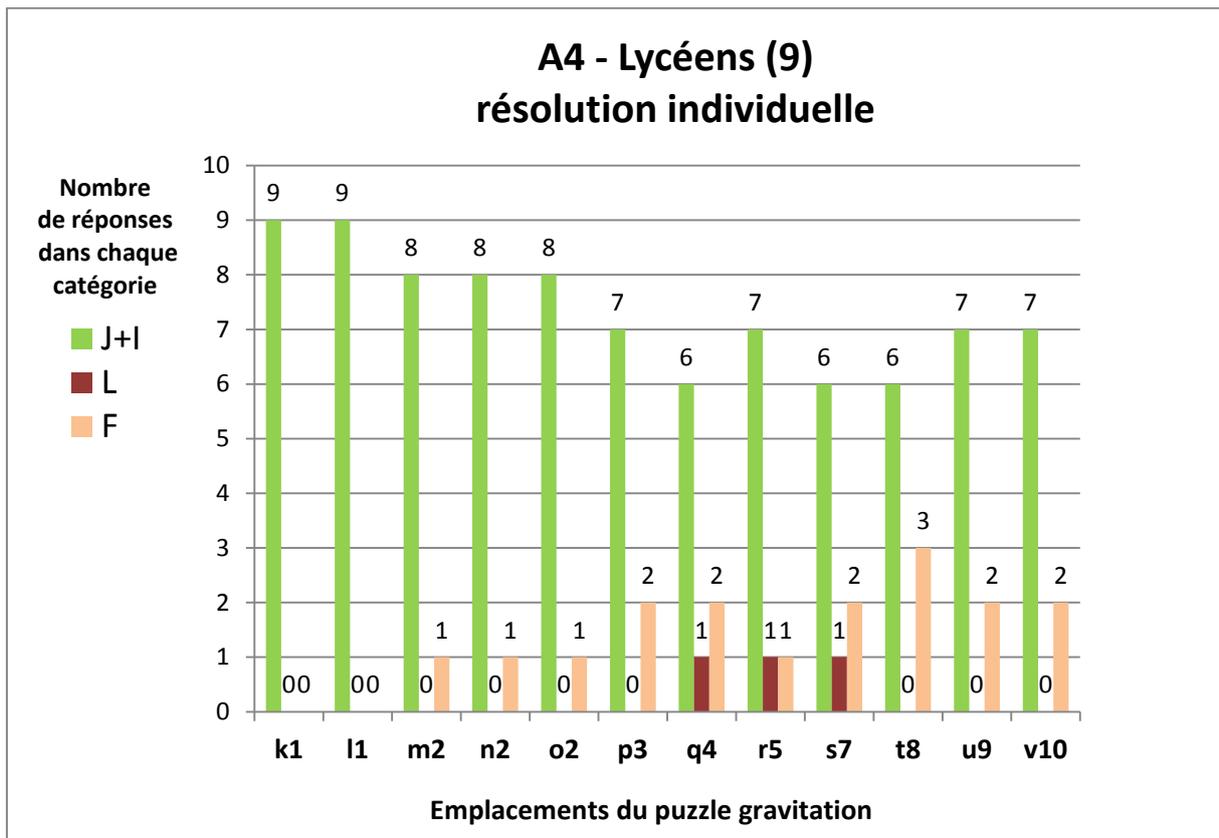
D8 – L1 physique (individuelle & deux mois plus tard)



D9 – L1 physique & Lycéens (individuelle)



D10 – Lycéens (individuelle & après discussion)



Annexe L

Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - Lycéens

Questions	<i>1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'était pas présent au stage l'état d'esprit global du cours d'aujourd'hui, quels aspects principaux évoquerais tu ?</i>	<i>2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et les autres cours de physiques que tu as eu (en Seconde, en Première ou en Terminale) ?</i>	<i>3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?</i>
Nihal (1S)	L'aspect théorique et activité. Il y a l'aspect théorique puis les activités qui viennent aider à la compréhension du cours.	C'est de démontrer comment nous obtenons les formules de gravitation , les recherches abordés sur les notions. Les différentes définitions de la force qu'on exploite pas en cours.	Oui beaucoup, cela m'a ouvert les yeux sur les notions abordés en cours mais de manière plus approfondie. Je trouve que commencer par le début aide l'élève à mieux cerner les exercices de physique

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'était pas présent au stage l'état d'esprit global du cours d'aujourd'hui, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et les autres cours de physiques que tu as eu (en Seconde, en Première ou en Terminale) ?	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Valentine (1S)	Ça change des cours standard et que malgré que cela soit un peu compliqué a première vue c'est finalement assez simple.	En cours, les cours sont moins poussés, c'est ce qui rend le stage intéressant.	Maintenant je sais pourquoi les planètes tournent autour du soleil.
Aissata (1S)	L'ambiance, activités pour mieux s'approprier le cours. De plus les activités on les faits après le cours et ca permet de réviser les cours en même temps. Le principe du diapo.	En cours, on nous présente des formules, on ne sait jamais trop d'où ça vient et nous ne pouvons aller plus loin (faute de temps), dans le cours présenté on nous présente différents point de vue pour arriver à une conclusion finale (qui peut être fausse), En somme on travail dans un état d'esprit plus ouvert, on tient compte de tout pour choisir l'essentiel.	Et bien, j'ai appris que rien n'est vraiment sur en physique, au cours du temps on peut modifier des notions. mais elle reste une matière exacte.

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'était pas présent au stage l'état d'esprit global du cours d'aujourd'hui, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et les autres cours de physiques que tu as eu (en Seconde, en Première ou en Terminale) ?	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Philippe (1S)	Vivant, interactif, raisonnement différent de ceux des cours, idem pour l'approche des cours.	L'approche historique	
Cyrille (1S)	c'était agréable, et passionnant, on avait envie d'écouter et de suivre.	Les profs avec une mentalité de "si tu n'as pas 20 tu as raté ta vie" je saurais pas dire autrement	Je me dit qu'il existe de bon prof de physique qui expliquent correctement et qui ne rabaisse pas.
Farah (1S)	Calme, facile a suivre et à comprendre.	Le nombre de personnes présentes, la présentation du cours.	C'est devenu plus intéressant d'aborder la physique comme ça.
Ilias (TS)	A part le fait que l'on aborde l'aspect historique, que la démarche qui amène a certaines conclusions est plus détaillée, le cours avait une structure a peu près classique comparé au cours "traditionnel" (absence d'exo d'application)	- On rentre beaucoup plus dans les détails qu'en cours. - Aspect historique - Chaque étape du raisonnement mathématique (calcul de g grâce a la lune) est mieux expliqué qu'en cours	Je ne voyais auparavant que les évènements, après qu'ils aient été découverts sans forcément m'intéresser à toute la démarche de la recherche. A présent j'ai une idée de ce que la recherche demande afin d'obtenir des conclusions convaincantes.

Annexe L Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - Lycéens

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'était pas présent au stage l'état d'esprit global du cours d'aujourd'hui, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et les autres cours de physiques que tu as eu (en Seconde, en Première ou en Terminale) ?	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Guillaume (TS)	L'histoire, notre définition de "force" l'étrange état de chute libre, l'accélération, les lois de newton, la construction de la formule $F=Gmm/r^2$	L'explication des origines, tant d'où vient cette formule ou cette pensée, comment a t-elle été construite.	Honnêtement, cela n'a rien changé j'aime la physique (même si je préfère la chimie) et je trouve cela fort intéressant. Je pense que c'est très important d'être capable de comprendre le monde qui nous entoure.
Paul (TS)	Une manière différente d'apprendre, plus pratique je trouve car on ne balance pas des formules que l'on doit admettre, on voit leur origine et cela facilite la compréhension.	La partie historique	

Annexe M

Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - L1 physique, deux mois plus tard

Questions	<i>1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?</i>	<i>2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.</i>	<i>3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?</i>
Alexandra	C'est une explication des notions liées au mouvement des objets	L'origine des notions est expliqué	Plutôt vis à vis de l'image que j'ai de l'enseignement de la physique.

Annexe M Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - L1 physique, deux mois plus tard

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Alexis	Introduire des concepts de base et des observations pour établir une démarche logique	Introduire des concepts de base et des observations pour établir une démarche logique	Oui, ne serai-ce que pour me mettre du point de vue des "scientifiques"(1ere partie du cours) de chaque époque et comprendre leur démarche : - 4 éléments a la base de tout - les différents modèles solaires.
Alice	L'esprit ancré dans l'histoire du cours qui permet une compréhension plus complète et rapide. Un cours plus interactif et menant à plus de questionnement et de réflexion à approfondir a posteriori	La description, des modèles utilisés comme abandonné ainsi que ce qui a mené à leur établissement. La synthèse et l'exercice sur l'appartement en apesanteur qui est un projet actuel finalisant le cours	J'aime la physique depuis longtemps, cependant si elle était très utile et en expansion jusqu'à la fin du 19ème siècle, aujourd'hui elle me parait sans issue et stagnante . Le cours m'a permis de retrouver un peu d'espoir en l'avenir de la physique.

Questions	<i>1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?</i>	<i>2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.</i>	<i>3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?</i>
Clara	explication des concepts physique par son histoire (cheminement des idées au cours de l'histoire pour en arriver aux concepts actuels)	L'aspect plus historique de ce cours, le diapo et les activités, moins d'exercices "type"	Il rend compte du temps et du travail effectués pour arriver à la physique moderne et montre qu'il en reste surement d'avantage.
Daïanah	Les exemples (chariots) pour expliquer la troisième et seconde loi de newton	La physique est liée à la vie et au lycée il n'y a pas assez d'exemples stupides et facile a retenir.	Non ça a juste confirmé ce que je pensais
Delphine	Le lien fait entre les planètes et le soleil, rapporté a la terre et a la lune. Plus la notion du concept de force relative a un mouvement naturel.	Le lien avec l'histoire, et pas juste la bio du découvreur final. Les avancées pas à pas avec les différentes personnes.	On comprend bien d'où viennent les formules

Annexe M Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - L1 physique, deux mois plus tard

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Éloïse	J'évoquerais que l'on découvre la physique sous un autre angle, c'est à dire qu'on peut mieux comprendre certains concepts ainsi que l'origine de ces concepts qui permettent de voir comment certaines choses fonctionnent.	En physique a la fac, on nous explique pas vraiment l'origine de certains concepts (ou très rapidement, voir c'est mal expliqué comme au lycée). Alors que si on comprends d'où est-ce que ça vient, et comment cela marche, on retient des formules plus facilement, par exemple. Quand on comprends on retient mieux.	Cela rends la physique encore plus intéressante que l'on ne le pense.
Justine	Les démarches logiques qui amènent aux lois de newton (puzzle)	Ce cours porte plus sur les manières d'arriver aux lois qu'au calcul.	La physique a paru plus logique ainsi qu'une matière a part entière et non une application concrète des mathématique.

Questions	<i>1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?</i>	<i>2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.</i>	<i>3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?</i>
Laviru	Apprendre d'où vient certaines formules qu'on utilise en physique, sans pour autant passer par des étapes compliquées, on a appris de façon ludique.	Dans le cours présenté, c'est plus facile à comprendre car il y a un peu d'histoire et pas trop de calcul alors qu'a la fac il y a beaucoup de calcul mais on comprend pas souvent pourquoi c'est comme ça et pas autrement. (ref hélium par exemple)	La physique se résume pas à une simple formule, il y a tout un travail derrière une formule qui paraît toute faite.
Maxime	Ce cours donne une dimension historique de la physique et fait un suivi chronologique des formules trouvées	On sait d'où vient la formule et comment s'orienter la pensée de son trouveur.	Oui, beaucoup, les notions de physique ne sont pas énoncées directement, mais expliquées et du coup nous permettent de mieux comprendre ce qui se passe. (intéressant d'intégrer ce cours au collège et au lycée)

Annexe M Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - L1 physique, deux mois plus tard

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Pierre	J'évoquerais les différentes théories proposées par les anciens scientifiques comme Galilée, Aristote et Newton. Je parlerais aussi des 3 lois de la dynamique et du mouvement des astres.	Pour les cours de l'université, on évoque pas trop les mouvements des astres, bien que c'est essentiel pour savoir l'univers qui nous entoure. Au lycée, on parlait pas du tout de ça, le cours était juste basé sur des formules qu'on expliquait pas d'où ça vient.	Oui ça m'a apporté des choses avec les différentes théories qui étaient proposées avant notre siècle. Aussi pour le mouvement des différentes planètes que j'avais pas très bien compris.

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Ramatoulaye	J'évoquerais la participation active de l'étudiant qui n'a pas seulement à écouter d'une façon passive au cours du prof. De plus j'ai bien aimé le fait de présenter d'une façon logique, étape par étape le cours plutôt que de balancer certaines notions. En générale, je pense qu'on a pas assez de temps pour bien approfondir certains sujets et cela est a base de "trous" qu'on a par rapport à ces idées la.	Le cours présenté était plus dynamique, dans les sens ou les étudiants participent d'une façon plus active au cours (travail en couple après le cours, puzzle, etc. . .) J'ai beaucoup apprécié le fait de tester juste après le cours théorique si on avait vraiment compris les notions importantes. En même temps on était pas beaucoup en salle mais je pense que cette façon de travailler peut s'appliquer aux TD	Généralement j'ai toujours bien aimé la physique mais je ne suis pas toujours satisfait de la façon dont elle est présentée. Le cours a été capable de bien mettre en évidence l'évolution historique (et donc logique) du sujet et m'a donc permis de l'assimiler d'une façon surtout plus claire et agréable.

Annexe M Réponses aux questionnaires sur la perception du cours - L1 physique, deux mois plus tard

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Riccardo	<p>a) Le concept de la force au sens de newton, les 3 lois de Newton</p> <p>b) La notion du "mouvement naturel" a travers le temps (dans l'histoire des pensées)</p> <p>c) l'explication de la force de gravitation (comment on obtient la formule $F=Gmm/r^2$)</p>	On donne plutôt des formules "brutes" et pas trop d'explication sur leurs origines	Oui, c'est plus intéressant de voir comment "la pensée physique" se construit (notamment, le changement de référentiel pour résolution des planètes (modèle de Tycho...)) De plus c'est très important de voir d'où viennent les formules.
Svetlana	L'étude des origines des lois et modèles pour mieux comprendre et "savoir d'où ça sort"	Peu ou pas d'étude de l'histoire des sciences au lycée, pas beaucoup plus cette année. En revanche, les cours de cette année s'appuyaient sur des études de phénomènes physiques individuels.	Il m'a permis de mieux m'approprier certains concepts après en avoir étudié leur origine. De plus, l'étude des démarches scientifiques satisfait la curiosité, et le puzzle sur celle ci mets en évidence les raisonnements nécessaires en physique.

Questions	1) Si tu devais expliquer à quelqu'un qui n'a pas vu ce cours l'état d'esprit global associée à la démarche suivie, quels aspects principaux évoquerais tu ?	2) Quelles sont pour toi les différences essentielles entre la façon d'aborder la physique dans le cours présenté et tes autres cours de physiques, au lycée ou cette année à l'université.	3) Penses-tu que ce cours t'ait apporté des choses vis-à-vis de l'image que tu avais de la physique ? Lesquelles ?
Werner	a) expliquer le concept de force. b) Montrer le cheminement qui nous a conduit à la formule de la gravitation universelle.	Le fait de démontrer la démarche qui a mené à l'obtention d'une théorie	Je ne crois pas que ce cours ait modifié mon image de la physique, mais je pense qu'il serait certainement plus accrocheur pour des élèves de lycée que les cours qui y sont actuellement dispensés.

Annexe N

Extrait de transcription du passage : « Pourquoi la lune ne tombe pas ? »

(Maxime - L1Phy - D&G3 - S2 (D3) - 1 :48 :30)

L0 – Mais en fait, est-ce que c'est un truc qu'on a besoin d'expliquer ?

L3.1 – Ben un peu quand même.

L0 – Regarde. Qu'est-ce que tu vois ? Tu vois que ça ne tombe pas.

L3.1 – Oui mais, vu qu'il y a l'accélération vers la Terre...

L0 – Oui mais regarde, qu'est-ce que tu vois ? Tu vois que ça ne tombe pas, enfin tu vois que ça tombe pas mais que ça tourne. Et tu te rends compte que quand ça tourne, tu as une accélération vers le bas.

L3.1 – Ouais.

L0 – Donc une accélération centripète n'implique absolument pas que c'est sensé tomber.

L3.1 – Ah ouais...

L0 - Puisque de fait, sans se poser de question, si t'as ton vecteur vitesse qui change, ton accélération elle est par là. Donc on a tout à fait le droit d'avoir une accélération par là et de ne pas tomber, tu vois ?

L3.1 – Donc en gros il n'y a pas une force qui va par-là, vers le haut ?

L0 – Non non.

[...]

L3.2 – Ça veut dire que la force de la vitesse initiale elle était, elle était vers l'extérieure alors ? La vitesse initiale. Mais si la vitesse initiale était vers l'intérieure de la terre ça tendrait à se rapprocher de la terre non ?

L0 – Ben la vitesse initiale on n'en sait trop rien en fait. Tu vois là on parle de truc, c'est vraiment de la spéculation, on n'a aucune idée de comment elle s'est formée, la lune et tout, il y a plein de théories ça dans les gens qui bossent en planéto. On n'a pas besoin de rentrer dans ces trucs, ça c'est de la physique des planètes de haut niveau en fait. Là, pour vraiment aller à l'essentiel, on n'a pas besoin de se poser ces questions.

L3.2 – Oui mais pour décrire que le mouvement il est circulaire uniforme, faut le justifier ?

L0 – Il est circulaire uniforme, de fait, tel qu'on l'observe depuis 2000 ans. On observe que la lune, par rapport au centre de la terre, elle tourne autour de nous. Au moins, depuis 2000 ans. Enfin non, depuis un peu moins de 2000 ans. Mais si tu veux, ça c'est important cette question parce que qu'est-ce qu'on a besoin de justifier ou démontrer ? On n'a pas besoin de justifier. C'est comme si on disait « mais faut justifier pourquoi ça tombe ». Non, ça tombe depuis toujours en fait. C'est juste comme ça. Après on l'interprète de différentes façons. Mais ici, le fait que c'est un mouvement de révolution, on l'associe, mathématiquement ça correspond à vecteur accélération dirigé vers le centre.

L3.1 – Oui mais, enfin ce que je voulais dire c'est est-ce qu'il y aurait une force qui la maintient justement sur cette orbite en fait ? Qui va vers le haut.

L0 – Ben non. Ça dépend comment tu définis la force. Mais si tu es avec Newton et que tu définis la force comme associée à l'accélération, là tu vas définir la force associée à celle-ci elle sera comme ça aussi, elle sera centripète.

L3.3 - En fait c'est le même cas que ce qu'on avait vu en début de chapitre avec euh, le mouvement du mobile. . .

L0 – Le mobile aéroporté ? Exactement. Pensez à ça. Le mobile qui tourne. Il n'y a qu'une force qui s'exerce dessus. Vous voyez il y a qu'une force, qui est dirigée vers l'intérieur.

L3.2 – Oui mais là pour que ça bouge, il faut qu'on donne une vitesse initiale dessus sinon il sera jamais en mouvement.

L0 – Oui pour le mettre en mouvement mais là nous, on ne peut pas parler de qui c'est qui a mis en mouvement la lune. Tu vois ? Donc là, on ne peut pas parler de ces choses-là. On peut juste parler du mouvement tel qu'il est, et il a un mouvement circulaire uniforme. Du coup, le seul truc dont on peut parler, c'est tel qu'on l'observe, il est comme ça, donc on sait qu'il a une accélération centripète, mathématiquement. Et donc si on définit la force à partir de l'accélération ben on peut dire qu'il y a une force centripète.

Bibliographie

- Alonso, M. and Finn, E. J. (2004). *Physique générale : cours et exercices corrigés. Mécanique et thermodynamique*. Dunod.
- Bachelard, G. (2004). *La formation de l'esprit scientifique contribution à une psychanalyse de la connaissance*. J. Vrin, Paris.
- Bächtold, M. (2012). Les fondements constructivistes de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation. *Tréma*, 38 :7–39.
- Benson, H. (1999). *Physique 1 : Mécanique*. De Boeck Université.
- Bigelow, J., Ellis, B., and Pargetter, R. (1988). Forces. *Philosophy of Science*, 55(4) :614–630.
- Bitbol, M. (1997). *Mécanique quantique : une introduction philosophique*. Flammarion, Paris.
- Bitbol, M. (1998). Le réel-en-soi, l'inconnaissable, et l'ineffable. *Annales d'Histoire et de Philosophie du Vivant*, 1 :143–152.
- Bitbol, M. (1999). *L'aveuglante proximité du réel*. Flammarion, flammarion edition.
- Bitbol, M. (2010). *De l'intérieur du monde : Pour une philosophie et une science des relations*. Flammarion, Paris.
- Bliss, J. and 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*, pages 120–133.
- Brossard, M. (2008). Concepts quotidiens/concepts scientifiques : réflexions sur une hypothèse de travail. *Carrefours de l'éducation*, (2) :67–82.
- Carson, R. and Rowlands, S. (2005). Mechanics as the logical point of entry for the enculturation into scientific thinking. *Science & Education*, 14(3-5) :473–492.

- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1) :66.
- Clement, J. (1987). The Use of Analogies and Anchoring Intuitions to Remediate Misconceptions in Mechanics. In *Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association*.
- Coelho, R. L. (2010). On the concept of force : How understanding its history can improve physics teaching. *Science & education*, 19(1) :91–113.
- Coelho, R. L. (2011). Conceptual problems in the foundations of mechanics. *Science & Education*, pages 1–20.
- Darrigol, O. (2007). On the necessary truth of the laws of classical mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(4) :757–800.
- Davidson, D. (1984). *Inquiries Into Truth And Interpretation*. Number 233. Oxford University Press.
- Davidson, D. (1995). Laws and Cause. *Dialectica*, 49(2-4) :263–79.
- Deleuze, G. (1980). Spinoza - cours enregistré à l'université de Vincennes, Saint Denis.
- 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*, 21(6) :853–879.
- DiSessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. In Forman, G. and Pufall, P., editors, *Constructivism in the computer age*, pages 49–70. Lawrence Erlbaum.
- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11(5) :481–490.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Scott, P., and Mortimer, E. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational researcher*, 23(7) :5–12.
- Duhem, P. A. d. t. (1906). *Études sur Léonard de Vinci*. Éditions des Archives contemporaines (Paris).
- Duit, D. R., Komorek, M., and Wilbers, J. (1997). Studies on educational reconstruction of chaos theory. *Research in Science Education*, 27(3) :339–357.
- Duit, R. (2007). Science education research internationally : Conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(1) :3–15.

- Duschl, R., Maeng, S., and Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences : a review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2) :123–182.
- Earman, J. and Friedman, M. (1973). The Meaning and Status of Newton's Law of Inertia and the Nature of Gravitational Forces. *Philosophy of Science*, 40(3) :329–359.
- Ellis, B. (1965). The Origin and Nature of Newton's Laws of Motion. In *Beyond the edge of certainty : essays in contemporary science of philosophy*, number 2 in University of Pittsburgh series in the philosophy of science. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Etats-Unis.
- Ellis, B. (1976). The existence of forces. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 7(2) :171–185.
- Espagnat, B. d. (1981). *A la recherche du réel : le regard d'un physicien*. Gauthier-Villars, Paris.
- Favre, D. (2010). *Comment cesser de démotiver les élèves ? : 18 clés pour mieux apprendre*. Dunod.
- Feyerabend, P. (1979). *Contre la methode : esquisse d'une theorie anarchiste de la connaissance*. Seuil, Paris, seuil edition.
- Galili, I. (1995a). Interpretation of students' understanding of the concept of weightlessness. *Research in Science Education*, 25(1) :51–74.
- Galili, I. (1995b). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3) :371–387.
- Garreta, G. (2002). D'un empirisme sans entraves à une science sans lois : L'agnosticisme épistémologique de Bas van Fraassen. *Critique*, 58(661-62) :501–516.
- Giancoli, D. C. (1993). *Physique générale : Mécanique et thermodynamique*. De Boeck Supérieur.
- Gilbert, J. K., Osborne, R., and Watts, D. M. (1982). Students' Conceptions of Ideas in Mechanics. *Physics Education*, 17(2) :62–66.
- Gohau, G. (1977). Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences. In *La découverte scientifique : aspects logique, psychologique, culturel et social*, pages 49–70, Erice (Sicile). M. D. Grmed & V. Cappelletti.
- Halbwachs, F. (1973). L'histoire de l'explication en Physique. In *L'Explication dans les Sciences*, pages 72–102. Flammarion, Paris.

- Halloun, I. A. and Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American journal of physics*, 53(11) :1056–1065.
- Hammer, D. and Elby, A. (2003). Tapping epistemological resources for learning physics. *The Journal of the Learning Sciences*, 12(1) :53–90.
- Hanson, N. R. (1965). A response to Ellis's conception of first law. In *Beyond the edge of certainty : essays in contemporary science of philosophy*, number 2 in University of Pittsburgh series in the philosophy of science. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Etats-Unis.
- Hecht, E. (2003). *Physique*. De Boeck ; ITP, Bruxelles ; [New-York].
- Hecht, E. (2006). There is no really good definition of mass. *The Physic Teacher*, 44 :40–45.
- Hempel, C. G. and Oppenheim, P. (1948). Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of science*, 15(2) :135.
- Hertz, H. (1900). *The Principles of Mechanics : Presented in a New Form*. Courier Dover Publications.
- Hesse, M. B. (1961). *Forces and fields : the concept of action at a distance in the history of physics*. T. Nelson.
- Hestenes, D. (1992). Modeling games in the Newtonian world. *American Journal of Physics*, 60(8) :732–748.
- Hosson, C. D. (2004). *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences. Elaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation*. PhD thesis, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Hosson, C. D. (2011). L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique. Technical report, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Hosson, d. C. and Schneeberger, P. (2011). Orientations récentes du dialogue entre recherche en didactique et histoire des sciences. *Recherches en Didactique des Sciences et de la Technologie*, 3.
- Hunt, I. E. and Suchting, W. A. (1969). Force and "Natural Motion". *Philosophy of Science*, 36(3) :233–251.
- Jammer, M. (1957). *Concepts of Force : a study in the foundations of dynamics*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

- Jammer, M. (1997). *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. Courier Dover Publications.
- Johsua, S. and Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. PUF, Paris.
- Kavanagh, C. and Sneider, C. (2006a). Learning about Gravity I. Free Fall : A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2) :21–52.
- Kavanagh, C. and Sneider, C. (2006b). Learning about Gravity II. Trajectories and Orbits : A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2) :53–102.
- Kittel, C., Knight, W., Ruderman, M., and Lallemand, P. (2001). *Mécanique-Volume 1 : Berkeley : cours de physique*. Broché. Dunod.
- Klaassen, K. (1995). *A problem-posing approach to teaching the topic of radioactivity*. Utrecht, cd-b press edition.
- Klaassen, K. (2005). The Concept of Force as a Constitutive Element of Understanding the World. In Boersma, K., Goedhart, M., Jong, O. d., and Eijkelhof, H., editors, *Research and the Quality of Science Education*, pages 447–457. Springer Netherlands.
- Koyré, A. (1968). *Études newtoniennes*. Gallimard.
- Launer, D. (2014). Impesanteur et gravité, le casse-tête pédagogique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 108(963) :591–617.
- Leach, J. and Scott, P. (2002). Designing and Evaluating Science Teaching Sequences : An Approach Drawing upon the Concept of Learning Demand and a Social Constructivist Perspective on Learning. *Studies in Science Education*, 38(1) :115–142.
- Lhoste, Y. (2014). *Langage, enseignement et appropriation de savoirs problématisés en sciences de la vie et de la terre. Un modèle de structuration des contextes. Recherche complémentaire pour l'HDR en sciences de l'éducation (tome 4)*.
- Lijnse, P. (1994). La recherche-développement une voie vers une "structure didactique" de la physique empiriquement fondée. *Didaskalia*, 1(3) :93–108.
- Lijnse, P. and Klaassen, K. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching–learning sequences? *International Journal of Science Education*, 26(5) :537–554.
- Lindemann, r. (1999). *Mécanique : une introduction par l'histoire de l'astronomie*. De Boeck Université, Bruxelles.

- Louca, L., Elby, A., Hammer, D., and Kagey, T. (2004). Epistemological resources : Applying a new epistemological framework to science instruction. *Educational Psychologist*, 39(1) :57–68.
- Mach, E. (1885). Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt. *Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger*, 19 :232–235.
- Maron, V. (2012). Conception, réalisation et analyse d’une séance d’enseignement sur la théorie de la gravitation de Newton. Technical report, Université Paris Diderot, Paris.
- Maron, V. and Colin, P. (2014). Force et mouvement naturel : une reconstruction didactique de l’introduction à la dynamique utilisant la relativité historique. In *Actes des 8ème rencontres scientifiques Marseille 2014*, volume 18, pages 367–377, Marseille. SKHOLÊ.
- Matthews, M. R., editor (2014). *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- McCloskey, M. (1983). Naive theories of motion. *Mental models*, pages 299–324.
- Mildenhall, P. T. (1998). *Mental models of force and motion in 11 to 18 years old*. PhD thesis, The University of Manchester.
- Minstrell, J. (1982). Explaining the ”at rest” condition of an object. *The Physics Teacher*, 20(1) :10.
- Mäntylä, T. (2011). Didactical reconstructions for organizing knowledge in physics teacher education.
- Morge, L. and Doly, A.-M. (2013). L’enseignement de notion de modèle : quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité? *Spirale*, 52 :149–175.
- Morin, E. (1996). Pour une réforme de la pensée. In *Les Entretiens Nathan*. Alain Bentolila, nathan edition.
- Nersessian, N. (1992). Constructing and instructing : The role of “abstraction techniques” in creating and learning physics. In *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice*, pages 48–68. State university of new york press edition.
- Nersessian, N. J. (1989). Conceptual change in science and in science education. *Synthese*, 80(1) :163–183.
- Newton, I. (2005). *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Dunod.

- Ogborn, J. (1997). Constructivist Metaphors of Learning Science. *Science & Education*, 6(1-2) :121–133.
- Ogborn, J., Gunther, K., Isabel, M., and Kieran, M. (1996). *Explaining Science In The Classroom*. McGraw-Hill International.
- Orange, C. (2002). Apprentissages scientifiques et problématisation. *Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, (1) :25–42.
- Penot, J. P. and Teyssandier, P. (1983). De la pesanteur à la gravitation. *Espace Information, bulletin périodique d'information et d'éducation spatiales*, (25) :1–27.
- Poincaré, H. (1897). Les idées de Hertz sur la mécanique. *Revue générale des sciences*, 8 :734–743.
- Poincaré, H. (1902). *La Science et l'Hypothèse*. Flammarion.
- Poincaré, H. (1905). *La Valeur de la Science*. Flammarion, Paris.
- Popper, K. (1999). *La connaissance objective*. Flammarion, Paris.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., and Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2) :211–227.
- Robardet, G. (1995). Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique. *Didaskalia*, 7.
- Rowlands, S., Graham, T., and Berry, J. (1999). Can we Speak of Alternative Frameworks and Conceptual Change in Mechanics? *Science & Education*, 8(3) :241–271.
- Saltiel, E. and Viennot, L. (1985). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students? Utrecht.
- Séguin, M., Descheneau, J., and Tardif, B. (2010). *Physique XXI : Tome A, Mécanique*. De Boeck, Bruxelles.
- Shen, J. and Confrey, J. (2010). Justifying Alternative Models in Learning Astronomy : A study of K–8 science teachers' understanding of frames of reference. *International Journal of Science Education*, 32(1) :1–29.
- Tiberghien, A., Vince, J., and Gaidioz, P. (2009). Design Based Research, Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, 31(17) :2275–2314.
- Toulmin, S. (1963). *Foresight and understanding : an enquiry into the aims of science*. Harper & Row.

- Toulmin, S. E. (1973). *L'explication scientifique*. Colin, Paris.
- Vaneigem, R. (1967). *Traité de savoir-vivre à l'usage des jeunes générations*. Gallimard, Paris.
- Vaneigem, R. (2010). *De l'amour*. Le Cherche Midi, Paris.
- Viennot, L. (1977). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. PhD thesis.
- Viennot, L. (1978). Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. *Revue française de pédagogie*, (45) :16–24.
- Viennot, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Hermann, Paris.
- Viennot, L. (1985). Analysing students' reasoning in science : A pragmatic view of theoretical problems. *European Journal of Science Education*, 7(2) :151–162.
- Viennot, L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, (1).
- Viennot, L. (1996). *Raisonner en physique. La Part du sens commun*. De Boeck.
- Viennot, L. (1999). Design and evaluation of a research-based teaching sequence : the superposition of electric field. *International Journal of Science Education*, 21(1) :1–16.
- Viennot, L. (2002). *Enseigner la physique*. De Boeck.
- Viennot, L. (2009). Learning and conceptual understanding : beyond simplistic ideas, what have we learned? *Physics education : Recent developments in the interaction between research and teaching*.
- Vigoureux, J.-M. (2003). *Les pommes de Newton*. Albin Michel, Paris.
- Vosniadou, S. (2009). *International handbook of research on conceptual change*. Routledge.
- Vosniadou, S., Vamvakoussi, X., Skopeliti, I., and Vosniadou, S. (2008). The framework theory approach to the problem of conceptual change. *International handbook of research on conceptual change*, pages 3–34.
- Wang, F. and Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4) :5–23.
- Weil-Barais, A. and Lemeignan, G. (1993). *Construire des concepts en physique : L'enseignement de la mécanique*. Hachette.

- Westfall, R. S. (1971). *Force in Newton's physics : the science of dynamics in the seventeenth century*. Macdonald and Co.
- Westra, A. S. (2006). *A new approach to teaching and learning mechanics*. PhD thesis, University Utrecht, The Netherlands.
- Wheeler, J. A. and Ford, K. W. (2000). *Geons, black holes, and quantum foam : a life in physics*. Norton, New York.
- Williamson, K. E. and Willoughby, S. (2012). Student Understanding of Gravity in Introductory College Astronomy. *Astronomy Education Review*, 11(1) :010105.
- Wittgenstein, L. (1921). *Tractatus logico-philosophicus*. Dover Publications, Mineola, N Y.

TITRE :**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

AUTEUR :

Valentin Maron

RESUME :

Ce travail propose une approche d'enseignement de la théorie newtonienne. L'une des intentions centrales est de justifier les concepts et formules qui la constituent, via un cheminement progressif permettant de les reconstruire.

En particulier est visée la notion d'attraction terrestre, très souvent admise, bien qu'elle ne soit pas évidente par elle-même. L'interprétation de la chute libre comme un mouvement naturel - dans l'Antiquité et encore chez Galilée - est utilisée pour questionner la définition du concept newtonien de force.

Il s'agit de mettre en évidence sa dépendance à un mouvement naturel de référence, redéfini par la première loi du mouvement, justifiant ainsi son lien à l'accélération.

Cette formulation a pour but d'insister sur la définition spécifique du concept dans la théorie, afin de favoriser sa distinction des idées du sens commun sur les forces et le mouvement. D'autre part, une explicitation du raisonnement menant à relier la révolution des planètes, de la Lune, et la chute sur Terre - inspiré du cheminement de Newton - permet de justifier que la force associée à l'accélération de chute soit liée à la présence de la Terre.

Elle permet de plus d'aboutir à l'idée d'attraction universelle, ainsi qu'à la formule de la force qui la quantifie. Au niveau épistémologique, le cheminement menant à relier ces différents phénomènes permet de mettre en avant le rôle d'unification d'une théorie physique. Une séquence d'enseignement a été développée sur la base de cette approche et expérimentée avec des élèves de lycée et des étudiants en première année à l'université. L'un des résultats majeurs obtenus est un intérêt très marqué pour la démarche de justification des définitions et formules.

MOTS- CLES :

Didactique, Mécanique, Dynamique, Gravitation, Histoire des sciences, Épistémologie, Séquence d'enseignement

Éditeur: IREM de Paris

Responsable de la publication: F. Vandebrouck

IREM de Paris 7 – Case 7018

Université Paris Diderot

75205 Paris cedex 13

Dépôt légal : 2016

ISBN : 978-2-86612-373-4