

Université de Montréal

**Effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de
changement conceptuel en sciences**

par

Steve Masson

Département de didactique

Faculté des sciences de l'éducation

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès arts (M. A.)
en sciences de l'éducation,
option didactique

Mars, 2005

© Steve Masson, 2005



LB

5

057

2005

v. 026

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :
**Effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de
changement conceptuel en sciences**

présenté par :
Steve Masson

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Marcel Thouin
président-rapporteur

Jesús Vázquez-Abad
codirecteur de recherche

Marie-Françoise Legendre
codirectrice de recherche

Patrice Potvin
membre du jury

Résumé

S'inspirant à la fois des recherches sur le rôle de l'histoire et de la philosophie des sciences (HPS) en enseignement des sciences (Matthews, 1994) et des études sur les processus de changement conceptuel (diSessa, 1993), cette recherche étudie les effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel reliés à l'apprentissage du principe d'inertie chez les élèves de cinquième année de l'enseignement primaire.

Les micromondes historiques sont des environnements informatisés interactifs permettant de tester instantanément des hypothèses en coordonnant des paramètres comme la force, la masse, la gravité et le frottement. Ces micromondes sont dits *historiques*, parce qu'ils ont été élaborés à partir de l'histoire des sciences. Trois micromondes ont été utilisés lors de cette étude : un micromonde aristotélien respectant la théorie du mouvement d'Aristote, un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus et un dernier respectant les lois du mouvement de Newton.

Grâce à des entretiens d'explicitation avec six élèves de la cinquième année de l'enseignement primaire, cette étude rapporte de nombreux effets découlant de l'utilisation de ces micromondes historiques. Parmi les effets observés, la remise en question de l'idée que tous les objets en mouvement finissent par s'arrêter et surtout l'augmentation graduelle de la prise en compte du contexte dans l'élaboration de modèles explicatifs sont parmi les plus susceptibles de favoriser les processus de changement conceptuel reliés à la notion d'inertie.

Mots clés : histoire des sciences, changement conceptuel, p-prim, mécanique, inertie, enseignement des sciences au primaire, culture scientifique, constructivisme, micromonde.

Abstract

Based both on research concerning the role of history and philosophy of science (HPS) in science education (Matthews, 1994) and studies regarding conceptual change (diSessa, 1993), this study examines the effects of using historical microworlds on conceptual change related to the learning of the Principle of Inertia among students in grade-5 elementary school.

Historical microworlds are computerized interactive environments that enable one to immediately test hypotheses by coordinating parameters such as force, mass, gravity and friction. These microworlds are *historical* because they are based on the history of science. Three microworlds are used in this study: one that respects Aristotle's motion theory, another one inspired by the impetus theory and a third one respecting Newton's laws of motion.

After interviewing six grade-5 students, this study draws to attention many effects of the use of these historical microworlds. Among these effects, questioning the idea that any object in motion will eventually stop and, above all, gradually increasing the importance of the context in the elaboration of explanatory models are among the most capable of contributing to the conceptual change related to the Principle of Inertia.

Keywords: history of science, conceptual change, p-prim, mechanics, inertia, science education in elementary school, science literacy, constructivism, microworld.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS	X
INTRODUCTION	1
PROBLÉMATIQUE	4
1. LE PROBLÈME DU CHANGEMENT CONCEPTUEL	5
2. LE RÔLE DE L'HISTOIRE DES SCIENCES DANS LES PROCESUS DE CHANGEMENT CONCEPTUEL	8
3. LES MICROMONDES HISTORIQUES COMME OUTIL POUR FAVORISER LE CHANGEMENT CONCEPTUEL	13
CADRE CONCEPTUEL.....	17
1. LES MODÈLES DU CHANGEMENT CONCEPTUEL	19
1.1 <i>Modèles visant la rupture conceptuelle</i>	21
1.2 <i>Modèle de diSessa visant la continuité conceptuelle</i>	37
1.3 <i>Comparaison entre les modèles de Vosniadou et diSessa</i>	45
2. LES ÉLÉMENTS HISTORIQUES RELIÉS AU DÉVELOPPEMENT DU PRINCIPE D'INERTIE.....	49
2.1 <i>La mécanique aristotélicienne</i>	49
2.2 <i>Vers la mécanique newtonienne</i>	59
2.3 <i>Les éléments à retenir pour l'élaboration des micromondes</i>	68
3. LES QUESTIONS DE RECHERCHE.....	72
CADRE MÉTHODOLOGIQUE	73
1. LES SUJETS.....	74
2. LES MICROMONDES HISTORIQUES	74
2.1 <i>Situations relevant de la mécanique aristotélicienne</i>	75
2.2 <i>Situation relevant de la théorie de l'impétus</i>	78
2.3 <i>Situations relevant de la mécanique newtonienne</i>	80
3. LES ENTREVUES ET LA COLLECTE DES DONNÉES	82
4. L'ANALYSE.....	86
ANALYSE ET INTERPRÉTATION.....	88
1. EFFETS DE L'UTILISATION D'UN MICROMONDE ARISTOTÉLICIEN	89
1.1 <i>Activation de la p-prim d'atténuation (« dying away »)</i>	89
1.2 <i>Activation de la p-prim d'Ohm</i>	92
1.3 <i>Activation de la p-prim d'annulation et de la p-prim de dépassement lorsque la p-prim d'Ohm n'arrive pas à expliquer un phénomène</i>	99

2. EFFETS DE L'UTILISATION D'UN MICROMONDE INSPIRÉ DE LA THÉORIE DE L'IMPÉTUS	103
2.1 <i>Remise en question souvent hésitante de l'utilisation de la p-prim d'atténuation au profit du principe d'inertie</i>	104
2.2 <i>Remise en question de l'idée que la masse cause toujours une résistance au mouvement et incompréhension devant l'idée que la masse peut aider la continuation du mouvement</i>	108
3. EFFETS DE L'UTILISATION D'UN MICROMONDE NEWTONIEN	111
3.1 <i>Instabilité dans l'utilisation de la p-prim d'atténuation et du principe d'inertie</i>	112
3.2 <i>Complexification et contextualisation des critères de validité de la p-prim d'atténuation</i>	115
4. EFFETS DE LA RÉUTILISATION DES MICROMONDES SUITE À UNE PREMIÈRE EXPLORATION	118
4.1 <i>Stabilisation relative de l'utilisation du principe d'inertie</i>	118
4.2 <i>Augmentation du degré de priorité d'appel de la notion de frottement</i>	120
5. RÉPONSES AUX QUESTIONS DE RECHERCHE	123
5.1 <i>Les situations permettent-elles l'activation de p-prim? Si oui, comment les élèves les utilisent-ils?</i>	123
5.2 <i>Quelles sont les priorités d'appel et de «reliabilité» des p-prim utilisées?</i>	125
5.3 <i>Les situations permettent-elles aux élèves de remettre en question l'utilisation de leurs p-prim?</i>	127
5.4 <i>Est-ce que le parcours des élèves à travers les micromondes permet d'organiser et de systématiser leur utilisation des p-prim?</i>	127
CONCLUSION	128
BIBLIOGRAPHIE	132
ANNEXES	138
ANNEXE 1 : EXTRAITS DES ENTREVUES AVEC CAMILLE	139
ANNEXE 2 : EXTRAITS DES ENTREVUES AVEC VINCENT	163

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CORRESPONDANCE ENTRE LES CONCEPTIONS INTUITIVES ET LES CONCEPTIONS HISTORIQUES EN MÉCANIQUE SELON SEQUIERA ET LEITE (1991).....	9
TABLEAU 2 : QUELQUES ÉLÉMENTS DU CADRE THÉORIQUE NAÏF ET DE LA THÉORIE SPÉCIFIQUE CONCERNANT LE CONCEPT DE FORCE	33
TABLEAU 3 : COMPARAISON ENTRE LES MODÈLES DE VOSNIADOU ET DI SESSA	45
TABLEAU 4 : CONCEPTIONS ARISTOTÉLICIENNES DU MOUVEMENT	57
TABLEAU 5 : POSTULATS À L'ORIGINE DES CONCEPTIONS DU MOUVEMENT D'ARISTOTE	59
TABLEAU 6 : COMPARAISON ENTRE LA MÉCANIQUE ARISTOTÉLICIENNE ET LA MÉCANIQUE NEWTONNIENNE	69
TABLEAU 7 : LISTE DES MICROMONDES INSPIRÉS DE L'HISTOIRE DE LA MÉCANIQUE	71
TABLEAU 8: EFFETS DE L'UTILISATION DE MICROMONDES HISTORIQUES.....	123
TABLEAU 9: P-PRIMS ACTIVÉES LORS DE L'UTILISATION DES MICROMONDES HISTORIQUES	124
TABLEAU 10: ÉTAPES DE L'ÉVOLUTION CONCEPTUELLE OBSERVÉE AU COURS DE L'EXPLORATION DES MICROMONDES HISTORIQUES.....	130

Liste des figures

FIGURE 1 : STRUCTURE DU CADRE CONCEPTUEL.....	18
FIGURE 2 : LES RÉVOLUTIONS SCIENTIFIQUES SELON KUHN	24
FIGURE 3 : STRUCTURE DE LA P-PRIM D'OHM	40
FIGURE 4 : JUSTIFICATION DU PRINCIPE DE REPOS SELON ARISTOTE	51
FIGURE 5 : EXPÉRIENCE SUR L'INERTIE DE GALILÉE.....	66
FIGURE 6 : SITUATION 1	77
FIGURE 7 : SITUATION 2	78
FIGURE 8 : SITUATION 3	79
FIGURE 9 : SITUATION 4	81
FIGURE 10 : SITUATION 5	82
FIGURE 11: PRIORITÉS D'APPEL ET DE « RELIABILITÉ » RELIÉES À L'UTILISATION DE MICROMONDES HISTORIQUES.....	126

À ma fille Laurie-Anne

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mes directeurs de recherche : Jesús Vázquez-Abad, professeur au Département de didactique de l'Université de Montréal, pour ses encouragements, sa grande culture scientifique et son pragmatisme et Marie-Françoise Legendre, professeure au Département de psychopédagogie de l'Université de Montréal, pour sa générosité, sa connaissance approfondie des théories de l'apprentissage et son esprit nuancé.

Merci à Marcel Thouin qui a su, à un moment critique, trouver les bons mots pour m'encourager à poursuivre mes recherches sur le rôle de l'histoire des sciences en enseignement des sciences, domaine de recherche encore peu développé au Québec et donc plus difficile d'approche.

Merci également à Patrice Potvin dont l'influence a été omniprésente, du début à la fin de ce projet.

Merci aux élèves de l'École primaire Fernand-Seguin à Montréal ayant participé à cette étude.

Merci aux Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) et à la Faculté des études supérieures de l'Université de Montréal pour leur appui financé.

Et finalement, merci à ma conjointe, Valérie Leroux, pour ses encouragements, son écoute, son aide lors des transcriptions et ses relectures attentives.

Introduction

Cette recherche se situe à l'intersection de deux importants programmes de recherche en didactique des sciences. Le premier porte sur une théorie de l'apprentissage spécifique à l'enseignement des sciences : le changement conceptuel (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982). S'inscrivant dans la continuité des travaux du psychologue-épistémologue Piaget et de ceux des philosophes Kuhn (1962), Lakatos (1970) et Toulmin (1972), ce programme de recherche sur le changement conceptuel conçoit l'apprentissage de la science comme le passage d'une conception dite alternative ou intuitive que l'élève possède vers une conception dite scientifique, c'est-à-dire socialement admise par la communauté scientifique. Le but de ces recherches est donc de favoriser ce changement conceptuel en posant la question : quelles conditions faut-il mettre en place pour favoriser le changement conceptuel ? Le second programme de recherche, s'inspirant de précurseurs de longue date tels que Hegel (1993), Mach (1943) et Duhem (1914) et de contemporains comme Matthews (1994), porte davantage sur une stratégie d'enseignement que sur une théorie de l'apprentissage : il examine le rôle que peuvent jouer l'histoire et la philosophie des sciences (HPS) en enseignement des sciences.

S'inscrivant dans le prolongement de ces deux programmes, la présente recherche propose l'élaboration de micromondes¹ de mouvements inspirés de l'histoire des idées en physique mécanique et, ensuite, l'analyse, à partir du modèle de diSessa (1993), des effets de l'utilisation de ces micromondes sur les raisonnements qualitatifs impliqués dans les processus de changement conceptuel reliés à la notion d'inertie chez les élèves de cinquième année du primaire.

Le premier chapitre intitulé « Problématique » présente le contexte théorique et les enjeux justifiant notre intérêt à s'inspirer de l'histoire des sciences pour élaborer des micromondes susceptibles de favoriser les processus de changement

¹ Introduite par Papert (1981), la notion de micromonde réfère à des environnements informatisés interactifs permettant de tester instantanément des hypothèses en coordonnant différents paramètres.

conceptuel en physique mécanique. Le deuxième chapitre portant sur le cadre conceptuel identifie les principaux éléments de l'histoire de la mécanique servant à l'élaboration des micromondes, en plus de présenter le modèle du changement conceptuel développé par diSessa, modèle servant de cadre d'analyse à la présente étude. Le troisième chapitre portant sur le cadre méthodologique décrit les micromondes historiques conçus et explique la méthodologie utilisée dans la présente recherche. Le quatrième et dernier chapitre portant sur l'analyse et l'interprétation des résultats présente et commente les principaux effets observés lors de l'utilisation de chacun des micromondes.

Problématique

1. Le problème du changement conceptuel

L'un des aspects les plus remarquables des théories scientifiques est qu'elles permettent non seulement d'expliquer des phénomènes naturels, mais aussi de faire des prédictions précises de nature quantitative. En enseignement des sciences, on utilise couramment cette qualité qu'ont les théories scientifiques de pouvoir prédire avec précision le déroulement des phénomènes naturels. De quelle façon ? En proposant aux élèves de solutionner des exercices quantitatifs dans le but avoué de leur faire acquérir des notions scientifiques ou d'évaluer leur degré de compréhension. En fait, l'utilisation de problèmes de nature quantitative est plus que courante en enseignement des sciences : elle est omniprésente.

Dans une analyse de quatorze manuels scolaires de chimie de l'enseignement secondaire, De Berg (1989) observe que seulement 6,3% des exercices qui s'y trouvent sont de nature qualitative. La situation concernant les évaluations formatives et sommatives ne serait pas très différente (Lin, 1998). Selon Nakhleh (1993), cet accent sur le quantitatif reposerait, du moins en partie, sur une croyance des éducateurs à l'effet que le succès à la résolution de problèmes quantitatifs est un indicateur de la compréhension des concepts scientifiques. Évidemment, ce principe fait face à un problème majeur : on oublie que des problèmes numériques peuvent se résoudre par des algorithmes de résolution basés sur l'application aveugle d'équations mathématiques (Gabel, Sherwood & Enochs, 1984; Nakhleh & Mitchell, 1993 cité dans Lin, Hung & Hung, 2002). La résolution de problèmes numériques n'est donc pas un gage de compréhension.

D'ailleurs, c'est ce que confirment les chercheurs Lin, Hung & Hung (2002, p. 454) :

[o]veremphasis of algorithmic problem-solving ability has resulted in a situation wherein students who are capable of solving mathematical

problems may only have a limited understanding of the chemistry underlying their algorithmic manipulations.

Les élèves apprennent à mémoriser et appliquer des formules et des algorithmes, mais ne comprennent pas réellement le sens des concepts et des relations impliquées dans les équations qu'ils utilisent et ne développent pas de véritables habiletés de raisonnements.

La riche littérature sur les conceptions alternatives des élèves (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Confrey, 1990; Liu, 2001; Sequeira & Leite, 1991; Driver & Easley, 1978; Viennot, 1979) appuie aussi le point de vue selon lequel la résolution de problèmes quantitatifs ne permet pas de développer un véritable sens de la mécanique. Même si les élèves arrivent à solutionner certains problèmes correctement, dès que l'on sort de la résolution de problèmes d'ordre quantitatif et que l'on interroge les étudiants sur des aspects davantage reliés à des raisonnements de nature qualitative – ce qui est l'une des caractéristiques des recherches dans le domaine des conceptions alternatives –, on remarque que même les étudiants universitaires en physique expriment des raisonnements qui ne sont pas en accord avec les lois admises de la physique. Sous des apparences de compréhension (lorsqu'il est question de problèmes mathématiques) se cache une profonde incompréhension (lorsqu'il est question de problèmes conceptuels et plus qualitatifs).

En mécanique, par exemple, les étudiants appliquent la deuxième loi de Newton dans la résolution de problèmes numériques, mais croient toujours qu'une force constante engendre une vitesse constante (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994). Ils peuvent calculer l'accélération toujours constante d'un objet en chute libre, mais ils croient toujours que plus la masse est élevée, plus l'objet tombe vite (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994). Des exemples comme ceux-là sont nombreux et ne se limitent pas à la mécanique.

Une **conception alternative**² prend souvent la forme d'un court énoncé permettant de donner un sens à certaines observations et de faire des prédictions. « Le sel ou le sucre dissous dans l'eau disparaissent », « Les objets légers flottent et les objets lourds coulent », « Souffler sur un objet éloigne toujours cet objet », « Tous les métaux sont attirés par les aimants », « Seuls les métaux sont conducteurs » sont autant d'exemples de conceptions alternatives (Thouin, 1997). Les conceptions alternatives des élèves peuvent s'avérer justes et efficaces dans certains contextes ou pour certaines observations, mais, dans d'autres contextes, elles s'avèrent inefficaces ou carrément fausses. Elles s'opposent donc aux conceptions scientifiques que l'on cherche à enseigner aux élèves. Puisque ces derniers possèdent des conceptions alternatives et ce, même avant l'enseignement formel des concepts scientifiques, apprendre les sciences signifie principalement faire évoluer les conceptions du statut de conceptions alternatives à celui de conceptions scientifiques, c'est-à-dire conformes aux théories scientifiques.

Un des problèmes importants soulevés par l'étude des conceptions des élèves est que ces dernières sont très résistantes : même après un enseignement sur la dissolution, les élèves croient toujours que le sel ou le sucre dissous dans l'eau disparaissent. En raison de cette résistance des conceptions des élèves au changement, l'apprentissage des sciences s'avère une entreprise difficile et complexe qui demande à l'apprenant de dépasser ses conceptions initiales. C'est ce qui a mené les chercheurs à s'intéresser au **changement conceptuel** (Posner & al., 1982), c'est-à-dire à l'étude des processus qui permettent d'évoluer d'une conception alternative à une conception scientifique d'un phénomène. D'après ce courant, il est essentiel, pour favoriser la compréhension des concepts scientifiques, de tenir compte des connaissances antérieures des élèves, c'est-à-dire de leurs conceptions alternatives. L'étude du changement conceptuel est un champ de recherche vaste et complexe dont il sera davantage question dans le chapitre suivant portant sur le cadre conceptuel.

² Les conceptions alternatives peuvent aussi prendre le nom de conceptions des élèves, préconceptions, fausses conceptions, conceptions erronées, conception primitive, etc.

2. Le rôle de l'histoire des sciences dans les processus de changement conceptuel

La problématique du changement conceptuel est complexe d'abord parce que les élèves possèdent des conceptions qui ne s'accordent pas avec les conceptions scientifiques, mais surtout parce que les conceptions des élèves sont résistantes au changement. Où se situe l'histoire des sciences dans cette problématique ? Quels liens existent-ils entre histoire des sciences et apprentissage des sciences ? De quelle façon l'histoire des sciences peut-elle contribuer à faciliter les processus de changement conceptuel en sciences ?

Demandons-nous d'abord : **quelles sont les relations entre les conceptions intuitives des élèves et les conceptions historiques des philosophes et des scientifiques du passé ?** L'une des caractéristiques intéressantes des conceptions des élèves, c'est qu'elles ressemblent souvent aux conceptions historiques (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994). En effet, il existe une certaine correspondance entre les conceptions des élèves et les conceptions des premiers scientifiques. Ceci est particulièrement bien documenté en mécanique.

[D]o the intuitive, immediate, 'concrete', conceptions of children mirror the early stages in the development of scientific understanding in different domains ? At one level of simplification, the answer is yes. Children do seem to have pre-instruction understanding, or naive beliefs, that parallel early scientific, or pre-scientific notions. This has been much-demonstrated for the field of mechanics. (Matthews, 1990, pp. 33-34)

L'une des études les plus intéressantes au sujet des similitudes entre les conceptions des élèves et les conceptions historiques des scientifiques est celle de Sequiera et Leite (1991). Dans leur article, ces auteurs résument certaines études sur la chute libre, les forces et le mouvement ainsi que sur les lois de Newton démontrant

que les conceptions des élèves correspondent assez bien aux conceptions des premiers scientifiques (tableau 1). Quoique moins documentées, on rapporte aussi des correspondances entre conceptions intuitives et conceptions historiques dans d'autres domaines, notamment en biologie avec la théorie de l'évolution et en chimie avec la nature des gaz (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994).

Tableau 1 : Correspondance entre les conceptions intuitives et les conceptions historiques en mécanique selon Sequiera et Leite (1991)

Conceptions intuitives	Conceptions historiques
Les objets lourds tombent plus vite que les objets plus légers, avec une augmentation de la vitesse.	La vitesse augmente durant la chute (Albert de Saxe, XIIIe siècle).
Dans le vide, les objets ne tombent pas.	La chute libre dans le vide est impossible (Aristote, IVe siècle av. J.-C.).
La gravité nécessite un support matériel et ne peut agir dans le vide.	La gravité nécessite un support matériel qui modifie progressivement l'effet de la force transmise (Averroès, XIIIe siècle).
Le mouvement nécessite une force dirigée dans le même sens que ce dernier.	Le mouvement est maintenu grâce à l'impétus (Buridan, XIVe siècle).
Les objets cessent leur mouvement lorsqu'ils ont épuisé toute leur force.	Les objets s'arrêtent lorsque l'impétus est épuisé (Buridan, XIVe siècle).
Le mouvement et le repos sont deux états de mouvement différents : le repos ne nécessite pas d'explication.	Le repos est un état naturel ne nécessitant aucune explication (Aristote, IVe siècle av. J.-C.).
Une force constante donne une vitesse constante à un objet.	L'air maintient la vitesse constante lorsqu'un objet est en mouvement violent (Aristote, IVe siècle).
La force est proportionnelle à la vitesse.	L'impétus est proportionnel à la vitesse (Buridan, XIVe siècle).
Le ralentissement des objets est causé par une décroissance de la force dans la direction du mouvement.	La diminution de vitesse est causée par une réduction de l'impétus (Buridan, XIVe siècle).
Les objets ont/acquièrent de la force.	Les objets acquièrent et développent de l'impétus (Buridan, XIVe siècle).

Ensuite, demandons-nous : **quelles sont les relations entre le développement de la compréhension de l'élève et l'évolution des idées dans l'histoire des sciences ?** Selon Matthews (1989), cette question a d'abord été abordée par Hegel (1993) dans *Phénoménologie de l'esprit*. À la fin du XVIIe siècle, Mach et Duhem ont répété les idées de Hegel. Au XXe siècle, Piaget (cité dans Matthews, 1989, p. 33) postule que :

The fundamental hypothesis of genetic epistemology is that there is a parallelism between the progress made in the logical and rational organisation of knowledge (history of science) and the corresponding formative psychological process.

Comme le notent Monk & Osborne (1997), cette question du parallélisme entre les conceptions intuitives et les conceptions historiques est récurrente dans la littérature constructiviste et, même si plusieurs chercheurs ont remarqué des correspondances significatives, il n'y a pas de preuve appuyée par des études détaillées que les conceptions des élèves récapitulent les conceptions historiques :

[...] the notion that the ontology recapitulates the phylogeny is not supported by evidence from detailed examination of the historical evolution of scientific concepts [...] all [researchers] show that there are important differences between children's thinking and the phylogenic origins of these concepts. (p. 412)

D'une façon similaire, Sequiera et Leite (1991) s'accordent avec Monk et Osborne (1997) pour dire que bien qu'il y ait des ressemblances significatives entre l'évolution des conceptions intuitives et l'évolution des conceptions historiques, on retrouve néanmoins certaines différences :

There is some evidence [...] that students' conceptual development has some similarity with the development of concepts that occurred in the history of science although it does not follow exactly the same stages. (Sequiera et Leite, 1991, p. 53)

Selon Monk et Osborne (1997), une des causes principales de ce manque de similitudes entre l'évolution conceptuelle individuelle et l'évolution historique des savoirs serait les différences significatives entre les deux contextes de production des savoirs. Les facteurs métaphysiques, épistémologiques et, surtout, sociologiques peuvent jouer un rôle important dans la construction des connaissances. Puisque les élèves vivent dans un environnement fort différent de celui des scientifiques

d'autrefois, il n'est pas surprenant de noter des différences importantes entre les deux constructions.

Dans le même ordre d'idée, Nersessian (1991) affirme que la récapitulation ne peut pas être identique, parce que les conceptions historiques proviennent non seulement de l'expérience empirique, mais également de facteurs métaphysiques, épistémologiques et sociologiques :

It is clear that the learning process cannot straightforwardly recapitulate the historical process. Historical representations are not simple "generalization from experience" and neither are students representations. Metaphysical, epistemological, and sociological factors play an important role in the formation of a representation, and these will be different for the two processes. (p. 134)

Mais l'analyse de cette auteure ne s'arrête pas là. Elle affirme que, même si les détails de la récapitulation ne sont pas identiques, il est plausible de penser qu'une récapitulation plus limitée existe. Elle propose une distinction entre contenu et processus.

Selon elle, plus le contenu est relié à des expériences familières pour les élèves, plus la récapitulation risque de se ressembler. Elle cite en exemple le mouvement des objets et la forme de la Terre. En contrepartie, dès que les facteurs métacognitifs, sociologiques et technologiques sont reliés plus étroitement au développement des idées scientifiques, la récapitulation ne peut être que plus limitée.

En plus du contenu, il y a les processus employés pour construire les représentations scientifiques qui peuvent être récapitulés. À ce sujet, Nersessian (1991) propose de faire l'hypothèse que la dimension cognitive des processus modifiés lors du changement conceptuel est la même chez l'apprenant que chez le scientifique :

[B]oth the nature of the changes that need to be made in conceptual restructuring and the kinds of reasoning involved in the process of

constructing a scientific representation are the same for scientists and students of science. That is, the cognitive dimension. (p. 135)

Toutes ces recherches sur les liens entre l'histoire des sciences et le changement conceptuel amènent les chercheurs à croire que l'intégration de l'histoire des sciences en enseignement des sciences pourrait favoriser le changement conceptuel. Parmi les arguments les plus forts, il y a ceux reliés à la ressemblance entre conceptions intuitives et conceptions historiques ainsi que ceux concernant la récapitulation de l'évolution des idées en sciences chez l'apprenant.

Puisque que les conceptions des élèves s'apparentent à celles des philosophes et scientifiques de l'histoire, discuter des conceptions historiques pourrait permettre aux élèves d'explicitier et de réfléchir à leur propre conception (Monk & Osborne, 1997; Lin, Hung & Hung, 2002). Plus encore, en étant en contact avec les conceptions scientifiques historiques, les apprenants peuvent prendre conscience des faiblesses ou des problèmes de leurs propres conceptions (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Confrey, 1990). Aborder les conceptions historiques des scientifiques est d'autant plus intéressant pour promouvoir le changement conceptuel que les élèves s'opposent souvent aux conceptions scientifiques pour les mêmes raisons que les scientifiques du passé (Monk & Osborne, 1997).

Même si les conceptions des apprenants ne récapitulent pas nécessairement l'évolution des idées en sciences, plusieurs chercheurs sont d'avis qu'enseigner la séquence historique d'un domaine scientifique ne peut que favoriser le changement conceptuel. En effet, aborder l'histoire des sciences a l'avantage de montrer à l'apprenant une séquence d'évolution de ses conceptions vers les conceptions scientifiques actuelles (Confrey, 1990). Ceci permet aussi de comparer les différentes conceptions (à la fois des élèves et de l'histoire) et de comprendre leurs avantages et inconvénients dans tel ou tel contexte en mettant en évidence les différences entre les façons de penser avant et après (Monk & Osborne, 1997). De plus, en suivant une séquence historique, les conceptions évoluent souvent du plus

simple au plus complexe, du plus intuitif au plus abstrait. Finalement, en abordant la science par l'histoire des sciences, cela permet de l'enseigner d'une façon plus qualitative et de mettre l'accent sur la compréhension des concepts plutôt que sur la résolution de problèmes numériques.

Somme toute, les élèves se présentent à l'école avec des conceptions qui s'opposent aux conceptions scientifiques et qui sont très résistantes au changement. Le modèle du changement conceptuel propose d'étudier les processus permettant à l'apprenant de passer d'une conception intuitive à une conception scientifique. Parmi les chercheurs s'intéressant au problème du changement conceptuel, certains ont examiné les relations entre l'histoire des sciences et l'apprentissage des sciences et croient que l'histoire des sciences peut contribuer à une compréhension plus approfondie des concepts scientifiques et, par conséquent, favoriser le changement conceptuel.

3. Les micromondes historiques

La présente étude propose de s'inspirer de l'histoire de la physique mécanique pour concevoir une séquence d'activités visant à développer une compréhension qualitative de la notion d'inertie. S'inspirer de l'histoire des sciences pour élaborer des activités d'apprentissage, c'est non seulement chercher à présenter aux élèves des conceptions historiques qui ressemblent souvent aux leurs et mettre en relief les faiblesses des conceptions d'autrefois, mais c'est aussi et surtout comparer les conceptions du passé avec celles d'aujourd'hui et comprendre comment les conceptions ont évolué (souvent de la formulation la plus simple et la plus intuitive à la formulation la plus complexe et la plus contre-intuitive).

L'une des façons d'enseigner la notion d'inertie selon une approche historique consiste à créer ce que nous appelons des **micromondes historiques**, c'est-à-dire des

environnements informatisés interactifs donnant la possibilité aux élèves de tester instantanément des hypothèses en coordonnant différents paramètres conçus dans le but d'aider les élèves à comprendre les conceptions des scientifiques du passé, mais aussi de percevoir progressivement les limites de ces mêmes conceptions.

L'avantage principal de l'utilisation de situations d'apprentissage informatisées est la possibilité, pour le concepteur, de contrôler l'environnement dans lequel l'élève évolue. Il est par exemple possible de limiter la variabilité de certains paramètres ou de créer un environnement dans lequel la résistance de l'air est inexistante. Le fait de pouvoir contrôler l'environnement dans lequel les mouvements ont lieu permet de concevoir des micromondes respectant des paradigmes de l'histoire des sciences. En mécanique, on peut créer un micromonde aristotélien, c'est-à-dire un environnement où les mouvements respecteront les principes de la mécanique aristotélienne. Le concepteur du micromonde programme alors l'environnement d'interaction de telle sorte qu'il soit impossible pour l'utilisateur de sortir du domaine d'applicabilité de la mécanique aristotélienne.

Un autre avantage de l'utilisation de micromondes de mouvements est le rôle qu'ils peuvent jouer dans la compréhension qualitative du mouvement (Legendre, 1995, 1997; Potvin, 2002). En effet, comme les micromondes informatisés sont des environnements interactifs où les élèves peuvent vérifier instantanément leurs hypothèses, ces derniers peuvent construire progressivement leur compréhension du micromonde et de l'interaction qu'il peut y avoir entre les différentes paramètres, ce qui peut sans doute contribuer à favoriser les processus de changement conceptuel.

La notion d'inertie a été retenue pour cette étude en raison de son importance à la fois dans l'histoire de la mécanique et dans l'évolution des conceptions des élèves. D'abord, l'histoire des sciences nous montre que la compréhension de la notion d'inertie a été fondamentale dans l'évolution de la mécanique et, en particulier, dans le passage d'une mécanique aristotélienne fondée sur le sens

commun à une mécanique newtonienne fondée sur les capacités d'abstraction et de modélisation. Ensuite, les recherches sur les conceptions des élèves permettent également de justifier le choix de l'inertie. En effet, parmi les conceptions en mécanique décrites dans les recherches, nombre d'entre elles sont reliées à la notion d'inertie. Si les élèves croient que le mouvement d'un objet se fait toujours dans la même direction que la force exercée (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Sequeira & Leite, 1991; diSessa, 1982; Thouin, 1996), c'est peut-être parce qu'ils ne comprennent pas qu'un objet en mouvement cherche à conserver ce mouvement et que ce dernier n'est pas « annulé » parce qu'on exerce une force dans une direction opposée. Si les élèves croient qu'un objet qui se déplace à vitesse constante doit subir une force constante (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Thouin, 1996; Sequeira & Leite, 1991), c'est peut-être parce qu'ils ne comprennent pas qu'en l'absence de force, le repos d'un objet est strictement équivalent à un mouvement uniforme à vitesse constante. De la même façon, c'est sans doute parce qu'ils ne comprennent pas bien le concept d'inertie que les élèves croient qu'un objet en mouvement ralentit s'il n'est sujet à aucune force. Ainsi, plusieurs conceptions alternatives peuvent être reliées à la notion d'inertie:

Some of the alternative conceptions referred to above, namely those relating "force and motion", can be used to illustrate students' difficulty in using the concept of "inertia" [...] (Sequeria & Leite, 1991, p. 49)

L'objet de la présente étude se précise: il s'agit d'étudier les effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel reliés à la compréhension du principe d'inertie chez les élèves de la cinquième année de l'enseignement primaire et ce, dans le but d'évaluer si l'utilisation de micromondes historiques contribue à favoriser l'émergence de raisonnements qualitatifs susceptibles de stimuler le changement conceptuel. La question générale de recherche prend donc la forme suivante :

Quels sont les effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel reliés au principe d'inertie chez les élèves de la cinquième année de l'enseignement primaire ?

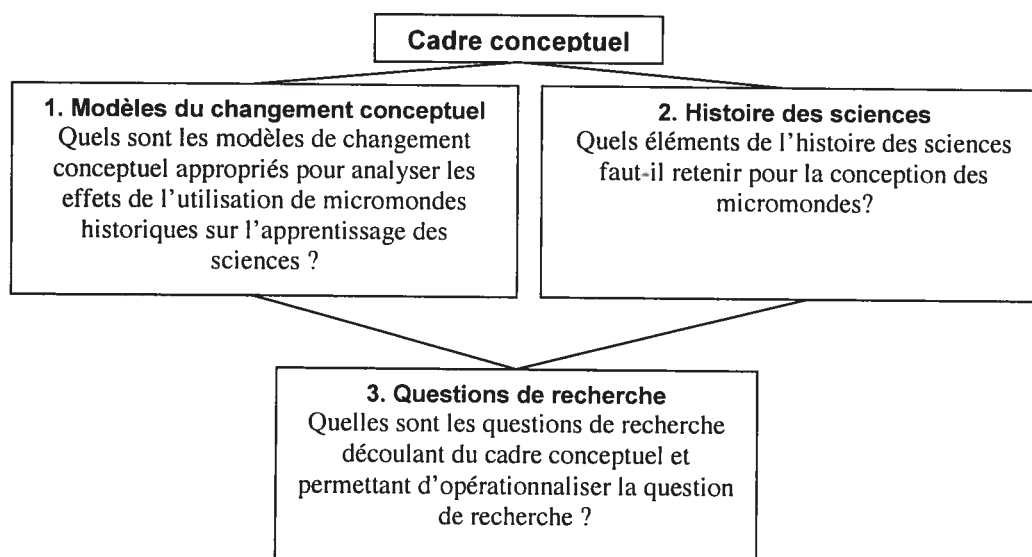
Cadre conceptuel

Introduction

Ce chapitre se divise en deux parties. La première analyse les principaux modèles du changement conceptuel. Il y aura d'abord le modèle de Posner, Stike, Hewson et Gertzog (1982), l'un des premières modèles du changement conceptuel et le plus cité dans la littérature. Il constitue pour plusieurs chercheurs le modèle à l'origine du paradigme actuel du changement conceptuel. Ensuite, nous discuterons du modèle de Vosniadou (1994) et de quelques autres modèles s'inscrivant dans une perspective où le changement conceptuel est davantage perçu comme un processus de rupture avec les connaissances antérieures. Et finalement, nous présenterons le modèle de diSessa (1993), modèle qui conçoit le changement conceptuel davantage comme un processus en continuité avec les connaissances antérieures qu'en rupture.

Dans la deuxième partie, une histoire du concept d'inertie, d'Aristote à Newton, est proposée afin de cerner les principaux éléments historiques servant à l'élaboration des micromondes dont nous analyserons les effets.

Figure 1 : Structure du cadre conceptuel



1. Les modèles du changement conceptuel

Le programme de recherche sur le changement conceptuel se concentre sur la question : **comment favoriser l'apprentissage des concepts scientifiques ?** *A priori*, on peut penser qu'il suffit d'enseigner des concepts scientifiques pour que les élèves les apprennent. Cette affirmation repose sur l'hypothèse selon laquelle les élèves ne possèdent aucune conception initiale ou que, s'ils en possèdent, elles sont aussitôt effacées et remplacées par les conceptions scientifiques enseignées. Or, au moins depuis Piaget, il est clair que les connaissances antérieures interfèrent avec les nouvelles. Quelles sont les connaissances antérieures des élèves en sciences et quels rôles jouent-elles dans la construction de nouveaux savoirs ? Les nombreuses recherches portant sur les conceptions alternatives et sur le changement conceptuel des élèves tentent de répondre à ces questions.

En étudiant les conceptions des élèves, les chercheurs se sont aperçus qu'elles n'étaient pas nécessairement en accord avec les conceptions scientifiques que l'on désire enseigner aux élèves. Ce qui rend la problématique du changement conceptuel encore plus complexe, c'est que les conceptions des élèves résistent à l'enseignement des conceptions scientifiques : les élèves gardent leurs conceptions naïves même après avoir été placés en contact avec des conceptions scientifiques. Dès ce problème de la résistance des conceptions alternatives posé, la question « comment favoriser l'enseignement des conceptions scientifiques ? » devient « **comment favoriser le passage d'une conception alternative à une conception scientifique ?** »

En premier lieu, nous nous intéresserons au modèle de Posner et *al.* (1982), parce qu'il s'agit du modèle le plus souvent cité et aussi parce qu'il sert, encore aujourd'hui, d'inspiration à de très nombreuses recherches. En plus de survoler quelques modèles inspirés de Posner et *al.*, nous aborderons plus en détail le modèle de Vosniadou (1994). Pour les chercheurs comme Posner et *al.* et Vosniadou, les conceptions des élèves et la structure conceptuelle qui les sous-tend sont

incompatibles avec les conceptions et les théories scientifiques, parce qu'elles reposent sur des fondements différents et incompatibles. Il doit donc y avoir rupture : il faut remettre en question, non seulement les conceptions, mais aussi l'ensemble des fondements du cadre de référence de l'élève afin qu'il puisse acquérir de nouvelles conceptions. De ce point de vue, les conceptions des élèves sont considérées comme des obstacles à l'acquisition de conceptions scientifiques et, pour surmonter ces obstacles, les chercheurs ont élaboré des stratégies d'enseignement visant à remplacer les conceptions existantes par des conceptions scientifiques en provoquant une remise en question des structures conceptuelles existantes, c'est-à-dire en engendrant un conflit cognitif.

En second lieu, nous étudierons le modèle proposé par diSessa (1993). Pour ce chercheur, les conceptions alternatives des élèves et les conceptions scientifiques ne reposent pas nécessairement sur des fondements différents et il n'y a pas nécessairement une rupture totale entre les connaissances antérieures et les connaissances scientifiques. En fait, ce chercheur pense plutôt que le savoir de l'expert ressemble à bien des égards à celui du novice, avec une différence notable cependant : le savoir de l'expert serait davantage organisé et systématisé que celui du débutant. Dans cette perspective, les conceptions des élèves ne sont pas la conséquence d'un cadre conceptuel sous-jacent, mais émanent plutôt de structures élémentaires et intuitives de raisonnement provenant de l'interprétation superficielle des phénomènes : les primitives phénoménologiques (p-prims). Ainsi, contrairement aux chercheurs tels Posner et *al.* et Vosniadou, diSessa insiste davantage sur la continuité, plutôt que sur la rupture entre les conceptions intuitives des élèves et les conceptions scientifiques. Les deux types de savoir (expert et novice) reposent sur les mêmes habitudes de raisonnement et d'interprétation que diSessa nomme p-prims. De ce point de vue, l'apprentissage des sciences passe davantage par une réorganisation des habitudes interprétatives que par une remise en question fondamentale du cadre de référence de l'élève.

1.1 Modèles visant la rupture conceptuelle

Afin de bien cerner le problème du changement conceptuel, nous proposons de tracer brièvement les grandes lignes de l'origine du courant de recherche relatif à la rupture conceptuelle en présentant l'un des plus influents modèles, celui de Posner *et al.* Par la suite, le modèle plus contemporain de Vosniadou sera présenté.

1.1.1 Les origines du courant de recherche sur le changement conceptuel : le modèle de Posner *et al.*

Le modèle de Posner *et al.* (1982) repose essentiellement sur deux influences. Il y a d'abord les recherches portant sur les conceptions des élèves. Selon ces recherches, les élèves possèdent des conceptions qui ne sont souvent pas en accord avec les conceptions scientifiques que l'on désire enseigner et qui sont difficiles à changer. Ensuite, il y a la considérable révolution dans le domaine de la philosophie des sciences instiguée par Kuhn, Lakatos et Toulmin. Selon ces philosophes, la science n'évoluerait pas par accumulation de connaissances, mais plutôt par rupture. Après avoir parlé de ces deux influences, nous discuterons des principaux aspects du modèle du changement conceptuel de Posner *et al.*

Recherches sur les conceptions des élèves et philosophie contemporaine des sciences

Débutons par la première influence : les recherches sur les conceptions des élèves. S'inspirant des travaux de Ausubel (1968) selon lesquelles les connaissances antérieures de l'élève représentent le facteur le plus déterminant dans l'apprentissage de nouveaux concepts, ces recherches tentent d'identifier les conceptions auxquelles les élèves adhèrent au sujet de différents phénomènes naturels. Sans s'opposer directement à la psychologie de Piaget, les chercheurs de ce paradigme pensent qu'il

est préférable de s'attarder davantage au contenu des idées des élèves et moins à leurs supposées structures sous-jacentes (Driver & Easley, 1978, p. 76 cité dans Posner & *al.*, 1982, p. 211). Précisons que depuis les années soixante-dix, ce courant de recherche a donné lieu à un nombre impressionnant de publications.

Posner et *al.* connaissaient bien ces travaux lorsqu'ils ont écrit leur article en 1982. D'ailleurs, un peu plus tard, en 1992, Strike et Posner affirmeront : « A second influence [la première étant la philosophie des sciences] on our views of conceptual change has been the voluminous literature on misconceptions that has emerged in the last fifteen years » (p. 152). À l'époque de la rédaction du modèle, deux importantes conclusions empiriques se dégagent des recherches sur les conceptions³ :

- **Les élèves possèdent des conceptions alternatives.** (Driver & Easley, 1978; Viennot, 1979; Driver, 1973; diSessa, 1982; Wandersee, Mintzes & Novak, 1994).
- **Ces conceptions alternatives sont résistantes, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas facilement remplacées par des conceptions scientifiques.** (Viennot, 1979; Wandersee, Mintzes & Novak, 1994)

Selon la première conclusion, les élèves possèdent des conceptions, c'est-à-dire qu'ils possèdent déjà des explications sur les phénomènes naturels et ce, même si ces phénomènes n'ont jamais été enseignés. On pourrait penser, par exemple, qu'un enfant n'ayant jamais suivi de cours de mécanique ne possède aucune idée sur l'influence d'une force sur le mouvement d'un objet. Or, ces recherches mettent en évidence que, même avant l'instruction formelle, les élèves possèdent des conceptions sur les phénomènes naturels souvent en désaccord avec les **conceptions scientifiques** (celles à enseigner).

L'apprentissage des sciences vise donc le passage d'une conception alternative à une conception scientifique. Mais, si l'on en croit la littérature, cet apprentissage

³ Ces deux conclusions seront également appuyées par les recherches des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix.

d'une conception scientifique n'est pas une entreprise facile, les **conceptions alternatives des élèves étant robustes**, c'est-à-dire qu'elles résistent à un enseignement traditionnel des conceptions scientifiques. En effet, il semble que les élèves reviennent spontanément à leurs conceptions intuitives au lieu d'adhérer aux conceptions scientifiques. Cette deuxième conclusion empirique a des conséquences importantes sur l'éducation : sachant que les conceptions alternatives sont résistantes, comment peut-on favoriser le changement conceptuel d'une conception alternative à une conception scientifique ? C'est principalement à cette question que veut répondre le modèle du changement conceptuel.

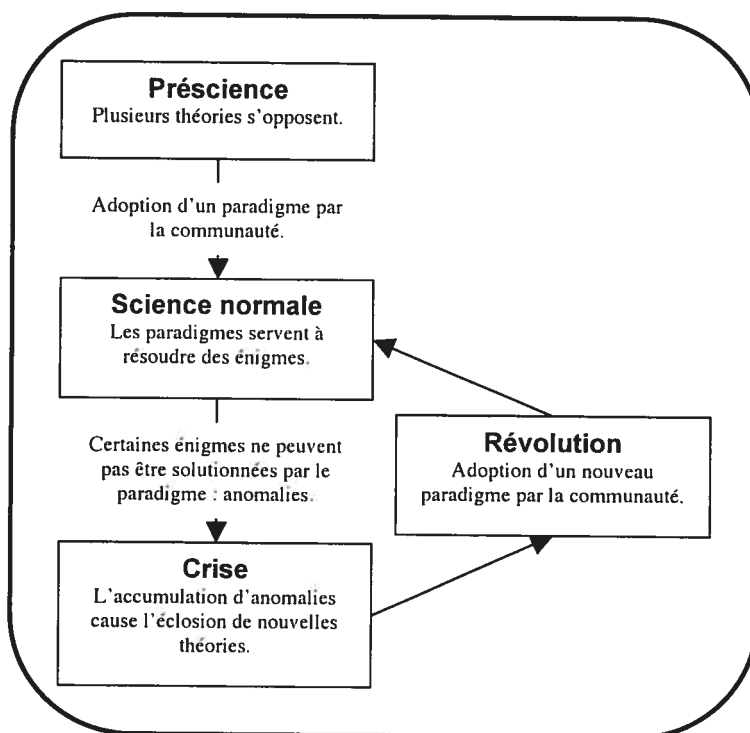
La seconde influence de Posner et *al.* (1982) provient de la nouvelle philosophie des sciences développée par Kuhn (1962), Lakatos (1970) et Toulmin (1972). Bien que ces trois philosophes ne soient pas en accord sur tous les points, il demeure que leurs philosophies se ressemblent considérablement. En effet, l'idée de paradigme chez Kuhn, celle de programme de recherche chez Lakatos et celle de changement conceptuel chez Toulmin possèdent des caractéristiques similaires. Examinons le concept de paradigme de la philosophie de Kuhn en guise d'exemple.

Le concept-clé de la théorie de la connaissance de Kuhn est celui de **paradigme**. Selon Kuhn, les paradigmes sont « les découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions. » (Kuhn, 1962, p. 11). Plus loin, il précise que les paradigmes sont en fait les théories possédant les deux caractéristiques suivantes : 1) « leurs accomplissements étaient suffisamment remarquables pour soustraire un groupe cohérent d'adeptes » et 2) « ils ouvr[ent] des perspectives suffisamment vastes pour fournir à ce nouveau groupe de chercheurs toutes sortes de problèmes à résoudre » (Kuhn, 1962, p. 29-30). Dans la deuxième édition augmentée, Kuhn précise son point de vue : le paradigme⁴ est l'« ensemble des engagements du groupe » (Gagnon & Hébert, 2000, p. 232). La mécanique quantique

⁴ Kuhn remplace alors le mot *paradigme* par celui de *matrice disciplinaire*.

est un exemple de paradigme. Elle est constituée d'hypothèses et d'engagements épistémologiques auxquels la communauté scientifique adhère et elle ouvre sur un ensemble de problèmes que les scientifiques pourront résoudre. De ce point de vue, un paradigme est une théorie qui fait consensus auprès de la communauté et qui offre des problèmes à résoudre et des solutions.

Figure 2 : Les révolutions scientifiques selon Kuhn



L'établissement d'un paradigme exige un consensus dans la communauté de chercheurs. Tant qu'une théorie ne rallie pas une quantité suffisante de scientifiques, elle n'est pas considérée comme une science, mais comme une **préscience**. Cette période préscientifique est caractérisée justement par l'absence de consensus : de nombreuses théories s'opposent et aucune ne prédomine sur les autres. La recherche se poursuit sans paradigme directeur. Lorsqu'une théorie fait consensus, qu'elle est acceptée et assimilée par le groupe de chercheur, la préscience passe au statut de **science normale**. La science normale est la recherche qui s'effectue sous l'influence d'un paradigme. En fait, la science normale « semble être une tentative pour forcer la

nature à se couler dans la boîte préformée et inflexible que fournit le paradigme » (Kuhn, 1964, p. 46). Le paradigme offre non seulement des explications pour les phénomènes observés, mais aussi des problèmes et un cadre pour les résoudre. La science normale cherche en fait à résoudre des énigmes (« puzzles »). Une énigme est « un problème dont on peut raisonnablement espérer qu'on va lui trouver une solution dans un avenir prévisible, pour autant qu'on adhère au paradigme régnant » et « [à laquelle] il est possible de trouver, à l'aide du paradigme, des solutions qui seraient acceptables » (Gagnon & Hébert, 2000, p. 230).

Comment la philosophie de Kuhn explique-t-elle le changement de théorie en science ? Il faut d'abord comprendre que ce ne seront pas toutes les énigmes qui seront résolues. Quand trop d'énigmes ne peuvent être résolues par le paradigme ou lorsque ce dernier n'arrive pas à résoudre un ou des problème(s) important(s), la science normale entre en période de **crise**. Le paradigme ne fait plus consensus et de nouvelles théories s'affrontent dans le but d'atteindre le statut de paradigme. Jusqu'à ce que la communauté adhère conjointement à une nouvelle théorie, la science est en **révolution scientifique**. Lors de la recherche normale, la science accumule des solutions sans subir de modifications majeures. En période de révolution scientifique, la science se réorganise totalement pour changer de paradigme. On assiste alors à une réorganisation conceptuelle et souvent même à une redéfinition des concepts et des engagements épistémologiques. Tout ce processus se produit relativement rapidement et, quand la crise se termine, la science redevient normale et cherche à nouveau à résoudre des énigmes à l'aide du paradigme jusqu'à la prochaine révolution. Pour Kuhn, les livres *Physique* d'Aristote et *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Newton sont des exemples de paradigmes, c'est-à-dire de théories qui ont su s'imposer comme cadre de référence pour la recherche dans leur domaine.

Cette nouvelle philosophie des sciences, avec ses concepts de paradigme, de programme de recherche ou de changement conceptuel, sert de fondement théorique aux modèles de changement conceptuel. Comme pour le modèle des révolutions

scientifiques de Kuhn, le modèle de Posner et *al.* (1982) prétend qu'à certains moments une rupture avec les connaissances antérieures est nécessaire afin d'acquérir de nouvelles connaissances.

Modèle de Posner et al.

S'inspirant à la fois des nombreuses recherches sur les conceptions des élèves et de la nouvelle philosophie des sciences, ce modèle se veut une **théorie épistémologique** et non pas psychologique (Strike & Posner, 1992, p. 150). On cherche par ce fait à se distinguer des théories psychologiques extrêmement influentes dans le domaine de l'éducation et l'on vise à développer une théorie mettant davantage l'accent sur les particularités du savoir scientifique et moins sur les processus généraux d'assimilation et d'accommodation. Cependant - et le titre de l'article est très éloquent à ce sujet : *Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of conceptual change* -, Posner et *al.* (1982) n'arrivent pas totalement à faire abstraction du cadre piagétien (en raison de l'utilisation du concept piagétien d'accommodation). Ainsi, leur modèle du changement conceptuel peut être vu comme un courant de recherche, en continuité avec les travaux de Piaget, qui se spécialise dans l'accommodation de conceptions scientifiques.

Le **changement conceptuel** se définit comme étant le passage d'une conception alternative à une conception scientifique. Le terme changement conceptuel ne désigne pas chaque petite évolution conceptuelle de l'élève, mais seulement les changements conceptuels plus considérables, des changements qui impliquent une certaine rupture par rapport aux connaissances antérieures, des changements auxquels les conceptions alternatives résistent. En s'appuyant sur la philosophie des sciences, le modèle de Posner et *al.* (1982) s'efforce d'expliquer pourquoi les conceptions des élèves résistent au changement, tout comme l'on retrouve de la résistance lors des changements de paradigmes.

Examinons le modèle classique du changement conceptuel proposé par Posner et *al.* (1982). La **question** à laquelle le modèle tente de trouver une réponse est : « How do learners make a transition from one conception, C_1 , to a successor conception, C_2 . » (Strike & Posner, 1992, p. 148). Pour répondre à cette question, Posner et *al.* (1982, p. 212) énoncent le **postulat de la rationalité de l'apprentissage** selon lequel l'apprentissage est une activité rationnelle. Cela permet de transposer les théories rationalistes de la philosophie des sciences, portant sur l'évolution des connaissances dans la communauté scientifique, à l'apprentissage individuel. Le postulat de la rationalité des apprentissages sous-entend que : 1) la conception initiale de l'élève est clairement formulée et comprise par ce dernier; 2) à l'aide d'arguments rationnels, il est possible de l'amener à abandonner sa conception alternative (C_1) pour la remplacer par une conception scientifique (C_2); et 3) l'élève est capable de comprendre la conception scientifique (C_2) même s'il adhère à la conception (C_1).

Posner et *al.* proposent un modèle du changement conceptuel selon lequel le changement conceptuel de l'apprenant d'une conception alternative à une conception scientifique est possible si les **quatre conditions** suivantes sont respectées (Posner & *al.*, 1982, p. 214) : 1) il doit y avoir une insatisfaction face aux conceptions existantes; 2) une nouvelle conception doit être intelligible; 3) une nouvelle conception doit apparaître initialement plausible; et 4) une nouvelle conception doit suggérer la possibilité d'un programme de recherche fructueux⁵.

Les quatre conditions de Posner et *al.* supposent que l'apprenant possède une **écologie conceptuelle**. Même si ce concept ne se retrouve fréquemment dans la littérature que depuis une dizaine d'années, son origine remonte à l'article de Posner & *al.* (1982). En fait, elle serait encore plus lointaine si l'on considère le fait que Posner et *al.* (1982) se sont inspirés eux-mêmes des travaux du philosophe Toulmin (1972). Cependant, contrairement à ce que laissent entendre certains articles (Posner

⁵ Traduit de l'anglais: « 1. There must be dissatisfaction with existing conceptions. 2. A new conception must be intelligible. 3. A new conception must appear initially plausible. 4. A new conception should suggest the possibility of a fruitful research program. »

et *al.*, 1982 ; Strike & Posner, 1992), ce n'est pas Toulmin (1972) qui serait à l'origine du terme écologie conceptuelle. Toulmin utilise en fait le terme écologie intellectuelle. Ainsi, ce que Posner et *al.* (1982) auraient emprunté est non pas l'expression « écologie conceptuelle », mais seulement le terme « écologie » et la métaphore lui étant associé. En examinant l'œuvre de Toulmin (1972), on remarque qu'il aurait emprunté la métaphore écologique au domaine du droit. On peut donc attribuer à Toulmin (1972) l'idée d'examiner les processus du changement conceptuel dans la communauté scientifique à l'aide de la métaphore écologique, mais on doit cependant attribuer le mérite à Posner & *al.* (1982) d'avoir pensé à transposer cette métaphore aux processus de changement conceptuel.

Selon Posner et *al.* (1982), l'écologie conceptuelle désigne l'ensemble des concepts influençant la sélection de nouveaux concepts et gouvernant le processus de changement conceptuel⁶. Les premiers proviendraient des connaissances antérieures de l'individu et joueraient un rôle central lors de la sélection des seconds⁷. Pour Posner et *al.* (1982), l'écologie conceptuelle se définit donc comme étant l'ensemble des concepts intégrés antérieurement par l'individu qui influencent la sélection de nouveaux concepts centraux et qui gouvernent le changement conceptuel.

Quels sont ces concepts qui composent l'écologie conceptuelle ? Posner et *al.* (1982) citent comme faisant partie de l'écologie conceptuelle :

anomalies, analogies and metaphors, epistemological commitments (explanatory ideals, general views about the character of knowledge), metaphysical beliefs and concepts (metaphysical beliefs about science, metaphysical concepts of science), other knowledge (knowledge in other fields, competing concepts). (Posner & *al.*, 1982, p. 215)

⁶ « Borrowing a phrase from Stephen Toulmin (1972), we refer to those concepts which govern a conceptual change as a “conceptual ecology”» (Posner & *al.*, 1982, p. 213)

⁷ « An individual's current concepts, his conceptual ecology, will influence the selection of a new central concept. » (Posner & *al.*, 1982, p. 214)

Parmi ces éléments appartenant à l'écologie conceptuelle, il semblerait que les anomalies et les idées sur la science et la connaissance soient particulièrement importantes pour mener au changement conceptuel :

Two features of a conceptual ecology, in particular, were shown to guide the change process from one conception to another: 1) anomalies, and 2) fundamental assumptions about science and about knowledge. (Posner & al., 1982, p. 223)

Autres modèles visant la rupture conceptuelle

S'inspirant des travaux de Posner et al., certains chercheurs ont proposé d'autres modèles du changement conceptuel. Ces auteurs adhèrent tous à l'idée qu'il est nécessaire de créer une rupture entre les connaissances antérieures et certaines nouvelles connaissances à cause de leur incompatibilité, mais ils divergent quant à l'identification des facteurs les plus importants dans les processus de changement conceptuel. Pour Larochelle et Désautels (1992), le nouveau paradigme que l'on tente de faire intégrer par les élèves repose sur des bases épistémologiques différentes et incompatibles avec l'ancien paradigme. Dès lors, le plus important dans les processus de changement conceptuel est d'identifier et de modifier les engagements épistémologiques des élèves. Dans la section portant sur l'histoire de la mécanique, nous avons vu que la transition entre la mécanique d'Aristote et celle de Newton repose, au moins en partie, sur la modification des croyances entourant la théorie de la connaissance. Alors qu'Aristote était inductiviste et ne pouvait faire abstraction du frottement, Galilée et Newton adhéraient à une épistémologie beaucoup plus complexe où l'observation pouvait servir à valider des théories « *a prioristes* », ce qui sans doute leur permettait de faire abstraction de frottement. Il n'est pas faux de penser que les élèves doivent, comme Galilée et Newton, modifier leur conception de la nature de la science pour être capable de faire abstraction du frottement et d'accepter que la science soit un processus d'idéalisation qui ne traite plus uniquement du réel directement observable.

Pour Pintrich (1993), les processus de changement conceptuel ne se basent pas uniquement sur des facteurs rationnels : les facteurs extra-rationnels sont également importants. À titre d'exemple, adhérer à une religion plutôt qu'à une autre peut influencer le changement conceptuel sur la théorie de l'évolution ou sur la place de la Terre dans l'univers. Les travaux de Johnston et Southerland (2001) s'inscrivent dans cette même perspective.

* * *

Somme toute, les modèles visant la rupture conceptuelle diffèrent entre eux par l'importance qu'ils accordent aux différents facteurs susceptibles d'influencer le changement conceptuel. Le modèle de Posner et *al.* insiste sur les conceptions elles-mêmes : il faut montrer aux élèves les limites de leurs conceptions et leur en proposer de nouvelles et meilleures. Pour Larochelle et Désautels, les conceptions de paradigmes différents reposent sur des bases épistémologiques différentes: il faut donc modifier les croyances épistémologiques des élèves. Pintrich, tout comme Johnston et Southerland après lui, insiste davantage sur l'existence de facteurs qui ne sont pas rationnels, mais qui influencent tout de même le changement conceptuel. Finalement, Vosniadou (son modèle sera discutée dans la section suivante) postule que les apprenants possèdent un cadre théorique naïf composé de croyances épistémologiques et ontologiques établi tôt lors de l'enfance. Ce cadre conceptuel possède, selon Vosniadou, une grande influence dans les processus de changement conceptuel.

1.1.2 Le modèle de Vosniadou

Postulat du modèle de Vosniadou

Le modèle de Vosniadou (1994) insiste sur le fait que les connaissances des élèves s'inscrivent à l'intérieur d'un cadre théorique (« theoretical framework »). Pour cette auteure, un cadre théorique est établi dès la jeune enfance et forme la base de l'épistémologie et de l'ontologie individuelle :

It is argued that **naive framework theory** of physics is established early in infancy and forms the basis of individuals' ontology and epistemology. The presuppositions of this framework theory act as constraints on the way individuals interpret their observations and the information they receive from the culture to construct specific theories about the physical world. (Vosniadou, 1994, p. 45)

Vosniadou fonde sa théorie sur l'hypothèse que les apprenants possèdent un cadre de référence permettant d'interpréter leurs observations.

Concepts de cadre théorique naïf et de théorie spécifique

La notion de **cadre théorique naïf** réfère à un ensemble organisé de présuppositions à la fois épistémologiques et ontologiques contraignant le processus d'acquisition de connaissances comme les paradigmes de Kuhn ou les programmes de recherche de Lakatos. Parmi les présuppositions épistémologiques, on peut y retrouver l'idée que les choses sont telles qu'elles apparaissent ou encore qu'elles existent seulement si elles sont détectables par les sens ou un autre processus. Le fait que la chaleur ou la froideur soient des propriétés des objets ou encore que la Terre soit solide et stable par définition constituent des exemples de présuppositions ontologiques.

En plus de bénéficier d'un cadre théorique naïf, les apprenants possèdent également des **théories spécifiques**.

A specific theory consists of a set of interrelated propositions or beliefs that describe the properties and behavior of physical objects. Specific theories are generated through observation or through information presented by culture under the constraints of the framework theory. (Vosniadou, 1994, p. 48)

Par exemple, une des croyances des apprenants, dans une théorie spécifique sur les transferts de chaleur, est que le « chaud » peut être transféré à un objet froid par contact direct.

Exemple de cadre théorique naïf et de théorie spécifique

Vosniadou s'est servi de son modèle pour analyser les conceptions des élèves dans différents domaines de la physique (le concept de terre, explication des cycles jour/nuit, concept de chaleur). Dans l'optique de la présente recherche, examinons plus particulièrement son étude du concept de force (Vosniadou, 1994, p. 59-61). Au cours d'une étude impliquant 105 étudiants de 5 à 15 ans, Vosniadou leur a posé des questions portant sur le concept de force. Les résultats ont montré que les réponses de 75% des enfants pouvaient être expliquées en présumant l'existence d'un cadre conceptuel.

D'après cette étude, le cadre théorique naïf relatif au concept de force serait composé de quatre présuppositions (pour cette étude, Vosniadou ne distingue pas les présuppositions épistémologiques des présuppositions ontologiques) : 1) la force est une propriété d'un objet; 2) les objets inanimés ne bougent pas par eux-mêmes; 3) le mouvement d'un objet inanimé nécessite une explication; et 4) les explications devraient être exprimées en terme d'agent causal. Parmi les éléments se rapportant à la théorie spécifique du concept de force, Vosniadou mentionne que : 1) certains objets réagissent à une force externe et d'autres pas; 2) les objets inanimés ont besoin

d'être poussés pour bouger; 3) les objets inanimés arrêtent par eux-mêmes; 4) les objets qui réagissent à une force externe possèdent la propriété du poids et de la force; 5) une force acquise cause le mouvement d'un objet inanimé; et 6) les objets cessent de bouger quand ils acquièrent une force dissipative.

Tableau 2 : Quelques éléments du cadre théorique naïf et de la théorie spécifique concernant le concept de force

Cadre théorique naïf	Théorie spécifique
<ul style="list-style-type: none"> • La force est une propriété des objets. • Les objets inanimés ne bougent pas par eux-mêmes. • Le mouvement des objets inanimés nécessite une explication. • Une explication devrait être formulée en terme d'agent causal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Certains objets réagissent à une force externe et d'autres pas. • Les objets inanimés ont besoin d'être poussés pour bouger. • Les objets inanimés arrêtent de bouger par eux-mêmes. • Les objets qui réagissent à une force externe possèdent la propriété du poids et de la force. • Une force acquise cause le mouvement d'un objet inanimé. • Les objets cessent de bouger quand ils acquièrent une force dissipative.

Le changement conceptuel selon le modèle de Vosniadou

Selon le modèle de Vosniadou, les fausses conceptions « are interpreted as individuals' attempts to assimilate new information into existing conceptual structures that contain information contradictory to the scientific view » (Vosniadou, 1994, p. 45). Au lieu de s'attarder aux conceptions elles-mêmes, l'étude des processus de changement conceptuel doit donc s'attarder davantage au cadre théorique dans lequel s'inscrivent les conceptions de l'élève :

If strongly held presuppositions and beliefs lie at the roots of misconceptions in science learning and are not going to wither away on their own, it is important to understand them and to take them into consideration in the design of instruction. (Vosniadou, 1994, p. 66)

Lors de notre étude de l'histoire de la mécanique, nous avons vu que les croyances cosmologiques d'Aristote avaient eu une influence sur sa théorie du mouvement (tout

comme ses croyances épistémologiques). En effet, le cadre théorique aristotélicien nie l'existence du vide, ce qui rend l'abstraction des forces de résistance d'autant plus difficile.

Parce qu'une théorie préexiste, il faut la déconstruire, sans quoi la nouvelle conception ne pourra jamais être comprise. L'élève continuera d'adhérer à la conception qui est cohérente avec son cadre théorique. Il faut donc rendre les élèves conscients de l'influence que peut avoir le cadre conceptuel auquel ils adhèrent sur leurs observations⁸.

La méthodologie de recherche de Vosniadou

La méthodologie de Vosniadou est relativement simple. Elle consiste à poser plusieurs questions à propos d'un concept en particulier. Les réponses des élèves sont essentiellement verbales, quoiqu'elles puissent également reposer sur des dessins. Comme on suppose l'existence d'un cadre théorique naïf, l'idée à la base de la méthodologie de Vosniadou est de poser des questions qui requièrent la construction de modèles mentaux que l'élève construit à partir du cadre théorique qu'il possède. À partir de la description de ces modèles mentaux, le chercheur infère le cadre théorique que l'élève peut posséder.

Ce ne sont cependant pas toutes les questions qui invitent les élèves à construire des modèles mentaux. Pour cette raison, Vosniadou distingue les questions factuelles des questions génératives. Les **questions factuelles** ne permettent pas de révéler le cadre théorique des élèves, parce que ces derniers peuvent répondre à ces questions par des réponses apprises à l'école qu'ils ne font que répéter. Par contre, les **questions génératives** exigent des élèves qu'ils

⁸ « It is important to teach in ways that make children aware that their beliefs and presuppositions are not true facts but theoretical interpretations which are subject to falsification. » (Vosniadou, 1994, p. 66)

construisent des modèles explicatifs et, selon Vosniadou, ces modèles sont construits à partir du cadre théorique naïf des sujets.

Generative questions confront children with phenomena about which they do not have any direct experience and about which they have not yet received any explicit instruction. Because generative questions cannot be answered through the simple repetition of unassimilated information, they have greater potential to unraveling underlying conceptual structures. (Vosniadou, 1994, p. 50)

Vosniadou donne un exemple de verbalisations illustrant bien la distinction entre les questions génératives et les questions factuelles. Un interviewer demande à une élève quelle est la forme de la Terre (question factuelle) et elle répond spontanément que la Terre est ronde, parce que c'est la réponse qu'elle a apprise à l'école et elle dessine un cercle. Ensuite, l'interviewer lui demande : « si tu marchais et marchais plusieurs jours en ligne droite, où arriverais-tu (« where would you end up ? ») ? » (question générative) L'élève répond qu'elle arriverait dans une autre ville. « Et si tu continues de marcher et encore marcher ? », poursuit l'interviewer. Après avoir pointé un point de la circonférence du cercle qu'elle a dessiné précédemment, elle dit qu'elle arriverait à la limite de la Terre ! La question factuelle l'amenait à dire que la Terre est une sphère et la question générative que la Terre est un cercle plat.

En plus du concept de question générative, une seconde notion s'ajoute à la méthodologie de Vosniadou : le **test de consistance interne**. Il s'agit de vérifier à quel point les réponses des élèves peuvent être expliquées à partir d'un seul modèle mental :

This consists [le test de consistance interne] of determining for each child whether the pattern of his or her responses to all questions investigating a given concept can be explained by the consistent use of single, underlying, "generic" mental model. (Vosniadou, 1994, p. 51)

À partir de la détermination de l'utilisation d'un modèle en particulier à l'aide d'un test de consistance interne, le chercheur peut inférer le cadre théorique sous-jacent à ce modèle.

1.2 Modèle de diSessa visant la continuité conceptuelle

Alors que les modèles visant la rupture conceptuelle postulent l'existence d'un cadre conceptuel relativement bien structuré et influençant le changement conceptuel, les modèles visant la continuité conceptuelle adhèrent davantage à l'idée que les apprenants ne possèdent pas toujours de théories bien développées à propos des sujets sur lesquels nous les questionnons. Selon ce second courant de recherche, les conceptions ne sont pas seulement engendrées par un cadre théorique sous-jacent, mais également par des habitudes interprétatives qui permettent de structurer et d'interpréter les observations. Ces structures interprétatives ne dépendent pas nécessairement d'une théorie et ne sont donc ni systématisées ni toujours utilisées à bon escient. Alors que les modèles cités précédemment cherchaient à déconstruire une théorie déjà établie afin de la remplacer par une autre, compatible avec les conceptions scientifiques que l'on veut enseigner, les modèles de la continuité cherchent plutôt à construire ou organiser un cadre théorique, parce que celui existant n'est que peu structuré. Les deux modèles proposent une interprétation différente des processus de changement conceptuel.

Le modèle phénoménologique de diSessa (1993) s'inscrit dans la perspective de la continuité. Le but avoué de ce chercheur dans son article *Toward an Epistemology of Physics* (diSessa, 1993) est de fonder une épistémologie de la physique intuitive. Il ne s'agit pas de se questionner sur la nature du cadre théorique sur lequel reposent les conceptions des élèves, mais sur les mécanismes souvent intuitifs menant à la formulation d'une interprétation des données de l'expérience sensible et à l'élaboration de conceptions. Dans cette section, nous présentons un résumé de la perspective de diSessa. Après avoir discuté des postulats de cette théorie, nous définirons ce qu'est une primitive phénoménologique (concept-clé de sa théorie), pour ensuite donner des exemples de ces structures primitives d'interprétation. Finalement, nous verrons la signification que prend le changement conceptuel au sein de ce cadre théorique.

1.2.1 Le postulat de la théorie de diSessa

Dès le début de son article, diSessa (1993. p. 105) affirme que son but est de proposer un cadre théorique décrivant comment se comportent les systèmes de connaissance peu organisés⁹. En fait, non seulement un tel système de connaissances présente un faible degré d'organisation, mais il manque relativement de profondeur quant à sa structure de justification et est incapable de résoudre des conflits sur la base des connaissances se trouvant à l'intérieur du système. Selon ce postulat, les conceptions des élèves reposent davantage sur des structures interprétatives intuitives que sur des théories bien élaborées. Dans ce contexte, la différence entre le savoir expert et le savoir novice ne se situe pas au niveau d'une incompatibilité entre deux cadres de référence, mais plutôt au niveau d'une différence de profondeur et de systématisme dans l'utilisation des structures ou habitudes interprétatives.

1.2.2 Le concept de primitive phénoménologique

Les outils intuitifs permettant de formuler une interprétation dans un certain contexte se nomment **primitives phénoménologiques** (p-prims). Il s'agit de petites structures de raisonnement simples découlant de notre expérience du réel et qui nous servent à organiser et interpréter les observations. Elles sont dites *primitives* pour exprimer le fait qu'elles sont souvent auto-explicatives (quelque chose arrive parce que c'est dans la nature de cette chose d'arriver ainsi), mais aussi, et peut-être surtout, parce que ces structures auto-explicatives peuvent être vues comme les éléments primitifs à la base des mécanismes cognitifs (les éléments les plus atomiques et isolés de mémoire que la structure mentale puisse trouver). Elles sont aussi dites *phénoménologiques*, parce qu'elles proviennent souvent d'une interprétation superficielle des données de l'expérience et aussi parce que, une fois établies, elles constituent un vocabulaire riche à travers lequel on se souvient et interprète les

⁹ « I provide a framework for describing and correlating characteristics of weakly organized knowledge systems. »

données de l'expérience. Ce sont en quelque sorte des schémas tout prêts, simples et fonctionnels. Nous donnerons des exemples de primitives phénoménologiques plus loin.

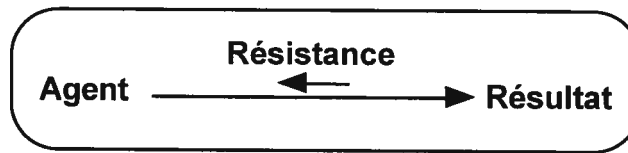
En plus de cette définition, diSessa propose des principes permettant d'identifier les p-prims. Comme ensemble, ces principes peuvent être considérés comme une définition opérationnelle de la notion de p-prim. Limitons-nous à deux de ces principes en guise d'exemples (diSessa en énumère près de vingt) :

- **Principe d'évidence** : Les p-prims s'auto-suffisent, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas besoin d'être expliquées, parce qu'elles sont « évidentes ».
- **Principe d'impénétrabilité** : Les p-prims étant les plus petites unités de raisonnement, elles ne peuvent être expliquées (quoique d'autres p-prims peuvent parfois être reliées à la p-prim étudiée).

1.2.3 Des exemples de p-prims

P-prim d'Ohm. La p-prim d'Ohm est une unité fondamentale de raisonnement qui a la même structure que la loi d'Ohm, d'où son nom. Un agent (la différence de potentiel, U) engendre un résultat (un courant électrique, I). Plus l'agent est grand, plus le résultat est grand. Il s'agit donc d'une relation directement proportionnelle ($I \propto U$). En plus du couple agent-résultat, la p-prim intègre une troisième composante : la résistance (R). Plus la résistance est grande, moins l'agent engendre de résultat. Il s'agit donc d'une relation inversement proportionnelle ($I \propto 1/R$). La deuxième loi de Newton a aussi la structure de la p-prim d'Ohm : la force (agent) procure un résultat (accélération) en présence d'une résistance (masse) qui interfère avec la relation proportionnelle.

Figure 3 : Structure de la p-prim d'Ohm



Force comme agent du mouvement (« force as a mover »). Selon cette p-prim, un objet se déplace toujours dans la même direction que celle où la force s'exerce. Lorsqu'on exerce une force sur un objet initialement au repos, l'objet se dirige dans la même direction que la force exercée. Lorsqu'un objet est en mouvement, il se dirige quand même dans la direction de la force ou du coup exercé, indépendamment du mouvement initial.

Atténuation (« dying away »). Peu importe les conditions externes (avec ou sans frottement), le mouvement s'atténue, diminue d'intensité jusqu'à s'arrêter. Un objet en mouvement finit par s'arrêter. Un pendule qui oscille montre une amplitude d'oscillation sans cesse décroissante. Une soupe se refroidit à cause du temps qui passe.

Annulation (« cancelling »). Cette p-prim concerne les cas d'équilibre dynamique où deux influences s'affrontent l'une, l'autre. La p-prim d'annulation intervient lorsque les deux influences s'annulent mutuellement de sorte que leur action combinée ne produit aucun effet.

Dépassement ou déséquilibre (« overcoming »). Contrairement à la p-prim d'annulation, la p-prim de dépassement peut se manifester dans une situation où les deux influences qui s'affrontent ne présentent pas la même intensité. Lorsqu'une influence l'emporte sur l'autre, l'annulation est rompue.

1.2.4 Le changement conceptuel selon la théorie de diSessa

Mécanismes d'activation des p-prim

Pourquoi un élève utilise-t-il une p-prim plutôt qu'une autre pour structurer son interprétation des observations ? Le processus d'activation (c'est-à-dire le processus de mise à la conscience et d'utilisation) des p-prim dépend de la **reconnaissance** (« recognition »). Selon diSessa, « [recognition] means being cued to an active state on the basis of perceived configurations, which are themselves previously activated knowledge structures » (diSessa, 1993, p. 112). En fait, les p-prim se situeraient à un niveau intermédiaire entre, d'une part, les éléments les plus prêts et les plus influencés par les données de l'expérience et, d'autre part, les idées et concepts relativement conscients. Plus précisément, le contexte influence le niveau inférieur d'investigation et d'interprétation directement relié à l'expérience sensorielle. Le niveau inférieur influence le niveau supérieur, qui est moins directement influencé par le contexte. Dans le modèle de diSessa, les p-prim se situent à un niveau intermédiaire, entre le monde abstrait et le monde concret, entre le monde des idées et celui des perceptions. Ils font en quelque sorte le pont entre les observations immédiates et les connaissances antérieures. Dans ce contexte, le but de l'apprentissage est de stimuler l'activation des bonnes p-prim au bon moment.

Un second concept important du modèle de diSessa est la **priorité d'appel** (« cuing priority »). « The way a particular p-prim's transition to an activate state is affected by other previously activated elements is called *cuing priority* » (diSessa, 1993, p. 112). Ainsi, une haute priorité d'appel signifie que la p-prim est très facilement activée dans un certain contexte et une basse priorité d'appel signifie qu'elle n'est pas facilement activée. Les p-prim à basse priorité d'appel dans un certain contexte ne sont souvent activées que lorsque les p-prim à haute priorité d'appel entraînent des anomalies d'interprétation.

La **priorité de « fiabilité »** (« reliability priority ») est une mesure du degré d'influence que peut avoir l'activation d'une p-prim sur l'état futur de cette même p-prim dû à l'activation d'une autre p-prim par priorité d'appel qui renforce ou supprime la p-prim initiale. Dans son article de 1993, diSessa donne l'exemple de quelqu'un qui devient nerveux, parce qu'il y a beaucoup de monde autour de lui (il y a une forte priorité d'appel : la présence de gens active la nervosité). Parce qu'il est nerveux, l'individu active la p-prim « Est-ce que ma mère est près d'ici ? ». C'est là qu'intervient la priorité de « fiabilité ». Si la mère est là, la nervosité se dissipe (suppression de la p-prim « Je suis nerveux »). Si la mère n'est pas là, la nervosité demeure ou augmente (renforcement de la p-prim « Je suis nerveux »).

Apprentissage selon diSessa

Contrairement à la perspective de la rupture, le modèle de diSessa ne conçoit pas l'apprentissage comme étant un changement de conceptions, mais plutôt un changement dans l'utilisation ou la sélection des p-prim. Apprendre, c'est savoir choisir et utiliser les bonnes p-prim dans les bonnes situations. Un premier apprentissage consiste à modifier la manière d'utiliser les p-prim. Aristote utilisait la p-prim d'Ohm dans son principe fondamental du mouvement. Une force (agent) provoque chez l'objet qui est poussé une vitesse constante (résultat) qui dépend de la résistance du milieu (résistance). Newton utilise la même structure de raisonnement, mais la vitesse est remplacée par l'accélération et la résistance du milieu par la masse (il est également possible que la notion de force n'ait pas la même signification). Un second apprentissage consiste à utiliser une p-prim différente dans un contexte donné.

1.2.5 La méthodologie de recherche de diSessa

Contrairement à Vosniadou, les chercheurs s'inscrivant dans la perspective de diSessa ne cherchent pas directement à découvrir les structures de connaissances

sous-jacentes à l'interprétation des phénomènes qu'expriment les élèves lors des entretiens d'explicitation. Ils cherchent plutôt à décrire et analyser l'itinéraire cognitif que parcourent les élèves lorsqu'ils sont confrontés à des situations-problèmes.

Alors que Vosniadou utilise des questions génératives pour provoquer des verbalisations (les verbalisations découlent alors d'une question), diSessa (1982) et d'autres chercheurs (Legendre, 1997; Potvin, 2002) utilisent parfois des micromondes de mouvement comme des intermédiaires permettant de recueillir des verbalisations (les verbalisations découlent de l'utilisation des micromondes). Comment cela se passe-t-il ? Placé devant une situation-problème informatisée où il peut coordonner différents paramètres (force, masse, angle d'impact, etc.) pour arriver à un certain résultat (par exemple, déplacer une balle à un certain endroit dans un certain intervalle de temps), l'élève est invité à « penser à haute voix », c'est-à-dire à verbaliser les raisonnements qui orientent ses essais.

Dans ce contexte, le rôle du chercheur n'est pas de poser des questions afin de connaître ce que l'élève sait, mais plutôt afin de suivre l'élève dans son raisonnement. Le type de questions posées par l'interviewer lors des entrevues semble avoir une importance toute particulière pour certains chercheurs s'inscrivant dans cette perspective. Vermersh (1994, p. 86) insiste sur l'importance de ne pas forcer l'élève à expliquer pourquoi il pose telle ou telle action : « Au lieu de faire porter à l'élève la charge de l'explication, je vais lui demander de me décrire ce qu'il a fait. Non pas "pourquoi il a fait telle chose ?" » Cette approche du questionnement est fort différente de celle de Vosniadou qui questionne le sujet sans cesse sur le pourquoi de ses affirmations dans le but d'explicitier les modèles mentaux construits à partir des contraintes imposées par le cadre théorique.

Dans la perspective de diSessa, l'analyse des données ne vise pas à identifier des présuppositions épistémologiques ou ontologiques, mais à retracer le parcours de

chacun des sujets. Bref, ce que l'on cherche à décrire est davantage un processus qu'une structure de connaissances déjà bien structurée.

1.3 Comparaison entre les modèles de Vosniadou et diSessa

À ce stade de la réflexion, nous pouvons nous demander lequel des deux modèles décrit le mieux les processus de changement conceptuel des apprenants. Dans les deux cas, l'aspect constructiviste de l'apprentissage n'est pas remis en cause : il est nécessaire de tenir compte des connaissances antérieures pour favoriser une véritable compréhension des concepts scientifiques. Cependant, la nature et surtout le degré d'organisation du système de connaissances antérieures de l'individu ne sont pas perçus de la même façon par les deux courants. Dans le modèle de la rupture de Vosniadou (1994), le système de connaissances est bien organisé, alors que dans celui de la continuité de diSessa, le système de connaissances ne l'est pas.

Tableau 3 : Comparaison entre les modèles de Vosniadou et diSessa

	Modèle de Vosniadou (1994)	Modèle de diSessa (1993)
Postulats (structure des connaissances antérieures)	Un cadre théorique naïf est établi dès la jeune enfance et forme la base de l'épistémologie et de l'ontologie de l'individu (Vosniadou, 1994, p. 45).	Les systèmes de connaissances des apprenants ne sont que faiblement organisés (diSessa, 1993, p. 105).
Concepts	Cadre théorique naïf	Primitive phénoménologique
Qu'est-ce qu'une conception ?	« Misconceptions are interpreted as individuals' attempts to assimilate new information into existing conceptual structures that contain information contradictory to the scientific view » (Vosniadou, 1994, p. 45).	Les conceptions des élèves sont construites à partir de la coordination de p-prims ayant pour but d'interpréter les observations réalisées dans un certain contexte.
Qu'est-ce que le changement conceptuel ?	Le changement conceptuel est un processus de déconstruction d'un cadre théorique naïf.	Le changement conceptuel est un processus d'organisation de la structure des connaissances antérieures dans le but de systématiser l'utilisation correcte des bonnes p-prims dans les bons contextes.

Cette différence plutôt fondamentale est clairement exprimée dans une allocution donnée par Vosniadou et diSessa (Kaufman, Vosniadou, diSessa & Thagard, 2000). Selon Vosniadou, l'approche de diSessa se caractérise ainsi :

One view, expressed by diSessa (1988) is that initial knowledge structures about the physical world consist of an unstructured collection of small knowledge elements, which he calls phenomenological primitives (p-

prims). [...] According to this view the process of conceptual change is one of collecting and systematizing the fragments of knowledge into consistent whole. (Kaufman, Vosniadou, diSessa & Thagard, 2000, p. 3)

Puis, partant du fait que diSessa considère l'apprentissage des sciences comme une démarche d'organisation du système de connaissance de l'apprenant préalablement peu structuré, Vosniadou remet en question l'interprétation de diSessa sur l'absence de connaissances clairement organisées :

Unlike the above view of knowledge acquisition, a number of empirical studies investigating the process of knowledge acquisition in science conducted in our lab, show that preschool children answer questions about force, matter heat, the earth, etc., in a relatively consistent way, revealing the operation of a common explanatory framework. (Kaufman, Vosniadou, diSessa & Thagard, 2000, p. 3)

En résumé, Vosniadou affirme que l'hypothèse de diSessa ne s'accorde pas bien avec certains résultats empiriques et qu'il faut plutôt adopter l'hypothèse inverse : les élèves possèdent un cadre d'interprétation organisé formé de présuppositions à la fois ontologiques et épistémologiques.

In other word, the empirical results support the hypothesis that children's initial conceptual structures are not fragmented as initially thought, but rather, children start the knowledge acquisition process by forming rather narrow but nevertheless internally consistent explanatory frameworks. (Kaufman, Vosniadou, diSessa & Thagard, 2000, p. 3)

S'il est vrai que certains résultats empiriques laissent entendre que les apprenants peuvent posséder un système de connaissances servant de cadre de référence à l'interprétation des phénomènes, il faut dire qu'il existe aussi des recherches empiriques affirmant le contraire. Dans le cadre d'une recherche portant sur les itinéraires cognitifs empruntés par des sujets du secondaire pour construire le sens de situations-problèmes basées sur des micromondes de mouvement, Potvin (2002) met en évidence le fait que les conceptions des élèves ne reposent pas toujours sur un système de connaissances très élaboré. De même, il rapporte que les périodes

de confusion où les sujets n'expriment pas de verbalisations portant sur la signification physique et le sens de leurs essais représentent 85% du temps des entretiens d'explicitation de l'étude.

Au stade actuel de la recherche sur le changement conceptuel, nous ne sommes pas en mesure d'opter de façon absolue pour un cadre théorique en particulier. C'est d'ailleurs l'avis des chercheurs Southerland et *al.* (2001). Dans une recherche portant sur les explications des élèves quant à différents phénomènes biologiques, ces chercheurs utilisent deux cadres théoriques pour analyser les verbalisations des sujets. D'une part, ils utilisent le modèle de Linder (1993) et de Strike et Posner (1992) selon lequel les apprenants possèdent un cadre conceptuel relativement stable dont la structure ressemble à une théorie parce qu'il est fondamentalement cohérent, systématique et consistant. D'autre part, ils utilisent le modèle de diSessa selon lequel « students' explanations of the physical world are not to be a reflection of coherent theories or systematic frameworks, but instead are seen as spontaneous constructions. » (Southerland et *al.*, 2001, p. 329) Ces constructions spontanées résultent de l'activation des p-prims. Les p-prims elles-mêmes sont auto-explicatives et donc ne sont pas explicables par l'apprenant. Selon le premier modèle, les explications des élèves découlent d'un système de connaissances et, selon le deuxième modèle, les explications découlent plutôt de l'activation des p-prims et non d'un réseau de connaissances servant de cadre d'interprétation. Selon Southerland et *al.* (2001), comme il y a peu de recherche sur la nature de la structure de connaissances des apprenants, il est difficile de choisir un modèle plutôt que l'autre.

D'autant plus difficile que les résultats de leur recherche ne démontrent pas que le modèle visant la rupture conceptuelle est à rejeter, puisque les explications des étudiants reflètent leur cadre conceptuel. Cependant, Southerland et *al.* affirment que l'extrême incertitude des explications (« tentativeness of responses ») suggère que le cadre conceptuel des étudiants est non scientifique et, surtout, faiblement construit.

Selon les résultats de l'étude, cela est particulièrement vrai pour les plus jeunes sujets.

If the model of conceptual frameworks is used to understand these findings, we conclude that students have weak, poorly constructed frameworks for biological phenomena [...] (Southerland et al., 2001, p. 343)

En utilisant le modèle de diSessa, ils en viennent à proposer une nouvelle p-prim : le besoin comme une raison au changement (« need as a rationale for change »). Il est donc possible d'analyser les explications des élèves à partir des deux modèles.

Dans l'étude de Southerland et al., il semblerait cependant que la théorie des p-prim ait un pouvoir explicatif plus grand que celle du cadre théorique.

For the topics described in this study, we suggest that p-prim provide a more explanatory construct to understand both the tentative and shifting nature of students' constructions of these biological phenomena than that provided through conceptual frameworks. (Southerland et al., 2002)

À défaut de pouvoir trancher de façon absolue en faveur d'un modèle plutôt qu'un autre, nous pouvons nous interroger sur la pertinence relative de chacun de ces modèles par rapport au but visé par la présente recherche. Comme le concluaient Southerland et al., le pouvoir explicatif du modèle de diSessa est plus grand pour comprendre la dynamique entourant les processus de changement conceptuel et, surtout, la nature évolutive des explications des apprenants. Or, comme le but de cette recherche n'est pas tant de décrire les cadres théoriques des élèves reliés au principe d'inertie que d'analyser l'évolution des raisonnements qualitatifs spontanés émergeant de l'interaction entre les micromondes historiques et les apprenants, le modèle de diSessa semble le mieux adapté à cette étude.

2. Les éléments historiques reliés au développement du principe d'inertie

Nous allons maintenant retracer les grandes lignes de l'évolution des idées de la mécanique aristotélicienne à la mécanique newtonienne. Plus précisément, nous chercherons à identifier les éléments de compréhension les plus significatifs dans le passage de la mécanique d'Aristote à celle de Newton. Pour ce faire, nous décrirons les conceptions aristotéliciennes du mouvement et tenterons d'expliquer leur cohérence avec l'ensemble de la cosmologie aristotélicienne. Par la suite, nous pourrions comprendre comment les scientifiques sont passés de la théorie aristotélicienne à la théorie newtonienne. Finalement, nous identifierons les idées directrices qui serviront à l'élaboration des micromondes découlant de l'analyse de l'histoire des sciences que nous proposons ici.

2.1 La mécanique aristotélicienne

Dans cette section, nous verrons les principales conceptions aristotéliciennes du mouvement ainsi que l'argumentation qui les soutient : nous parlerons du principe du repos qui s'oppose à la notion d'inertie, du principe qualitatif de la chute des corps, de l'explication du mouvement des projectiles, du principe fondamental associant force et vitesse et finalement le principe quantitatif de la chute libre reliant la vitesse de chute au poids de l'objet.

Le principe du repos

Une première conception est que « **Tout mouvement violent¹⁰ est essentiellement périssable** » (Dugas, 1950, p. 21) : tout objet placé en mouvement

¹⁰ Voir section 1.2.1.2 pour les définitions des concepts de mouvement violent et de mouvement naturel.

s'arrêtera. À moins qu'il soit naturel, le mouvement est un état temporaire et instable (contraire au principe d'inertie). Cette conception donne lieu à des prédictions telle que « si je cesse de pousser un objet, il finira par s'arrêter ». Ainsi, en se fondant sur le principe du repos, nous pouvons affirmer que, si un objet n'est soumis à aucune force, il restera immobile s'il est immobile, ou s'immobilisera s'il est en mouvement.

Selon Aristote, l'objet s'arrêtera parce que le milieu exerce toujours une résistance au mouvement¹¹ et donc, tout objet en mouvement s'arrêtera. Si nous poussons plus loin le raisonnement, nous pouvons nous demander pourquoi le milieu exerce toujours une résistance. Il y a deux raisons. La première se trouve dans la croyance métaphysique selon laquelle le vide n'existe pas. Si le vide n'existe pas, le milieu exerce toujours une certaine résistance au mouvement et, donc, tout objet en mouvement violent finit alors par s'arrêter.

La deuxième raison qui pousse Aristote à ne pas faire abstraction du frottement dans ses analyses du mouvement et à affirmer que tout objet en mouvement s'arrêtera se trouve dans ses croyances épistémologiques. Selon Aristote, les lois de la nature originent de l'observation : le philosophe observe tomber une pierre ou se déplacer un objet sous l'effet d'une force motrice et son but est d'expliquer leur mouvement à l'aide de principes et de lois. En fait, il possède une conception inductiviste de la science¹². Ainsi, si Aristote est incapable de considérer l'inertie d'un mouvement, c'est non seulement à cause de la croyance en l'impossibilité du vide, mais également à cause de sa théorie de la connaissance. Pour Aristote, les lois de la nature s'élaborent à partir de l'observation et la science

¹¹ Dans le but d'alléger le texte, les termes « résistance », « frottement » et « friction » renvoient à l'ensemble des forces qui s'opposent au mouvement (résistance de l'air, frottement au sol...), à moins qu'il ne soit autrement précisé dans le texte.

¹² L'inductivisme est une conception de la science selon laquelle les lois et les théories scientifiques proviennent d'un processus d'identification de principes généraux à partir d'observations. Selon Chalmers (1976), cette conception repose sur deux postulats:

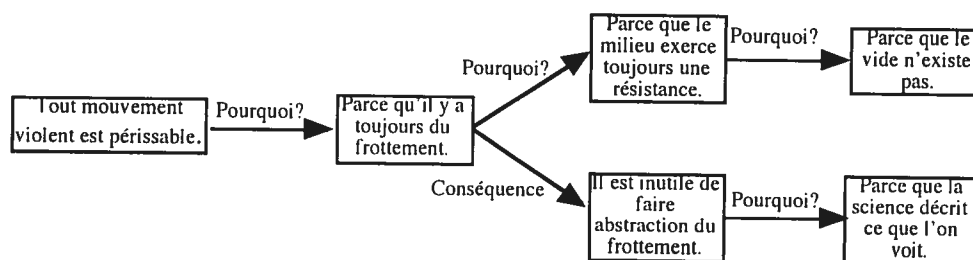
- La science repose sur le principe fiable de l'induction qui permet de généraliser du cas particulier à la règle générale;
- La science débute par l'observation et les données de l'observation constituent un fondement sûr à la connaissance.

cherche à expliquer ce que l'on voit et, ce que l'on voit, c'est que le frottement fait périr le mouvement violent. Jamais le philosophe ne cherche à faire abstraction du frottement ou à le considérer comme une force externe; il le considère plutôt comme une propriété intrinsèque de l'objet. L'analyse du mouvement doit donc inclure le frottement et, comme il est omniprésent, tout mouvement violent est essentiellement périssable. Il est intéressant de noter qu'en supposant l'existence du vide, Aristote arrive à une conception moderne de l'inertie, mais puisque le vide est impossible, il faut rejeter cette inertie :

De plus nul ne pourrait dire pourquoi une chose qui a été mise en mouvement s'arrêterait quelque part; car pourquoi ici plutôt que là ? De sorte que soit elle restera en repos, soit elle sera nécessairement transportée indéfiniment, si rien de plus fort ne l'en empêche. (Aristote, 2002, pp. 235-236)

« **Tout mû est nécessairement mû par quelque chose** » (Aristote, 2002, p. 355). Cette deuxième affirmation d'Aristote est très reliée à la première : tout objet en mouvement est nécessairement mis en mouvement par une force externe et implique une intervention. Comme l'absence de mouvement (repos) est normale, tout mouvement est un bris de l'équilibre présent lors du repos et, pour briser cet équilibre, il faut nécessairement l'intervention d'une force externe. Si l'on demandait à Aristote de justifier cette conception, il argumenterait sûrement que, puisque tout objet en mouvement tend vers le repos (parce que le milieu exerce toujours une résistance), il ne peut être expliqué que par l'intervention d'un agent extérieur.

Figure 4 : Justification du principe de repos selon Aristote



Le principe du mouvement naturel

Pour comprendre le principe du mouvement naturel, il faut savoir qu'Aristote distingue deux types de mouvement¹³ : le mouvement naturel et le mouvement violent (ou forcé). Le **mouvement naturel** résulte de la propriété des corps à se mouvoir vers leur lieu naturel, comme c'est par exemple le cas pour un objet qui tombe. Le **mouvement violent** (qui viole la nature) est celui causé par une force extérieure qui modifie le mouvement naturel ou l'état de repos de l'objet : lancer une pierre en est une illustration.

Selon le principe du mouvement naturel, « [s]i un élément est hors de son lieu naturel, il tend à y revenir » (Dugas, 1950, p. 20). Si aucune force n'est exercée sur un objet dans son lieu naturel, il restera immobile. Cependant, s'il est hors de son lieu naturel, il se déplacera spontanément vers ce lieu. Une pierre tombe au sol parce qu'elle « veut » retourner à son lieu naturel, le centre de la Terre.

Pour Aristote, il existe un ordre dans toutes choses. Pour expliquer la cause du mouvement naturel, Aristote se base sur la théorie des quatre éléments d'Empédocle : la terre tombe dans l'eau comme dans l'air, l'eau tombe dans l'air et le feu, lui, monte dans l'air. Il y aurait donc des éléments possédant plus de pesanteur, alors que d'autres posséderaient plus de légèreté¹⁴. Le **lieu naturel** d'un objet dépend des proportions relatives des éléments qu'il contient. Plus il contient de feu, plus il possède de légèreté, et plus son lieu naturel est élevé. Plus il contient de terre, plus il possède de pesanteur et plus son lieu naturel est bas. Dans ce contexte de déplacement de l'objet vers son lieu naturel, l'espace joue un rôle actif (Goulard,

¹³ Précisons qu'Aristote évoque aussi un troisième type de mouvement : le mouvement volontaire effectué par les êtres vivants capables de se mouvoir volontairement.

¹⁴ Par ordre décroissant de pesanteur: la terre, l'eau, l'air et le feu.

2000). En effet, pour Aristote, l'espace est non seulement fermé et fini, mais il est aussi actif. Si un élément est hors de son lieu naturel, il tend à y revenir et ce qui provoque ce mouvement ce n'est rien d'autre que l'espace actif, puisque tout mû est nécessairement mû par quelque chose. Ce rôle actif de l'air est également souligné dans l'explication du mouvement des projectiles selon laquelle l'air pousse sur la flèche pour qu'elle ait un mouvement continu.

Pourquoi les objets tombent-ils ? Selon le principe du mouvement naturel, il est dans leur nature de tomber, il est dans la nature des objets lourds de se déplacer vers leur lieu naturel : le centre de la Terre.

L'explication du mouvement des projectiles

Compte tenu de ce qui a été dit plus haut, comment Aristote expliquait-il le mouvement ininterrompu d'un projectile, telle une flèche ? Cette explication constitue la plus importante faille du système aristotélicien. Si tout mouvement violent est essentiellement périssable, comment expliquer qu'une flèche par exemple ne s'arrête pas immédiatement ? Comment expliquer cette continuité dans le mouvement ? Comment se fait-il que la flèche ne se déplace pas spontanément vers son lieu naturel ? Puisque tout mû est nécessairement mû par quelque chose, Aristote argumentait que ce devait être l'air qui, en se refermant derrière la flèche, la maintenait en mouvement. Cependant, le mouvement naturel finit par prendre le dessus et la flèche tombe. Précisons que pour Aristote, le mouvement se divise réellement en deux : mouvement causé par la poussée, puis chute. Ces deux mouvements ne se produisent pas simultanément. L'explication qu'apporte Aristote du mouvement des projectiles fera l'objet de sérieuses critiques qui permettront l'élaboration de la théorie de l'impétus plusieurs siècles plus tard.

Le principe fondamental

Que se passe-t-il si on exerce une certaine force sur un objet ? Selon Aristote, **la vitesse sera directement proportionnelle à la force exercée**. Autrement dit, la vitesse d'un objet dépend de la force qu'on exerce sur cet objet. Ce principe fondamental de la mécanique d'Aristote se trouve dans la loi des puissances qui concerne le mouvement forcé ou violent :

[S]i donc A est le moteur, B le mû, la quantité de la longueur qui a été parcourue Γ , et ce dans quoi il est mû c'est le temps Δ , alors dans un temps égal la puissance égale à A mouvra la moitié de B sur le double de Γ , et la mouvra sur Γ en la moitié de Δ . (Aristote, 2000, p. 378)

$$A \propto B \frac{\Gamma}{\Delta} \quad (\text{Équation 1})$$

Autrement dit, en termes actuels,

$$F \propto m \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (\text{Équation 2})$$

ou bien

$$F \propto mv \quad (\text{Équation 3}).$$

Pour qu'un objet se déplace à une vitesse constante, une force constante doit être exercée.

Comment peut-on expliquer des vitesses différentes pour un même moteur ?

La vitesse est aussi inversement proportionnelle à la résistance du milieu. Plus le milieu exerce une résistance, plus la vitesse provoquée par l'action d'une force donnée est petite. Cette conception permet d'expliquer pourquoi la vitesse des objets peut varier selon les milieux. Ainsi, « le corps A sera transporté à travers B pendant le temps Γ , et à travers Δ qui est plus subtil pendant le temps E, si la longueur de B est égale à celle de Δ , <le temps> sera proportionnel à la résistance du corps <qui sert de milieu>. » (Aristote, 2002, pp. 378-379)

Autrement dit,

$$\Delta t \propto R \quad (\text{Équation 4})$$

où t est le temps nécessaire au mobile A pour parcourir la distance B. Ce temps sera plus grand si la résistance (R) du milieu est plus grande. Corollairement, cela veut dire que

$$v \propto \frac{F}{R} \quad (\text{Équation 5}).$$

Plus la résistance du milieu est grande, plus la vitesse du corps sera faible pour une force donnée.

Cela est logique compte tenu de l'ensemble du système aristotélicien. Puisque le milieu exerce toujours une résistance, pour qu'un mobile se déplace à vitesse constante, il faut exercer une force constante sur lui. Notons que cela est rigoureusement vrai dans le cadre de la mécanique classique newtonienne lorsque la force de frottement est égale et opposée à la force exercée. Il en résulte un système dont la force résultante est nulle, c'est-à-dire qui ne comporte pas d'accélération et dont la vitesse est constante comme le prévoit Aristote.

Le principe quantitatif du mouvement naturel ou de la chute des corps

Selon Aristote, « **un corps tombe d'autant plus vite qu'il a de pesanteur** » (Rosmorduc, 1979, p. 67). Autrement dit, la vitesse de chute est proportionnelle au poids de l'objet.

$$v \propto P \quad (\text{Équation 6})$$

Les objets qui ont une plus grande masse tombent plus vite que les autres. Plus un objet est lourd, plus sa vitesse de chute (supposée constante) sera élevée.

Encore une fois, ce principe peut s'expliquer à l'aide des autres éléments de la théorie aristotélicienne du mouvement. Plus le poids de l'objet est grand, plus la force qui provoque le mouvement naturel est grande. Puisque la vitesse est proportionnelle à la force, plus l'objet est lourd, plus il tombe vite. Précisons que

cela est rigoureusement vrai si et seulement si la force de friction de l'air est égale au poids. En effet, ce phénomène est à l'origine du concept de vitesse limite de chute selon lequel un objet en chute libre atteindra une certaine vitesse limite.

Une autre façon de formuler le principe quantitatif du mouvement naturel est de dire que **le temps de chute est inversement proportionnel au poids** : « Si un poids tombe de telle hauteur en tant de temps, un poids double tombe de la même hauteur en un temps moitié moindre. » (Aristote, Traité du Ciel, Livre I cité dans Dugas, 1950, p. 20).

$$\Delta t_{chute} \propto \frac{1}{P} \quad (\text{Équation 7})$$

où P est la pesanteur ou le poids. Plus la masse du corps qui tombe est élevée, plus le temps de chute est petit. Cette conception est le corollaire de la précédente. Plus la vitesse de chute est grande (parce que le poids est grand), plus le temps de chute est court.

Tableau 4 : Conceptions aristotéliennes du mouvement

	Conceptions	Prédications	Exemples de question
Conceptions qualitatives	Principe du repos	« Tout mouvement violent est essentiellement périssable. » (Dugas, 1950, p. 21)	Tout objet placé en mouvement s'arrêtera. Qu'est-ce qui arrive à une bille qui roule sur le sol ? Est-ce qu'un objet peut se déplacer tout seul sans que quoi que ce soit ne pousse sur lui ?
		« Tout mû est nécessairement mû par quelque chose. » (Aristote, 2002, p. 355)	Tout mouvement implique une intervention. Aussi, lorsqu'on exerce une force sur un objet, ce dernier prend la direction de la force, indépendamment du mouvement initial. Pourquoi la Lune tourne-t-elle autour de la Terre ? Qu'est-ce qui fait tourner la Lune ? Qu'arrive-t-il à un ballon en mouvement si je le frappe perpendiculairement à son mouvement ?
	Principe du mouvement naturel	« Si un élément est hors de son lieu naturel, il tend à y revenir. » (Dugas, 1950, p. 20)	Si aucune force n'est exercée sur un objet et qu'il est dans son lieu naturel, alors il reste immobile. Cependant, s'il est hors de son lieu naturel, il se déplace spontanément vers ce lieu. (Ex. : une pierre tombe au sol parce qu'elle veut retourner à son lieu naturel, le centre de la Terre.) Pourquoi une balle tombe au sol, alors que la fumée de la combustion du bois monte dans les airs ? Pourquoi un caillou coule-t-il au fond de l'eau ? Pourquoi la pluie tombe-t-elle ?
	Projectile	« [C]'est l'air entourant le [projectile] qui continue à exercer une force de contact et qui graduellement s'estompe. » (Gingras, Keating & Limoges, 1998, pp. 69-70)	Cet exemple découle des deux principes précédents. Qu'est-ce qui se passe lorsqu'on tire une flèche avec un arc ou lorsqu'on lance une pierre ?

		Conceptions	Prédictions	Exemples de question
Conceptions quantitatives	Principe fondamental	<p>« [S]i donc A est le moteur, B le mû, la quantité de la longueur qui a été parcourue Γ, et ce dans quoi il est mû c'est le temps Δ, alors dans un temps égal la puissance égale à A mouvra la moitié de B sur le double de Γ, et la mouvra sur Γ en la moitié de Δ. (Aristote, 2000, p. 378)</p> $A \propto B \frac{\Gamma}{\Delta}$ <p>Autrement dit, en termes actuels,</p> $F \propto m \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{ ou } F \propto mv$	<p>Pour qu'un objet se déplace à une vitesse constante, une force constante doit être exercée.</p>	<p>Si on pousse sur la table de façon constante, que va-t-il se passer ? Et si je pousse de façon constante, mais avec une plus grande force ?</p>
		<p>Ainsi le corps A sera transporté à travers B pendant le temps Γ, et à travers Δ qui est plus subtil pendant le temps E, si la longueur de B égale à celle de Δ, <le temps> sera proportionnel à la résistance du corps <qui sert de milieu>. (Aristote, 2000, p. 236)</p> $t \propto R$	<p>Plus la résistance du milieu est grande, plus la vitesse du corps sera faible pour une force donnée.</p> <p>En langage actuel,</p> $v \propto \frac{F}{R}$	<p>Que se passe-t-il si je pousse la même table avec la même force, mais dans l'eau ?</p>
	Chute des corps	<p>« [U]n corps tombe d'autant plus vite qu'il a de pesanteur » (Rosmorduc, 1979, p. 67)</p> $v \propto P$ <p>où P est la pesanteur ou le poids.</p>	<p>Les objets qui ont une plus grande masse tombent plus vite que les autres. Plus un objet est lourd, plus sa vitesse de chute (supposée constante) sera élevée.</p>	<p>Les objets tombent-ils tous de la même façon ? Est-ce qu'une plume tombe plus vite qu'une bille d'acier ? Si je double le poids d'un objet, prendra-t-il moins de temps à tomber ? Combien ?</p>
	<p>« Si un poids tombe de telle hauteur en tant de temps, un poids double tombe de la même hauteur en un temps moitié moindre. ». (Aristote, Traité du Ciel, Livre I cité dans Dugas, 1950, p. 20)</p> $\Delta t_{chute} \propto \frac{1}{P}$ <p>où P est la pesanteur ou le poids.</p>	<p>Plus la masse du corps qui tombe est élevée, plus le temps de chute est petit.</p>	<p>Une plume prend-t-elle plus de temps à tomber qu'une bille ?</p>	

* * *

En conclusion, la mécanique aristotélicienne possède donc une cohérence théorique solide. Les conceptions s'expliquent l'une l'autre et l'ensemble ne se contredit pas. Cependant, certaines conceptions de base reposent sur des croyances avec lesquelles on peut ne pas être en accord. **La première** de ces croyances : il faut que le frottement soit traité comme une force intrinsèque à l'objet et omniprésente dans le milieu. Cela découle de la croyance en l'impossibilité du vide (comme le vide n'existe pas, il y a toujours du frottement) et en la nature inductive de la science (la science étant l'élaboration de principes généraux à partir de ce que l'on voit, et ce que l'on voit étant l'omniprésence du frottement, alors la mécanique ne peut pas faire abstraction du frottement). **La deuxième** croyance : l'espace est actif (pour qu'un objet retourne à son lieu naturel et tombe au sol, il doit être poussé par le milieu puisque tout mû est nécessairement mû par quelque chose).

Tableau 5 : Postulats à l'origine des conceptions du mouvement d'Aristote

Postulats		Conséquences
Essentiellement relié au principe de repos et d'inertie	Le vide n'existe pas.	L'étude du mouvement ne peut faire abstraction du frottement : 1) puisque le vide n'existe pas, il y a toujours du frottement et 2) puisque l'on observe toujours le frottement et que la science doit généraliser à partir de ce qui est observé.
	La connaissance se construit par induction.	
Essentiellement relié à la chute des corps et à la gravité	L'espace joue un rôle actif.	Les objets qui ne sont pas dans leur milieu naturel se déplacent vers ce dernier et, puisque tout mû est nécessairement mû par quelque chose, l'espace autour de l'objet qui doit constituer le moteur.

2.2 Vers la mécanique newtonienne

Il ne faudrait pas critiquer trop facilement la mécanique aristotélicienne. Qui n'est pas d'accord avec le fait que tout objet en mouvement finisse par s'arrêter ? Chaque fois que l'on met un objet en mouvement sur Terre, il finit par s'arrêter, à moins que l'on exerce une force constante sur lui. Qui n'est pas d'accord avec le fait

qu'il soit nécessaire d'exercer une force constante sur un objet pour maintenir une vitesse constante ? Ne doit-on pas pousser constamment pour déplacer une lourde table ? Qui n'est pas d'accord avec le fait que les objets lourds tombent plus vite que les légers ? Lancez une plume et un boulet de canon par la fenêtre et vous constaterez effectivement que le boulet touche le sol avant la plume. En fait, la mécanique aristotélicienne peut-être perçue comme un système théorique très valable tant que la force de frottement est plus grande (dans le cas d'un objet où l'on n'exerce aucune force) ou égale à la force exercée (dans le cas d'un objet que l'on pousse ou qui tombe). Lorsqu'on pousse une table suffisamment lourde, la force de frottement égale la force appliquée, même si cette dernière est relativement élevée. La somme des forces est nulle. Donc, selon la mécanique newtonienne, l'objet doit être immobile ou se déplacer à une vitesse constante. Lorsqu'on laisse tomber des objets légers (dont la force gravitationnelle n'est pas trop importante), alors la force de frottement peut égaler la force gravitationnelle et l'objet tombe à une vitesse constante. Plus l'objet est lourd, plus la vitesse limite de chute sera élevée et plus l'objet tombera vite. La mécanique aristotélicienne est donc parfaitement en accord avec la mécanique newtonienne tant et aussi longtemps que la force appliquée ne dépasse pas celle du frottement.

Mais, quand la force de frottement n'égale pas la force exercée, il en résulte une accélération, et la mécanique aristotélicienne ne tient plus. En fait, dès que le frottement est très faible et négligeable, les conceptions d'Aristote ne permettent plus d'expliquer le mouvement. Si Aristote avait imaginé un monde sans frottement ou simplement certaines situations où le frottement est négligeable, il aurait peut-être fait l'hypothèse que le principe du repos ne tient pas, que les objets que l'on pousse accélèrent et que les objets tombent tous de la même façon. À cause peut-être de ses postulats implicites (le vide n'existe pas; la science se construit par induction), Aristote est incapable de faire abstraction du frottement qu'il considère comme une propriété intrinsèque à tout objet en mouvement.

Il faudra plus de mille ans avant que la théorie aristotélicienne ne soit remise en cause. Et elle ne le sera selon l'historien Rosmorduc (1979, p. 69) que sur un aspect relativement mineur : celui du mouvement des projectiles. Cette critique mène à l'élaboration de la théorie de l'impétus - beaucoup plus près du principe d'inertie que le principe du repos proposé par Aristote - et aux travaux de Galilée qui contribueront en grande partie à l'élaboration de la mécanique newtonienne.

Buridan et la théorie de l'impétus

Comme nous l'avons mentionné plus haut, la faiblesse de la mécanique d'Aristote se retrouve dans les cas où le frottement est négligeable. Il n'est donc pas surprenant que la critique s'appuie sur un phénomène où le frottement est négligeable, soit celui du mouvement des projectiles et, en particulier, des flèches.

Le premier à remettre en cause l'**explication du mouvement des projectiles** est Philopon, au 6^e siècle. Pour plusieurs raisons, ses critiques ne seront pas entendues. Ce n'est que beaucoup plus tard, au Moyen Âge, qu'une critique très similaire à celle de Philopon sera écoutée, soit celle du Buridan. Selon cette critique, l'explication du mouvement des projectiles d'Aristote n'est pas juste. Il faut dire que les machines à lancer des projectiles se multiplient et que les gens sont beaucoup plus souvent témoins du mouvement des projectiles. Selon Goulard (2000) et Rosmorduc (1979, p. 69), cela aide peut-être Buridan à formuler sa critique qui comporte au moins quelques exemples permettant de contredire Aristote (Goulard, 2000; Dugas, 1950, p. 49). Il fait remarquer qu'une roue continue à tourner, même si l'air ne peut pas pousser derrière elle pour la mettre en mouvement et qu'il en est de même pour la toupie et la meule du forgeron. Il fait aussi remarquer que les flèches à forme aiguisée à l'arrière (où s'engoufre l'air qui pousse) ne vont ni plus, ni moins vite. Les anomalies de la théorie d'Aristote sont maintenant dévoilées.

Buridan ne fait pas que critiquer l'explication du mouvement des projectiles d'Aristote, il propose en plus une explication alternative. Souvenons-nous que, pour garder un objet en mouvement, il faut constamment pousser sur cet objet selon le principe du repos d'Aristote, pour qui ce moteur était l'air. Pour Buridan (et Philopon), la flèche n'a pas besoin de moteur. Lorsqu'on la lance, elle emmagasine une certaine quantité d'énergie ou de mouvement que l'on nomme **impétus**. Cet impétus diminue au cours de son parcours à cause de la résistance de l'air. Quand l'impétus est épuisé, la flèche tombe au sol en raison de la pesanteur. Buridan s'exprime en ces termes :

Tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime un certain *impetus*, une certaine puissance capable de mouvoir ce mobile dans la même direction où le moteur meut le mobile [...]. C'est cet *impetus* qui meut la pierre, après que celui qui la lance a cessé de la mouvoir; mais, par la résistance de l'air [...], cet *impetus* s'affaiblit continuellement; dès lors la pierre se ralentit sans cesse. Cet *impetus* finit par être vaincu et détruit à tel point que la gravité l'emporte sur lui [...] (cité dans Dugas, 1950, p. 49)

L'impétus de Buridan croît avec la vitesse (plus le moteur lance la flèche rapidement, plus elle aura d'impétus et plus elle ira loin) (Dugas, 1950, p. 50) et avec la masse (Dugas, 1950, p. 49-50). De plus, la théorie de l'impétus explique l'accélération des objets qui tombent :

[la] gravité imprime un certain *impetus* au corps pesant, *impetus* qui meut le corps en même temps que la gravité; le mouvement devient alors plus rapide; mais plus il devient rapide, plus l'*impetus* devient intense; on voit donc que le mouvement ira continuellement en s'accélération. (cité dans Dugas, 1950, p. 50)

Ajoutons à cette description de la théorie de l'impétus que Buridan continue à croire que la force est proportionnelle à la vitesse (Goulard, 2000, p. 70).

Ce traitement de l'étude du mouvement des projectiles est très différent de celui proposé par Aristote. Il donne un nouveau statut au frottement. Pour Aristote,

le frottement fait arrêter les objets de telle façon qu'il faille pousser constamment un objet pour le maintenir en mouvement. Pour Buridan, la flèche n'a pas besoin d'être poussée constamment pour se mouvoir. En lui donnant un élan, on lui insuffle un certain impétus qui la maintiendra en mouvement tant que la résistance de l'air ne l'aura pas épuisée. On se rapproche considérablement du principe d'inertie. Dugas (1950, p. 51) va même jusqu'à affirmer qu'il « est important de noter, comme un germe du principe moderne d'inertie, le fait que Buridan affirme que l'*impetus* durerait indéfiniment s'il n'était pas diminué par une résistance de milieu, ou modifié par quelque cause influant sur le mobile ».

Comme la présente analyse historique vise à comprendre le passage de la mécanique aristotélicienne à la mécanique newtonienne et, plus particulièrement, du principe du repos au principe d'inertie, il est pertinent de se demander de quelle manière Buridan a réussi à se rapprocher de la formulation moderne du principe d'inertie. Comment a-t-il fait pour dépasser le modèle aristotélicien ? Il n'y a pas de réponse simple. Plusieurs raisons sont sans doute liées au contexte (nous savons que les machines à lancer des projectiles étaient beaucoup plus nombreuses qu'auparavant). Mais un élément est à retenir plus particulièrement : même si, dans la plupart des circonstances de la vie de tous les jours, la mécanique aristotélicienne s'applique, il y a des cas où le frottement est négligeable. En étudiant un de ces cas (le mouvement d'une flèche), Buridan est amené à une conception qui se rapproche considérablement du principe d'inertie moderne.

Bien que Buridan ait fait, en élaborant sa théorie de l'impétus, un pas important, il reste imprégné d'aristotélisme : « La tentative de Buridan est intéressante. La démarche générale certes reste marquée d'aristotélisme. Simplement au sens commun général est substitué celui des ingénieurs-fabricants les machines de jet » (Rosmorduc, 1979, p. 70). Il utilise souvent le même vocabulaire qu'Aristote (mouvement naturel, mouvement violent), croit toujours que la vitesse est proportionnelle à la force exercée et n'arrive pas à formuler clairement le principe d'inertie, quoiqu'il s'en approche. Buridan croit toujours qu'il est nécessaire qu'il y

ait un moteur pour engendrer le mouvement et que « *l'impetus* est une réalité permanente distincte du mouvement local d'un projectile » (Dugas, 1950, p. 51). Buridan adhère donc toujours à la mécanique aristotélicienne en demeurant incapable de faire totalement abstraction du frottement, mais il se distingue d'Aristote en proposant une explication différente du mouvement des projectiles.

Revenons aux postulats à la base de la mécanique aristotélicienne. Les écrits consultés ne permettent pas de confirmer si Buridan croyait ou non au vide. Comme la critique de Buridan ressemble à celle de Philopon, il est intéressant d'examiner le point de vue de ce dernier : « [r]ien n'empêche un homme de lancer une pierre ou une flèche, lors même qu'il n'y aurait d'autre milieu que le vide. Le milieu gêne le mouvement des projectiles qui ne peuvent avancer sans le diviser » (cité dans Dugas, 1950, p. 47). Philopon était donc, pour sa part, capable d'imaginer le vide et on peut présumer qu'il en était de même pour Buridan. Mais, une chose est cependant certaine : Buridan reste fondamentalement inductiviste. On peut même lui reprocher, comme Aristote, d'avoir « trop » tenu compte de l'observation et de ne pas avoir poussé plus loin l'abstraction (abstraction du frottement, par exemple). Pour ce qui est du rôle actif de l'espace, rien n'est clair à ce sujet, mis à part que l'air n'est plus actif dans le mouvement des projectiles, contrairement à ce que prônait Aristote.

Galilée et le principe d'inertie

La force de Galilée réside sans doute dans sa **démarche**. Il fait abstraction du frottement et le considère comme une entité à part. Il est capable de construire une théorie et, mieux encore, se sert d'un *a priori* conceptuel pour développer des expériences afin de lui permettre de valider ses affirmations. Nous ne sommes pas ici dans un mode de pensée purement inductif : Galilée observe comme Aristote, mais son observation est guidée par un cadre conceptuel qui lui permet de faire abstraction du frottement et de le considérer comme étant accidentel. En plus de ne pas être inductif, Galilée croit au vide et adhère à l'atomisme (Gingras, Keating & Limoges,

1998). Il est beaucoup plus facile de croire en la pertinence de faire abstraction du frottement lorsque l'on admet l'existence du vide et la possibilité, donc, d'une absence totale de frottement. L'espace de Galilée, parce que le vide existe, est beaucoup plus passif et absolu, au sens de Newton, que ne l'était celui d'Aristote. L'espace est la scène où se déroule le mouvement, mais il s'agit d'un spectateur passif. Galilée est donc mieux outillé que ses prédécesseurs pour aborder le problème du mouvement, parce qu'il pose le problème d'une autre façon : et si le frottement n'était qu'accidentel et qu'on le négligeait, quelles seraient les lois du mouvement ?

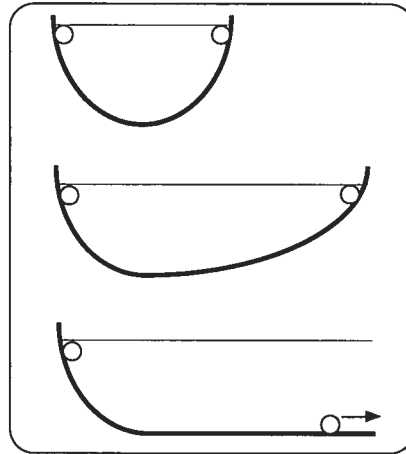
Galilée est le premier à formuler clairement le **principe d'inertie**¹⁵ : un corps au repos ou en mouvement constant (vitesse et direction constante) conserve ce mouvement ou ce repos tant et aussi longtemps qu'il n'est pas perturbé par une force extérieure. Selon la mécanique d'Aristote, le repos est l'état d'équilibre auquel aspire tout corps : le mouvement n'est pas naturel et c'est pourquoi tout objet en mouvement s'arrête. Selon la nouvelle mécanique, celle de Galilée, l'état d'équilibre est soit l'immobilité, soit le mouvement à vitesse constante. Le mouvement n'est donc plus considéré comme un état passager, mais plutôt comme un état permanent (jusqu'à ce qu'une force extérieure s'exerce sur le mobile). Ceci entre en contradiction avec nos observations quotidiennes, beaucoup plus près de la mécanique aristotélicienne que du principe d'inertie. Ce n'est pas tous les jours qu'on observe un objet qui ne s'arrête jamais, tout en n'étant mû par aucune force !

Galilée avait imaginé une expérience sur un plan incliné recourbé pour prouver l'inertie des corps (voir figure 3). La bille est placée à une certaine hauteur à gauche sur la rampe. Lorsqu'on relâche la bille, elle descend, puis remonte à la même hauteur à droite. Si on diminue l'angle de la partie droite de la rampe (pour que la bille monte moins rapidement), la bille ira plus loin, mais s'arrêtera toujours à

¹⁵ Des historiens attribuent plutôt à Descartes la première formulation du principe d'inertie et affirment que la notion d'inertie de Galilée n'était pas tout à fait juste parce qu'il s'agissait d'une inertie d'un mouvement circulaire, à la surface de la Terre (Goulard, 2000; Gingras, Keating & Limoges, 1998, p. 246).

la même hauteur, c'est-à-dire à la hauteur initiale. Maintenant, si la partie de droite est horizontale et sans frottement, la bille, ne pouvant jamais atteindre la hauteur de départ, continuera indéfiniment son chemin : elle ne s'arrêtera jamais.

Figure 5 : Expérience sur l'inertie de Galilée



Tout comme le principe d'inertie, la **loi de la chute des corps** de Galilée, selon laquelle tous les corps accélèrent de la même façon en tombant et ce, peu importe leur poids, n'est pas du tout conforme au sens commun. Ce ne sont pas tous les objets qui tombent. Ceux qui tombent ne le font pas tous de la même manière. On ne peut pas toujours observer un mouvement uniformément accéléré. Par contre, si l'on est capable d'imaginer un milieu vide (donc absent de tout frottement), la plume tombera aussi vite que le fer.

Une des difficultés auxquelles Galilée a dû se mesurer est la **décomposition du mouvement**. Pour expliquer le mouvement des projectiles, il faut être capable de décomposer le mouvement. La composante horizontale du mouvement est sujette à l'inertie puisqu'aucune force horizontale n'agit sur le projectile si le frottement est négligeable. Horizontalement, le projectile se déplacera donc à une vitesse constante. La composante verticale du mouvement est soumise quant à elle à la force de gravité. Verticalement, le projectile tombera donc comme s'il n'y avait pas de mouvement horizontal. Dans ses *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde*, Galilée

présente la situation suivante : si on lance une balle du haut du mât d'un bateau en mouvement, où tombera la balle ? Au pied du mât ou un peu en arrière ?

Dans son étude du mouvement, Galilée ne se préoccupe jamais de la cause du mouvement. Il ne fait que décrire le mouvement (d'une façon beaucoup plus mathématique) en construisant des expériences où le frottement s'avère négligeable. Il n'est alors que très peu question des causes de la chute des corps. De la même manière, Galilée ne se questionne pas directement sur l'effet d'une force sur un objet (la force est-elle proportionnelle à la vitesse ou l'accélération ?). Newton se penchera sur ces questions.

Newton et la mécanique classique

La contribution de Newton aura surtout été de synthétiser le savoir de son époque par les **trois lois du mouvement** et de nous proposer la loi de la gravitation universelle comme explication à la chute des corps. Commençons par les trois lois de Newton. La première loi est une formulation du principe d'inertie : tout corps au repos conserve son état de repos et tout corps en mouvement uniforme conserve son mouvement si aucune force n'agit sur ce corps. On peut voir cette première loi comme un cas particulier de la deuxième loi lorsque la résultante des forces exercées sur un objet est nulle. La deuxième loi est à l'effet que la force est proportionnelle à l'accélération et non à la vitesse. Il n'est pas nécessaire selon Newton de pousser constamment sur un objet pour le garder en mouvement constant. En fait, non seulement il n'est pas nécessaire de le faire, mais si l'on exerce une force constante la vitesse de l'objet augmentera. La troisième loi affirme que, si l'on exerce une force sur un corps, ce dernier exerce une force égale et opposée sur nous : la Terre attire la Lune et la Lune attire la Terre.

Examinons maintenant la **loi de la gravitation universelle** de Newton. Si un objet tombe, ce n'est pas parce qu'il veut retourner à son lieu naturel, mais parce que

tous les corps possédant une masse non nulle sont attirés les uns par les autres. La Lune est attirée par la Terre, mais aussi tout objet l'est. Parce qu'il possède une masse, le crayon tombera. Parce qu'elle possède une masse, la plume tombera. S'il n'y avait pas d'air, tous les objets tomberaient de la même façon, peu importe leur forme et leur poids. La force de gravité ne dépend, selon Newton, que de la masse de chacun des objets qui s'attirent et de la distance qui les sépare.

On remarquera que le frottement est totalement éclipsé du système newtonien. Lorsque le frottement n'est pas négligeable, il est tout simplement soustrait des autres forces agissant sur l'objet étudié. L'avantage principal de la mécanique newtonienne sur la mécanique aristotélicienne est de pouvoir expliquer les cas où le frottement est négligeable. Rappelons-nous que le système d'Aristote est excellent pour expliquer les phénomènes les plus communs de la vie quotidienne. Cependant, dès que le frottement est négligeable, il faut passer par des détours plus ou moins cohérents pour expliquer le phénomène : c'est le cas avec le mouvement des projectiles. Selon Aristote, pour maintenir un objet en mouvement, il faut un moteur. Comme la flèche reste en mouvement, il faut trouver un moteur. Comme personne ne pousse sur la flèche une fois lancée, ce ne peut qu'être l'air qui agit comme moteur. Pour Newton, l'explication s'inscrit en parfaite cohérence avec son système : au départ, on pousse durant une fraction de seconde pour mettre l'objet en mouvement et le faire accélérer (pour lui donner une certaine quantité de mouvement). Ayant pris une certaine vitesse, il ne fait que poursuivre sa route à cause du principe d'inertie. Au niveau des postulats, Newton se démarque ainsi d'Aristote et s'approche beaucoup de Galilée : il croit au vide sans problème, il n'est pas purement inductif et il croit que l'espace est passif, inerte.

2.3 Les éléments à retenir pour l'élaboration des micromondes

Au niveau des postulats comme des conceptions, la mécanique d'Aristote et celle de Newton diffèrent complètement. Aristote croit que le vide n'existe pas;

Newton croit à l'existence du vide. Lorsqu'on croit au vide, il est sans doute plus facile d'imaginer des mondes sans frottement. Aristote observe, puis décrit ce qu'il voit. La démarche de Newton est plus complexe. Il utilise l'observation par le biais d'expérimentations dont plusieurs variables sont contrôlées afin de vérifier ses hypothèses théoriques. Il ne construit pas une théorie à partir de l'observation, mais construit une observation pour prouver la validité de sa théorie préalablement élaborée. En évitant de construire à partir d'observations directes, Newton se permet d'abstraire le frottement de son analyse, d'où la première et la deuxième loi du mouvement. Aristote pense que l'espace n'est pas complètement passif, puisqu'il pousse les objets vers les lieux naturels; Newton pense que l'espace est passif, absolu et en tout point identique. Bref, les idées d'Aristote et de Newton diffèrent sur bien des points.

Tableau 6 : Comparaison entre la mécanique aristotélicienne et la mécanique newtonienne

Mécanique aristotélicienne		Mécanique newtonienne	
Postulats	Conceptions	Conceptions	Postulats
Le vide n'existe pas.	Tout objet en mouvement s'arrête. (L'air pousse donc derrière la flèche pour qu'elle reste en mouvement.)	Tout objet en mouvement reste en mouvement. (La flèche mise en mouvement reste en mouvement.)	Le vide existe.
La connaissance scientifique se construit par induction.	Si on pousse sur un objet, il se déplace à une vitesse constante.	Si on pousse sur un objet, sa vitesse augmente.	La connaissance se construit en vérifiant des théories à l'aide d'expériences.
L'espace joue un rôle actif.	Les objets tombent pour retourner à leur lieu naturel; les objets plus lourds tombent plus vite.	Les objets tombent parce que tous les corps s'attirent; les objets tombent tous de la même façon.	L'espace est passif.

D'abord, on peut imaginer des situations où le frottement n'est pas du tout négligeable, où les objets en mouvement s'arrêtent et où les objets poussés se déplacent à une vitesse constante, c'est-à-dire des situations où le cadre aristotélicien s'avère efficace. Si l'on veut aborder la chute libre, on peut utiliser des objets virtuels qui possèdent une vitesse limite de chute très basse : ces objets pourraient

atteindre rapidement leur vitesse constante limite de chute et les objets plus lourds tomberaient plus vite.

Après avoir abordé des situations conformes au sens commun et à la théorie mécanique d'Aristote, on pourrait placer les élèves en contact avec des **situations où le frottement est partiellement négligeable**. L'exemple de la flèche tant discuté dans l'histoire de la mécanique semble tout indiqué à cet égard. Même chose pour la chute libre : on peut imaginer des situations où le frottement est négligeable et où les objets tombent d'une façon similaire.

Ensuite, il convient de traiter des exemples utilisés par Galilée pour expliquer le principe d'inertie ou la chute libre. Ces exemples peuvent être idéalisés et faire totalement **abstraction du frottement**. Une première situation aurait recours aux plans inclinés de Galilée (voir figure 3). Une seconde situation exploiterait l'exemple de la boule que l'on lance du haut du mât d'un bateau.

Pour conclure, il sera intéressant de revenir à des situations où le frottement est non négligeable, afin d'étudier si l'élève en fera un traitement aristotélicien ou newtonien.

Tableau 7 : Liste des micromondes inspirés de l'histoire de la mécanique

	Situations	Éléments impliqués
Mécanique aristotélicienne	<p>Frottement non négligeable ($F_{\text{frottement}} \geq F_{\text{appliquée}}$)</p> <p>a) pousser un cube qui frotte au sol avec différentes forces et différentes masses;</p> <p>b) laisser tomber un cube dont la masse et le volume sont variables.</p>	<p>Principe du repos Principe fondamental</p> <p>Principe du mouvement naturel</p>
Mécanique de l'impétus	<p>Frottement partiellement négligeable ($F_{\text{frottement}} < F_{\text{appliquée}}$, $F_{\text{frottement}} \neq 0$)</p> <p>c) propulser une flèche.</p>	<p>Impétus Remise en question du principe de repos</p>
Mécanique classique	<p>Frottement négligé ($F_{\text{frottement}} = 0$)</p> <p>d) faire rouler des balles de différentes hauteurs sur des plans d'inclinaison variable (voir figure 4);</p> <p>e) faire tomber une balle du mât d'un bateau.</p>	<p>Principe d'inertie (d'un objet qui ne tombe pas)</p> <p>Décomposition du mouvement Principe d'inertie (d'un objet qui tombe)</p>

L'idée centrale à la construction des micromondes est de débiter par des situations où la mécanique d'Aristote est valide et de se diriger vers des situations où le frottement est négligeable et où la mécanique d'Aristote ne s'applique plus.

3. Les questions de recherche

La présente étude cherche à évaluer si l'utilisation de micromondes historiques permet de favoriser les processus de changement conceptuel. Lorsque nous avons abordé la problématique, nous avons formulé la question de recherche comme suit :

Quels sont les effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel reliés au principe d'inertie chez les élèves de la cinquième année de l'enseignement primaire?

Selon le modèle de diSessa, les conceptions sont construites à partir des p-prim et le changement conceptuel passe par une réorganisation de l'utilisation ou de la coordination des paramètres à l'intérieur d'une p-prim. Il s'agit de savoir utiliser la bonne p-prim de la bonne façon et dans le bon contexte. Lors d'un processus de changement conceptuel, l'élève est donc amené à passer d'une utilisation superficielle et peu organisée des p-prim à une utilisation reposant sur des mécanismes systématiques et organisés, d'où les questions spécifiques de recherche suivantes :

- 1. Les situations permettent-elles l'activation de p-prim ? Si oui, lesquelles et comment les élèves les utilisent-ils (comment sont coordonnés les paramètres à l'intérieur des p-prim) ?**
- 2. Quels sont les priorités d'appel et de «reliabilité» des p-prim utilisés?**
- 3. Les situations permettent-elles aux élèves de remettre en question l'utilisation de leurs p-prim ? Comment évolue l'utilisation des p-prim au cours des situations ?**
- 4. Est-ce que le parcours de l'élève à travers les micromondes permet d'organiser et de systématiser leur utilisation des p-prim? (les mécanismes d'activation des p-prim sont-ils récurrents et tenant compte du contexte) ?**

Cadre méthodologique

Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous aborderons les aspects méthodologiques de la présente recherche s'intéressant aux effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement : comment les sujets ont-ils été choisis ? Quelles sont les principales caractéristiques des micromondes historiques utilisés ? Comment se déroulent les entrevues et la collecte des données ? Et comment les données sont-elles analysées ?

1. Les sujets

Les sujets proviennent d'une école primaire publique de la Commission scolaire de Montréal accueillant, sur une base sélective, des élèves doués de la grande région montréalaise. Cette école est une école à vocation scientifique.

Les élèves étudient en cinquième année. Ils sont disponibles après l'école et demeurent donc au service de garde après les classes. Ils s'engagent volontairement à participer à l'étude selon un horaire pré-établi. Ils savent que le but n'est pas d'évaluer leur performance, mais leur façon d'explorer les micromondes. Six élèves sont retenus pour participer à cette étude.

2. Les micromondes historiques

Les micromondes historiques utilisés au cours de cette recherche sont élaborés à partir d'un logiciel de simulation nommé *Interactive PhysicsTM 3.0*. D'aspect très convivial et ressemblant à plusieurs égards à un logiciel de dessin, notamment en raison de son interface, ce logiciel permet de visualiser le comportement d'objets placés dans un environnement respectant les lois du mouvement de Newton. Dans ce logiciel, les dessins (cercle, rectangle, etc.) sont considérés comme des objets ayant

certaines propriétés que l'on peut définir (masse, élasticité, coefficient de frottement, etc.). Ces objets sont placés dans un environnement dont l'utilisateur contrôle la plupart des variables (résistance de l'air, gravité, etc.). Lorsqu'on démarre une situation impliquant une sphère soumise au champ de gravité terrestre, on peut observer la balle tomber comme si l'on avait réellement réalisé l'expérience.

Dans cette section, nous décrivons les caractéristiques des micromondes historiques construits à partir d'*Interactive Physics™*. Les deux premières situations se rapportent à la mécanique aristotélicienne, la troisième à la théorie de l'impétus et les deux dernières à la mécanique classique.

2.1 Situations relevant de la mécanique aristotélicienne

Les différents paramètres des deux premières situations ont été définis de telle sorte que les objets impliqués se comportent en respectant les principes mécaniques d'Aristote. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la mécanique aristotélicienne est rigoureusement vraie (selon le cadre newtonien) à condition que la force de frottement soit supérieure ou égale à la force appliquée. En créant les deux premières situations, nous nous sommes assurés que les paramètres ne pouvaient pas varier au-delà d'une certaine limite au-delà de laquelle le cadre aristotélicien n'aurait plus été valable.

Situation 1 : une boîte glissant sur le sol

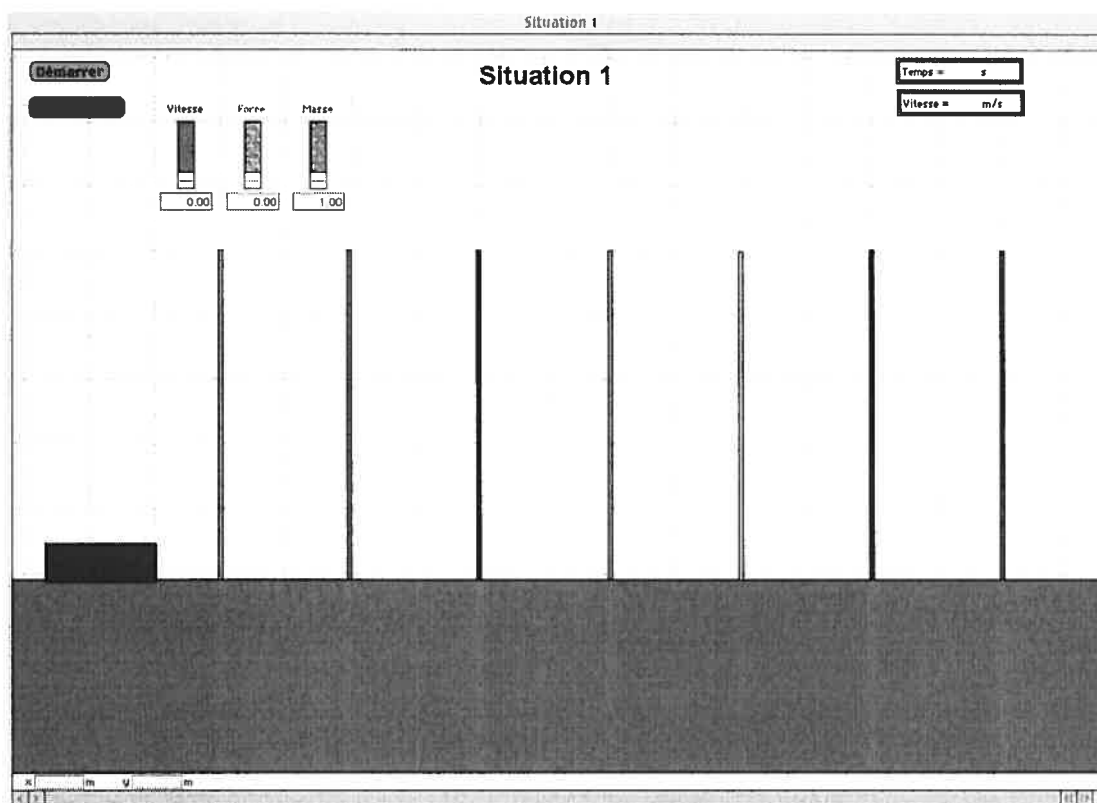
Comme l'on peut voir à la figure 6, la première situation met en scène une boîte sur le sol. Les poteaux multicolores devant la boîte ne servent que de points de repère et n'interagissent pas avec la boîte. À gauche en haut, sont situés deux boutons, l'un vert servant à débiter la simulation et l'autre rouge servant à réinitialiser la situation. Un peu plus à droite, on retrouve les contrôles permettant de déterminer respectivement la vitesse initiale de la boîte, la force exercée sur la boîte

et la masse de la boîte. En haut à droite, il est possible de lire le temps écoulé depuis le début de la simulation et la vitesse de déplacement de la boîte.

L'exploration de la situation 1 se déroule en deux temps. Il s'agit d'abord de ne faire varier que le contrôle « Vitesse », soit la vitesse initiale de la boîte, en fixant la force externe à zéro et la masse à une certaine valeur que l'on garde constante. La vitesse initiale varie de 0 à 50 m/s. Peu importe la vitesse initiale choisie, à cause du frottement avec le sol et l'air, la boîte diminue rapidement sa vitesse jusqu'à s'arrêter. Cette situation est ainsi conforme au principe du repos d'Aristote.

Ensuite, on s'attarde à l'effet des deux autres contrôles, soit la force appliquée sur la boîte et la masse de la boîte. Selon la deuxième loi de Newton, un objet soumis à une force constante accélère. Dans cette situation, parce que le frottement est important, la boîte se déplace à une vitesse constante et ce, peu importe les combinaisons de force et de masse. Cependant, quand la masse est trop importante par rapport à la force appliquée, elle demeure au repos à cause de la force de frottement statique que la force appliquée n'arrive pas à dépasser.

Figure 6 : Situation 1

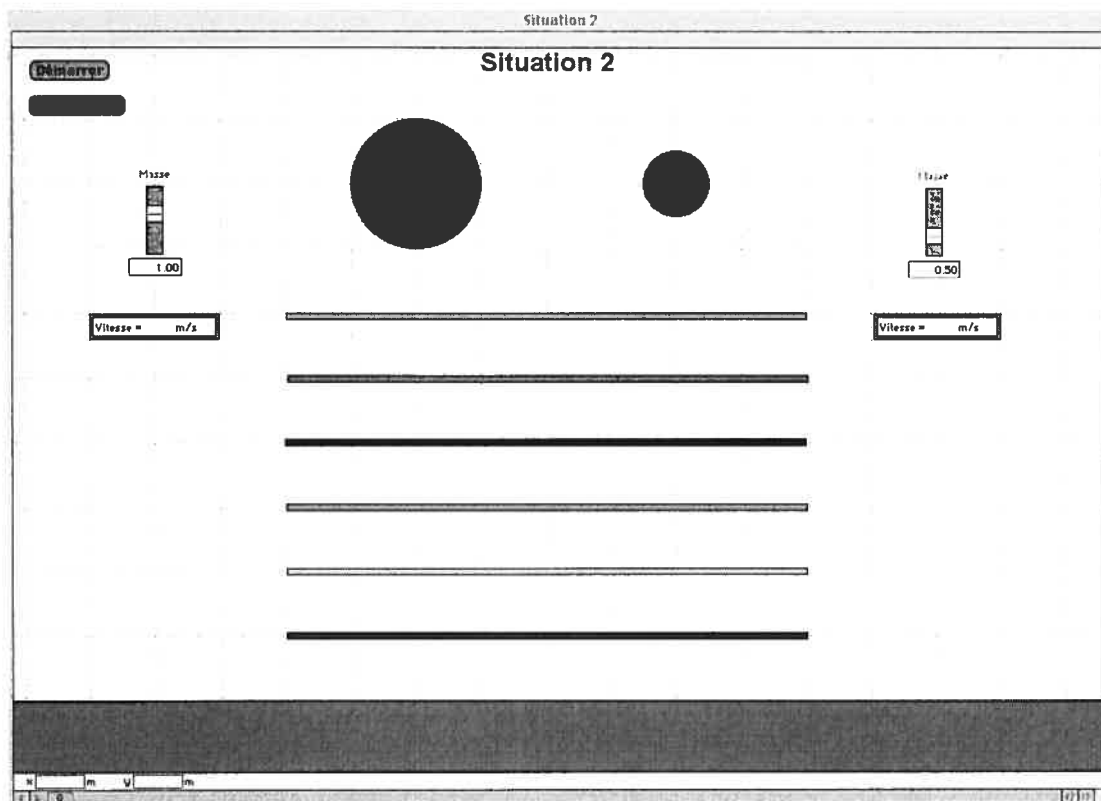


Situation 2 : deux balles tombant au sol

La situation 2 respecte également la mécanique aristotélicienne voulant que les objets tombent à une vitesse constante et que la grandeur de cette vitesse soit proportionnelle au poids de l'objet. En observant la figure 7, on remarque que la situation met en scène deux balles dont le diamètre peut varier de 0,2 m à 1,5 m. Pour chacune des balles, on peut apercevoir un indicateur de vitesse (l'un à gauche, l'autre à droite). Les lignes horizontales multicolores n'interagissent pas avec les balles et ne servent que de points de repère. Les paramètres du micromonde sont définis de telle sorte que les balles atteignent rapidement leur vitesse limite de chute en raison de la résistance de l'air. Conséquemment, les balles chutent à une vitesse constante et la grandeur de cette vitesse de chute est proportionnelle à la masse (et indirectement au diamètre des balles, puisque leur masse volumique reste constante

même si l'on fait varier le volume), ce qui est en accord avec le principe de la chute libre d'Aristote.

Figure 7 : Situation 2



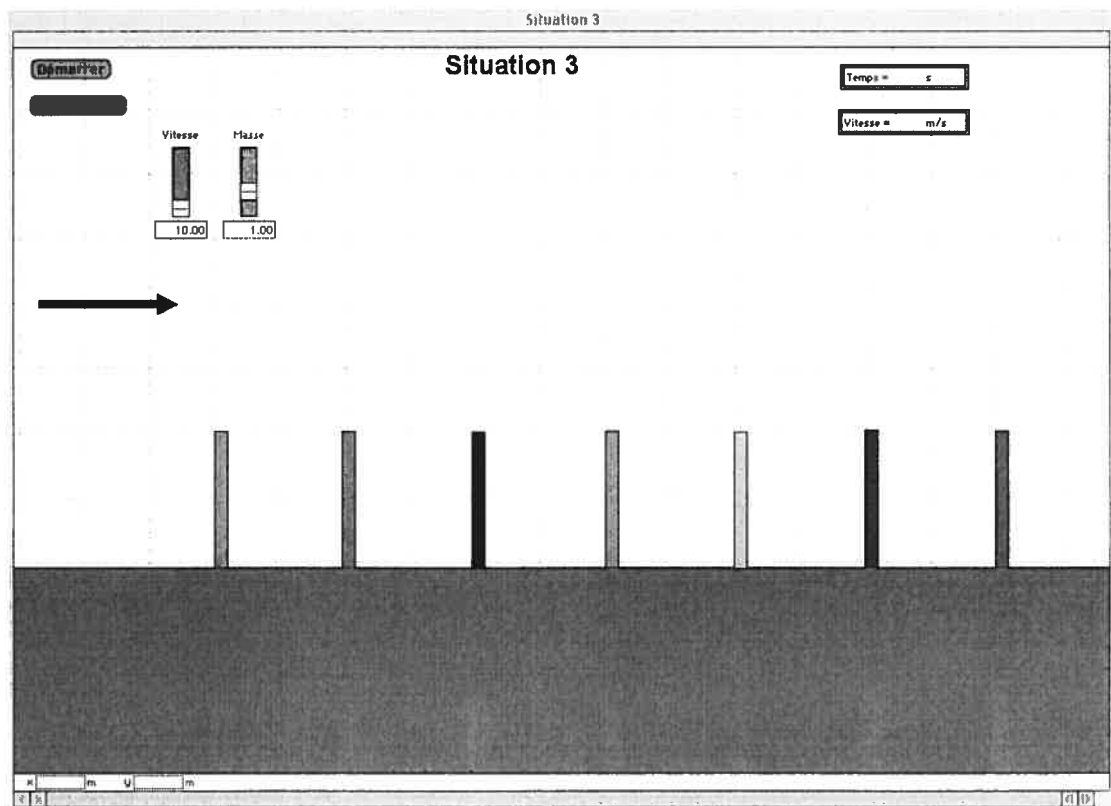
2.2 Situation relevant de la théorie de l'impétus

Les deux premières situations représentent des cas où le frottement est non négligeable et où la mécanique aristotélicienne s'applique. La troisième situation représente pour sa part un cas où le frottement est négligeable et où les principes aristotéliens, comme le principe de repos, ne s'appliquent plus.

Situation 3 : lancement et chute d'une flèche

La figure 8 concerne la situation 3, dans laquelle une flèche est propulsée avec une vitesse initiale pouvant varier de 10 à 50 m/s et une masse pouvant varier entre 0,1 et 3,0 kg. Contrairement aux deux situations précédentes, les barres verticales et multicolores peuvent entrer en interaction avec la flèche et constituent, en fait, des murs entre lesquels la flèche peut tomber. Ainsi, on pourra demander à l'élève de faire tomber la flèche entre le mur brun et le mur noir. À droite, on retrouve des indicateurs de temps et de grandeur de la vitesse. Le frottement de l'air a été fixé de telle sorte qu'il est cinq fois moins important que dans les situations 1 et 2; il est donc beaucoup plus négligeable.

Figure 8 : Situation 3



2.3 Situations relevant de la mécanique newtonienne

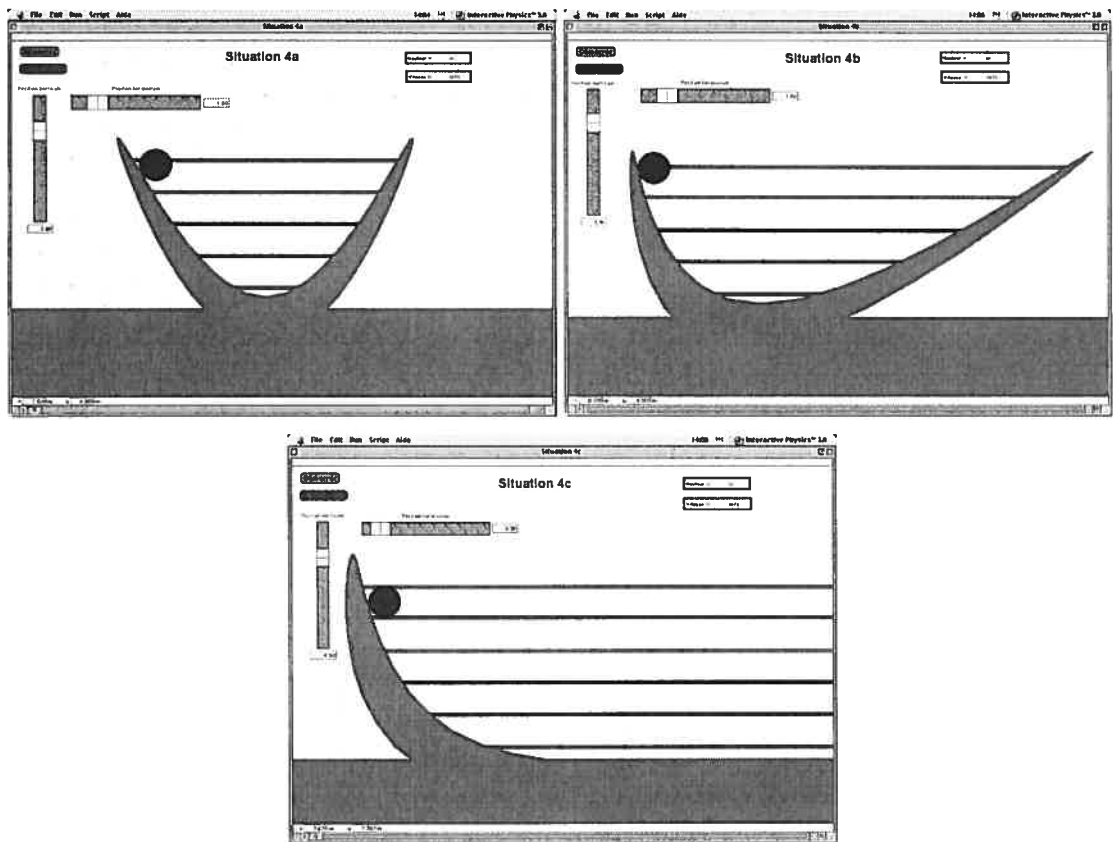
Ces deux dernières situations représentent des cas idéalisés où le frottement est totalement négligé et où, par conséquent, les lois de Newton s'appliquent.

Situation 4 : bille roulant le long d'une rampe

À cause des limites imposées par le logiciel *Interactive Physics™* (impossibilité de n'activer qu'une seule des trois balles, voir figure 9), la situation 4 se divise en trois sous-situations, soit les situations 4a, 4b et 4c. Chacune des trois situations prend la même forme. On retrouve une balle sur une rampe. L'élève peut faire varier la hauteur de la balle sur la rampe en faisant varier sa position horizontale et verticale. À droite, on retrouve un indicateur de temps et un autre représentant la hauteur de la balle. Les lignes horizontales multicolores n'interagissent pas avec la balle et ne servent que de points de repère. La résistance de l'air est fixée à zéro, de même que le frottement entre la balle et la rampe.

Dans la situation 4a, la rampe prend une forme symétrique. Dans la situation 4b, la partie droite de la rampe est moins abrupte que la gauche. Dans les deux cas, la hauteur maximale atteinte par la balle à droite de la rampe est égale à la hauteur initiale à gauche et ce, même si la distance parcourue sur la partie droite de la rampe sera plus importante dans la situation 4b. Si dans les situations 4a et 4b la balle remonte jusqu'à la hauteur initiale, qu'arrivera-t-il dans la situation 4c où la partie droite de la rampe est parfaitement horizontale et où la balle ne pourra jamais atteindre la hauteur initiale ? D'après le principe d'inertie, comme il n'y a aucun frottement, la balle poursuivra indéfiniment son chemin à une vitesse constante proportionnelle à la hauteur initiale. Galilée utilisait cette situation pour expliquer le principe d'inertie.

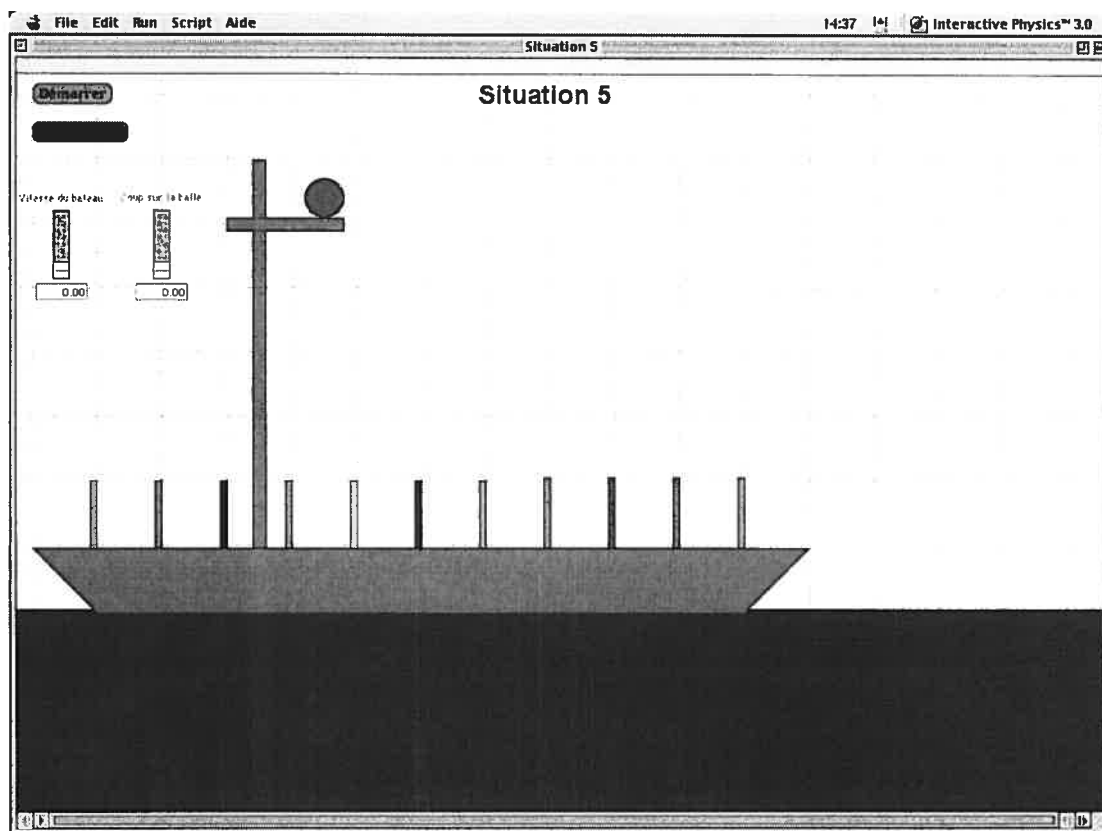
Figure 9 : Situation 4



Situation 5 : balle tombant du haut du mât d'un bateau

Dans la cinquième et dernière situation, une balle tombe du haut du mât d'un bateau (figure 10). Comme pour la situation 4, la résistance est négligée. La vitesse de croisière du bateau peut varier entre 0 et 10 m/s. La vitesse horizontale de la balle correspond à la vitesse de croisière du bateau à laquelle on peut ajouter, à l'aide d'un second contrôle, entre 0 et 10 m/s (au total, la vitesse initiale de la balle peut donc varier de 0 à 20 m/s). Comme dans la situation 3 (flèche projetée), les barres multicolores interagissent avec la balle en formant des murs entre lesquels la balle peut tomber.

Figure 10 : Situation 5



3. Les entretiens et la collecte des données

Les entretiens se déroulent à l'école des sujets, dans une pièce silencieuse où l'ordinateur et les appareils d'enregistrement sont installés. Pendant cinq semaines consécutives, à raison de quarante-cinq minutes par semaine, les sujets explorent successivement les cinq situations. Après avoir exploré une première fois l'ensemble des cinq situations, les élèves réexplorent rapidement chacune d'elles. L'image à l'écran et les verbalisations des élèves sont enregistrées sur une vidéocassette (les réactions physiques autre que la voix des sujets ne sont donc pas enregistrées) et constituent les données qui seront transcrites et analysées.

Le rôle de l'interviewer est de définir des objectifs à accomplir (« peux-tu déplacer l'objet à l'écran à tel endroit en tant de temps ? ») ou d'amener les élèves à

définir leurs propres objectifs. L'interviewer utilise un questionnement indirect visant surtout à recueillir des informations sur la démarche de l'élève. Il évite de questionner l'élève sur le pourquoi de ses actions et se concentre sur le comment. Il reformule les verbalisations des sujets afin de les inviter à préciser leurs raisonnements.

Les prochains paragraphes décrivent le déroulement des entrevues. Ces entrevues ne suivent pas un protocole fermé où l'ordre et la forme des questions posées aux sujets sont déterminés à l'avance. Cependant, pour chacune des situations, il y a un certain nombre d'éléments récurrents d'un élève à l'autre et c'est ce qui est présenté ici.

Dans la **situation 1**, après que l'interviewer ait décrit les différents éléments de l'interface informatique du micromonde, on explore d'abord l'effet du contrôle « Vitesse » sur le mouvement de la boîte qui glisse au sol en demandant aux élèves de faire arrêter plus ou moins loin la boîte : « Peux-tu faire arrêter la boîte entre la ligne noire et la ligne orange ? », « Peux-tu faire arrêter la boîte entre la ligne verte et la ligne brune ? ». On explore aussi les cas limites : « Peux-tu faire glisser la boîte si loin qu'elle sortira de l'écran à droite ? » ou « Comment faire pour que la boîte avance le moins possible ? ». Ensuite, on se concentre sur l'effet de la force : « Peux-tu faire glisser la boîte le plus rapidement possible en ne faisant varier que la force ? » ou « Peux-tu faire glisser la boîte le plus lentement possible en ne faisant varier que la force ? ». Puis, on examine l'effet de la masse : « En faisant varier seulement la masse, comment faire pour que la boîte se déplace le plus rapidement possible ? » Et finalement, en donnant la possibilité de faire varier à la fois la force et la masse, on fixe de nouveaux objectifs : « Peut-on faire glisser la boîte à une vitesse constante ? ». Pour conclure la situation 1, les sujets résument ce qu'ils retiennent de leur exploration.

Au début de la **situation 2**, les élèves décrivent ce qu'ils voient à l'écran. L'interviewer demande ensuite ce qui arrivera dans la situation présentée à l'écran (la

masse de la balle bleue plus grande que la masse de la balle de droite). Après avoir démarré la situation et discuté du résultat observé, on essaie de faire tomber les balles en même temps. Puis, on tente de faire tomber les balles le plus vite possible. L'interviewer demande parfois de faire tomber les balles à des vitesses précises ou de faire tomber une balle plus vite que l'autre : « Peut-on faire tomber la balle bleue à 1,0 m/s ? ». Vers la fin de l'exploration de la situation, l'interviewer demande comment on peut faire pour que la vitesse de la balle augmente en cours de chute. Enfin, à la toute la fin de l'entrevue, les élèves expliquent ce qui les a le plus marqués dans la situation 2.

L'exploration de la **situation 3** suit le même cadre général d'exploration que les deux situations précédentes : d'abord l'élève décrit ce qu'il voit, ensuite l'élève explore la situation en essayant d'atteindre des objectifs et finalement il résume ce qu'il retient de la situation. Après que l'élève ait énuméré les différents éléments de l'interface, l'interviewer demande ce qui arrivera au mouvement de la flèche si le contrôle de la vitesse est 10 et celui de la masse est 1. Par la suite, l'interviewer ou l'élève fixe des objectifs précis : « La flèche doit tomber entre la ligne noire et la ligne orange en ne faisant varier que la vitesse », « La flèche doit tomber entre la ligne brune et la ligne verte ». Rapidement, les sujets demandent s'ils peuvent explorer l'effet de la masse sur le mouvement. On fixe alors des buts (faire tomber la flèche plus ou moins loin) qui doivent être atteints en ne faisant varier que la masse. Ensuite, en leur donnant la possibilité de faire varier tous les contrôles qu'ils désirent, on demande aux élèves que la flèche continue le plus loin possible. L'interviewer demande alors ce qui se passerait s'il n'y avait pas de gravité. Après discussions, on modifie le micromonde pour que la flèche ne subisse pas l'effet de la gravité. La flèche ne tombe plus, mais elle subit toujours l'effet d'une faible résistance de l'air. On demande à ce moment de faire arrêter la flèche entre telle et telle ligne, puis de s'arranger pour que la flèche ne s'arrête jamais.

Après que les sujets aient décrit ce qu'ils voient dans la **situation 4a**, l'interviewer demande ce qu'il arrivera à la balle qui est en haut de la rampe à

gauche, puis il fixe des objectifs à atteindre : « Où faut-il placer la balle sur la partie gauche de la rampe pour qu'elle atteigne la ligne verte de la partie droite de la rampe ? » Suite à un premier essai, les élèves fixent souvent eux-mêmes des objectifs pour comprendre le fonctionnement de la situation. L'interviewer demande ensuite de faire sortir la balle à l'extérieur de la rampe à droite, de faire osciller la balle sur la rampe le plus longtemps possible ou le moins longtemps possible. L'interviewer demande si la situation est conforme à la réalité ou les élèves, spontanément, s'interrogent eux-mêmes sur l'adéquation entre la situation et la réalité. L'exploration des **situations 4b et 4c** se déroule sensiblement de la même façon. Les élèves décrivent la situation et expliquent ce qui arrivera à la balle dans la position de départ. Ensuite, des objectifs similaires sont proposés : faire remonter la balle à une certaine hauteur, faire osciller le plus longtemps possible, faire osciller le moins longtemps possible... Dans la situation 4c, l'interviewer propose, en plus des objectifs proposés lors des situations 4a et 4b, d'essayer d'arrêter la balle en-dessous de l'indicateur de vitesse sur la partie horizontale de la rampe ou de faire en sorte que la balle n'arrête jamais. L'interviewer demande finalement si la situation est conforme à la réalité.

Dans la première phase de l'exploration de la **situation 5**, on fixe la vitesse de déplacement du bateau à zéro et, en ne faisant varier que l'intensité du coup porté sur la balle en haut du mât, on essaie d'atteindre des objectifs, tel que faire tomber la balle entre la ligne grise et la ligne bleue. Ensuite, après avoir annoncé qu'il était dorénavant permis de faire varier à la fois le coup sur la balle et la vitesse de déplacement du bateau, l'interviewer demande de faire tomber la balle à gauche par rapport au mât. Dans un troisième temps, on modifie le micromonde afin que la gravité soit nulle et on réfléchit à ce qui arrivera à la balle. Les élèves se fixent alors leurs propres objectifs afin de comprendre ce qu'ils observent dans la situation en absence de gravité. L'interviewer demande finalement si la situation est conforme à la réalité.

Après avoir complété l'exploration de l'ensemble des situations, l'interviewer propose de refaire un **survol de chacune des situations 1 à 5**. Pour chacune des situations, l'élève se rappelle d'abord des conclusions auxquelles il était arrivé lors de la première exploration et, ensuite, il réexplore chacune des situations, mais avec la possibilité d'enlever la gravité et la résistance de l'air. Parfois, c'est l'interviewer qui demande ce qui arriverait s'il n'y avait pas de gravité ou de résistance de l'air; d'autres fois, c'est l'élève lui-même qui s'interroge à ce sujet.

4. L'analyse

Après chacune des entrevues, l'interviewer note les événements marquants de la rencontre dans un cahier. Ces notes servent de rappel à l'interviewer d'une semaine à l'autre. Une fois l'ensemble des entrevues terminées, les enregistrements de toutes les entrevues sont écoutés et résumés par écrit. Les résumés des entrevues sont ensuite lus et les passages intéressants sont mis en relief. En déterminant les deux résumés contenant les passages les plus intéressants, nous avons pu choisir les deux sujets principaux de cette étude (ci-après nommés Camille et Vincent).

Les verbalisations de ces deux sujets (deux fois environ cinq heures d'entrevue) sont transcrites et servent de données empiriques à la présente étude. Ces transcriptions sont lues et les extraits où les élèves formulent des conceptions, remettent leurs conceptions en question ou changent de conceptions sont soulignés. Les résumés des verbalisations des quatre autres sujets (ci-après nommés Clara, Simon, Cassandra et Hadrien) serviront à trianguler les interprétations faites à partir de l'analyse des verbalisations des deux sujets principaux.

Pour qu'un effet se retrouve dans le chapitre suivant qui porte sur l'analyse et l'interprétation des données, il fallait que l'effet se retrouve chez les deux sujets dont les verbalisations ont été transcrites, en plus de se retrouver chez une majorité d'élèves dont les verbalisations n'ont pas été transcrites mais simplement résumées.

Une fois les effets sélectionnés pour chacune des situations, nous rédigeons le chapitre suivant en prenant soin d'appuyer l'analyse sur des extraits tirés directement des transcriptions.

Analyse et interprétation

Introduction

Dans ce chapitre sur l'analyse et l'interprétation des données, nous examinons les effets de l'utilisation de chacun des micromondes explorés par les élèves sur les processus de changement conceptuel reliés à la notion d'inertie. Nous examinons également les effets d'une réutilisation des mêmes micromondes suite à une première exploration. Finalement, nous regroupons les éléments de réponses aux questions spécifiques de recherche dans la dernière section.

1. Effets de l'utilisation d'un micromonde aristotélicien

Dans cette partie, nous analysons les effets de l'utilisation d'un micromonde respectant les principes aristotéliciens. Ce micromonde aristotélicien correspond à la situation 1 (boîte qui glisse sur le sol) et à la situation 2 (balles qui tombent sur le sol).

1.1 Activation de la p-prim d'atténuation (« dying away »)

La première situation met en scène une boîte glissant sur le sol. Lors de l'exploration de cette situation, les élèves devaient, entre autres, faire arrêter la boîte à différents endroits sur le sol en faisant varier la vitesse initiale. Aucun n'a évoqué le principe d'inertie pour justifier sa surprise face à la boîte qui arrête plutôt que de continuer indéfiniment comme le voudrait ce principe. En fait, aucun élève n'a dit être surpris de constater que la boîte arrête. Précisons que les élèves n'utilisent pas la notion de frottement ou de résistance de l'air pour expliquer le ralentissement de la boîte : ils utilisent la p-prim d'atténuation en disant que la boîte arrête parce que la vitesse ralentit.

Comme les autres élèves, Camille n'est pas surprise d'observer que la balle arrête et elle associe une augmentation de la vitesse initiale à une plus grande distance parcourue sur le sol avant de s'arrêter :

Interviewer: Tu disais que la vitesse était la vitesse...

Camille : Quand la boîte part.

Interviewer : Après, qu'est-ce qui arrive à la boîte ?

Camille : Elle est propulsée, alors elle se déplace plus loin selon la vitesse.

Quand la vitesse est plus basse, la boîte se rend moins loin. Quand elle est plus haute, elle se rend plus loin. (Camille, pp. 4-5)

Quand on lui demande ce qui fait arrêter la boîte, elle ne fait jamais référence au frottement. Elle associe plutôt le ralentissement et l'arrêt de la boîte au fait que la vitesse diminue avec le temps :

Interviewer : Pourquoi la boîte arrête en chemin ?

Camille : Parce qu'elle n'a plus de vitesse.

Interviewer : Qu'est-ce qui arrive à la vitesse ?

Camille : Je ne sais pas. (Camille, p. 4)

Et, lorsque l'exploration de la situation se termine, elle conclut en disant :

Interviewer : J'aimerais, avant qu'on termine, que tu me dises ce que tu retiens ou tu as appris ?

Camille : La vitesse fait ralentir après un certain temps, parce que la vitesse va diminuer.

Interviewer : Pourquoi la vitesse va diminuer ?

Camille : Peut-être parce qu'à un moment il n'y a plus de vitesse, parce que, la vitesse, c'est au départ. Rendu plus loin, il y a moins de vitesse, la vitesse diminue et, à la fin, il n'y en a plus. (Camille, p. 15)

Vincent comprend lui aussi que plus la vitesse initiale est élevée, plus la distance parcourue sera grande, à la différence près qu'il justifie son explication en utilisant des exemples de situations réelles :

si disons on frappe avec un bâton de hockey, elle risque d'aller assez loin, mais si on la pousse avec notre doigt ou qu'on lui fait une pichenotte, elle risque de ne pas aller loin parce que la vitesse est beaucoup différente.

(Vincent, p. 5)

Comme pour Camille, Vincent n'explique pas pourquoi la boîte s'arrête au lieu de continuer : « [...] la boîte va s'arrêter, parce qu'elle va perdre de la vitesse » (Vincent, p. 12). Contrairement à Camille cependant, Vincent parle de la friction, mais il en parle dans le cadre d'une explication parallèle qui n'est pas en lien direct avec l'exploration de la situation. Jamais il n'utilise la notion de friction pour expliquer pourquoi la boîte arrête, parce que, comme pour Camille, cela n'a pas besoin d'explication : la p-prim d'atténuation est une explication en soi.

Pour Clara, c'est la même chose : elle ne justifie pas pourquoi les objets s'arrêtent. Quand on lui demande d'imaginer une situation où l'objet n'arrête pas, elle répond qu'il faut une pente ou un moteur (Clara, p. 2)¹⁶. Pour Simon, « [d]'habitude quand tu lances un objet, il s'arrête un jour » (Simon, p. 1). Comme Clara, il affirme qu'il doit y avoir une pente pour qu'un objet continue, mais il affirme également que, dans l'espace, l'objet continuerait à cause de l'absence de gravité. La cause du ralentissement de la boîte n'est donc pas le frottement ou la résistance de l'air, mais la gravité. S'il est vrai que le frottement avec le sol est en lien avec la gravité, il reste que même en l'absence de gravité, la boîte s'arrêterait à cause de la résistance de l'air. Pour Cassandra, « le bloc arrête parce qu'il perd son élan » (p. 1). Elle ajoute aussi que la boîte serait freinée par l'air si la situation correspondait à la réalité. Ceci dit, il ne faudrait pas en conclure que Cassandra adhère à la notion d'inertie, parce que, lorsqu'on lui suggère d'imaginer une situation où il n'y a pas d'air et où, donc, il n'y a pas de résistance, elle répond que l'objet irait plus rapidement, mais finirait quand même par s'arrêter. L'absence d'air diminue le ralentissement, mais ce dernier est inévitable, avec ou sans résistance de l'air. Pour

¹⁶ Les références associées à Clara, Simon, Cassandra et Hadrien (élèves dont les verbalisations n'ont pas été transcrites) se rapportent aux résumés des entrevues et ne sont pas disponibles en annexe pour éviter d'alourdir le présent document.

elle, c'est le sol qui va arrêter le bloc. Mais, lorsqu'on lui demande d'imaginer que la boîte ne frotte pas sur le sol, elle devient confuse et dit qu'il n'y a plus de puissance et elle parle du vent qui propulserait l'objet.

En résumé, tous les élèves interviewés activent la p-prim d'atténuation pour expliquer l'arrêt de la boîte. Pour la plupart des élèves, la boîte s'arrête simplement parce que la vitesse diminue. Les élèves ayant tenté de fournir une explication au ralentissement de la boîte ont tenu un discours peu clair sur le rôle de la gravité. Seule Cassandra a parlé de la résistance de l'air et du frottement, mais d'une façon confuse et qui ne laissait pas entendre qu'elle les associait au ralentissement de la boîte. Les élèves adhèrent au principe du repos d'Aristote en activant la p-prim d'atténuation qui semble avoir une très forte priorité d'appel et une très grande stabilité, parce que, d'aucune façon, le micromonde aristotélicien permet de remettre en question l'utilisation de cette p-prim dans ce contexte.

1.2 Activation de la p-prim d'Ohm

Dans cette section, il est question de l'activation de la p-prim d'Ohm lors de l'exploration des relations entre la force, la masse et le mouvement de la boîte qui glisse sur le sol (situation 1) et lors de l'étude du mouvement de balles qui tombent sur le sol (situation 2).

1.2.1 Dans le cas d'une boîte qui glisse au sol

Lorsque les élèves ont besoin d'utiliser les paramètres de force et de masse pour atteindre les objectifs fixés par l'interviewer, ils activent sans hésitation la p-prim d'Ohm en coordonnant un agent (la force) qui engendre un résultat (la vitesse) en présence d'une résistance (la masse). Ils respectent ainsi le principe fondamental de la mécanique aristotélicienne selon lequel la vitesse est proportionnelle à la force et inversement proportionnelle à la masse.

Dès qu'il comprend que la force exercée sur l'objet est une force continue, Vincent associe immédiatement force et vitesse dans ses essais. Pour obtenir une vitesse plus grande, il augmente spontanément la force. S'il n'y a pas de force continue exercée sur l'objet, ce dernier s'arrête. Pour obtenir une vitesse constante, il faut toujours pousser :

Mais si disons [...] qu'on court avec la balle en la gardant sur le bâton, elle va garder toujours sa force parce qu'en fait ce n'est pas la sienne, c'est la nôtre qui la pousse. (Vincent, p. 12)

Si on n'exerce pas une force constante sur un objet, il s'arrête. La p-prim d'atténuation et la p-prim d'Ohm sous sa coordination aristotélicienne (agent : force; résultat : vitesse; résistance : masse) sont fortement liées par une « reliabilité » élevée : si tout objet s'arrête, alors, pour qu'il continue à une vitesse constante, il faut constamment le pousser. Notons que Vincent ne parle jamais d'accélération, même lorsque l'interviewer lui demande clairement ce qui arrive à la vitesse de la boîte si on la pousse constamment :

Interviewer : Mais si on pousse sur la boîte et qu'on avance en même temps que la boîte.

Vincent : Bien ça va être une force continue, donc la boîte va toujours avancer.

Interviewer : De quelle façon va-t-elle avancer? Peux-tu me décrire son mouvement?

Vincent : Ça va glisser.

Interviewer : Qu'est-ce qui arrivera à la vitesse de cette boîte?

Vincent : Elle va rester pas mal stable, dépendamment si nous on va vite ou non.

Interviewer : Si on pousse toujours de la même façon, avec la même force...

Vincent : Bien, ça risque d'être pas mal stable. (Vincent, p. 19)

Pour Vincent, la masse joue le rôle d'une résistance au mouvement. Plus la masse est petite, plus la vitesse de la boîte sera élevée pour une force donnée et vice-versa.

Plus la masse est haute, donc, plus c'est lourd, plus, quand tu es à une force [...], la boîte se déplace moins vite. [...] Donc, plus c'est lourd, plus c'est difficile de la faire avancer. (Vincent, p. 18)

Il utilise des exemples réels pour justifier sa position :

Disons, quand on pousse une balle avec notre main, on peut aller assez vite merci, parce que c'est vraiment très léger. Mais, si on pousse un tracteur, disons que c'est plus compliqué, parce que c'est plus lourd. (Vincent, p. 10)

Camille utilise également lors de ses essais la p-prim d'Ohm avec la force comme agent, la vitesse comme résultat et la masse comme résistance. Selon elle, pour qu'un objet soit en mouvement constant, il faut pousser constamment sur lui, sinon il s'arrête. Une certaine force donne une certaine vitesse à l'objet. Camille ne peut donc pas imaginer qu'une force engendre une accélération de l'objet qu'on pousse. Lorsque l'interviewer lui demande explicitement de faire accélérer la boîte, Camille demande s'il est possible d'augmenter la force en cours d'essai (Camille, p. 8), puis elle dit : « Si la boîte part d'une force et qu'on augmente la force... On donne de plus en plus de force, alors la boîte va plus vite. » (Camille, p. 9) Pour ce qui est de la masse, elle joue toujours clairement un rôle de résistance au

mouvement : plus la masse est élevée, plus la vitesse est faible et, plus la masse est faible, plus la vitesse est élevée.

Comme Camille et Vincent, les autres élèves activent immédiatement la p-prim d'Ohm sous sa coordination aristotélicienne. Dans tous les cas, les élèves ne semblent pas surpris de constater que le bloc n'accélère pas. Ils associent spontanément vitesse et force sans évoquer les limites d'une telle association. Ils ne parlent pas du frottement ou de la résistance de l'air comme d'une cause à la non accélération des objets poussés. Pour les sujets, ce qui est normal, c'est que les objets se déplacent à une vitesse constante lorsqu'on les pousse. Si les objets prennent de la vitesse, c'est parce qu'on pousse plus fort ou qu'il y a un agent extérieur comme une pente qui contribue à faire augmenter la vitesse. Mentionnons finalement qu'aucun élève n'a été amené à remettre en question son utilisation de la p-prim d'Ohm au cours de l'utilisation du micromonde aristotélicien.

1.2.2 Dans le cas de balles qui tombent au sol

La situation 2 met en scène deux balles qui tombent sur le sol. La masse de chacune des balles peut être modifiée par l'utilisateur. Au contact de cette situation, et même avant d'avoir fait des essais, les élèves, à l'exception de Cassandra (nous en discutons plus loin), affirment que la balle la plus lourde tombera plus vite et touchera le sol avant la plus légère. Ils activent donc la p-prim d'Ohm avec la masse comme agent et la vitesse comme résultat (plus la masse est grande, plus la vitesse de chute sera élevée). Le paramètre agissant comme résistance au mouvement est souvent absent et est parfois associé à la forme de l'objet d'une façon peu claire. Un seul élève, Vincent, a remplacé radicalement et soudainement sa p-prim d'Ohm (masse proportionnelle à la vitesse de chute) par la conception moderne de la gravité selon laquelle tous les objets tombent avec la même accélération. Toutefois, nous verrons qu'il n'intègre pas la notion de frottement pour expliquer pourquoi, dans la situation, les balles tombent à des vitesses constantes.

Dès le début et jusqu'à la fin de l'exploration de la situation 2, Camille affirme que les objets plus lourds tombent plus vite que les objets plus légers :

Si la masse est plus grosse, si par exemple la boule bleue a une masse plus grosse que la rouge, elle descendra plus vite que la rouge. Puisque la masse est plus petite, elle est plus légère et elle peut descendre plus lentement. Si la bleue est plus grosse, elle descendra plus vite, parce qu'elle est moins légère. (Camille pp. 18-19)

Quand on demande à Camille comment faire pour qu'un objet prenne de la vitesse en tombant, elle propose d'augmenter la masse en cours de chute (Camille, p. 7) et, plus loin, elle affirme qu'il faudrait que la balle soit attirée par le sol comme par un aimant :

Interviewer : Qu'est-ce qu'il faudrait faire pour que la balle bleue qui tombe du toit de l'école accélère, pour que sa vitesse augmente ?

Camille : Il faudrait qu'on l'attire vers le sol pour qu'elle se déplace plus vite.

Interviewer : Comment ferait-on cela ?

Camille : Je ne sais pas.

Interviewer : En l'attirant vers le sol, sa vitesse augmenterait ?

Camille : Un peu comme un aimant. Si, au début, la force n'est pas assez grande et, si, en descendant, la force est plus grande, ça ira plus vite, mais on ne peut pas vraiment. (Camille, p. 18)

Les autres élèves participant à l'étude ont également activé la p-prim selon laquelle la vitesse de chute est proportionnelle à la masse. Clara a même suggéré un système avec des parachutes que l'on détruit pour faire accélérer les objets qui tombent, parce que les objets ne prennent pas de vitesse en tombant selon elle. Il y a cependant une exception notable. En effet, dès le début de l'exploration, Simon affirme que les deux balles toucheront le sol en même temps et que la vitesse des objets qui tombent augmente. Il fait même vaguement référence aux travaux de Galilée sur la chute libre. Si, contrairement aux autres participants, Simon adhère

explicitement à la loi de la gravité au lieu de penser que la vitesse est proportionnelle à la masse, il est incapable, à l'instar des autres élèves, de tenir compte du contexte dans lequel s'inscrit la chute de l'objet et de l'influence de la gravité. Lorsqu'on lui demande pourquoi les objets tombent à une vitesse constante dans la situation 2, il n'affirme pas que c'est à cause de la résistance de l'air, mais parce qu'il n'y a pas de gravité dans la situation (ce qui est faux). Bref, dans tous les cas, les élèves se montrent incapables d'utiliser la notion de frottement ou de résistance de l'air.

Dès le début de cette partie, nous annonçons que Vincent avait radicalement rejeté son utilisation de la p-prim d'Ohm (masse proportionnelle à la vitesse) en cours d'exploration pour utiliser la loi de la gravité (d'une façon incomplète). Nous verrons que ce changement dans l'utilisation des p-prim ne semble pas être un effet de l'utilisation du micromonde aristotélicien, mais un effet de l'activation des connaissances antérieures sur la gravité. En effet, l'arrivée de la loi gravitationnelle dans le discours de Vincent a une très forte « reliabilité » avec la p-prim d'Ohm qui a totalement été désactivée. Nous verrons cependant que, comme Simon, Vincent n'inclut pas la notion de résistance de l'air dans son discours.

Comme les autres, Vincent affirme dès le début que la balle plus lourde tombera plus vite. Durant l'entrevue, l'interviewer demande à Vincent d'atteindre différents objectifs : les deux balles doivent tomber en même temps, les deux balles doivent tomber le plus vite possible, la balle bleue doit descendre à 0,50m/s, etc. Au moment où l'interviewer demande que la balle bleue accélère en tombant, Vincent n'a pas de réaction. Il utilise la p-prim d'Ohm pour guider ses essais. Il demande si le contrôle de la masse de la balle rouge peut être transféré à la balle bleue pour augmenter davantage la masse de cette dernière. Puis, soudainement, il se met à parler de la loi de la gravité et à l'utiliser :

Vincent : Donc, si ça ne marche pas à 1,50, je crois que c'est impossible [de faire accélérer la balle bleue en tombant]. Parce que, si 1,50 c'est le plus gros, donc ça devrait aller plus vite, mais ça tombe, donc ça devrait être – par les lois de la gravité – plus ça descend, plus ça va vite, mais ça a

pas vraiment l'air de ça. Donc, personnellement, je crois que c'est impossible.

Interviewer : Tu as dit que, par la loi de la gravité, plus ça descend, plus ça devrait aller vite.

Vincent : Oui, parce que si on se met en haut de l'école et qu'on lance une balle de pâte à modeler, elle va prendre de la vitesse en descendant; elle va prendre de la vitesse beaucoup, beaucoup. [...] (Vincent, p. 17)

Cependant, par la suite, lorsqu'on lui demande pourquoi les balles n'accélèrent pas dans la situation 2, Vincent ne répond pas que c'est à cause de la résistance de l'air : c'est plutôt parce que la gravité est moins forte (ce qui n'est pas le cas : la gravité de la situation étant la gravité terrestre).

Interviewer : Mais comment tu expliques le fait que la vitesse n'augmente pas dans cette situation-là ?

Vincent : D'après moi, c'est parce que la loi de la gravité est beaucoup moins forte qu'ici [sur Terre] et sûrement que...

Interviewer : Mais si je te dis que c'est la même chose ?

Vincent : Je ne comprends pas du tout. Si vous me dites que c'est la même chose, je ne comprends pas du tout.

Interviewer : Tu ne comprends pas le fait que la balle descende à vitesse constante ?

Vincent : Oui, c'est ça. Normalement, ça devrait accélérer. (Vincent, p. 18)

Ainsi, même si Vincent change radicalement son discours sur la chute des balles, il ne fait pas référence à la résistance de l'air. Il affirme, comme Simon, que c'est à cause de l'absence ou de la diminution de la gravité que les balles ne prennent pas de la vitesse. C'est comme si Vincent avait deux systèmes explicatifs indépendants sur la chute des corps, l'un fondé sur la p-prim d'Ohm et l'autre sur la loi de la gravité. Le concept de résistance de l'air pourrait peut-être relier ces deux systèmes, mais jamais Vincent n'en fait mention.

À ce moment de notre analyse, on peut se demander quelle est la cause du changement radical de Vincent dans l'utilisation de la p-prim d'Ohm. Est-ce l'effet direct de l'utilisation d'un micromonde aristotélicien ? Le changement est soudain et le fil du discours ne permet pas d'argumenter que c'est le micromonde qui a permis ce changement. En fait, tout porte à croire que la loi de la gravité est revenue à la conscience de Vincent et a éclipsé immédiatement la p-prim d'Ohm. Pour que le micromonde aristotélicien ait vraiment eu des effets sur les processus de changement conceptuel, il aurait au moins fallu que Vincent débute un dialogue entre ses deux explications que sont la p-prim d'Ohm et la loi de la gravité. Il aurait fallu que le micromonde amène Vincent à se questionner sur les limites de l'utilisation de la loi de la gravité et sur le rôle de la résistance de l'air dans la chute des corps, mais Vincent ne le fait pas..

1.3 Activation de la p-prim d'annulation et de la p-prim de dépassement lorsque la p-prim d'Ohm n'arrive pas à expliquer un phénomène

Les périodes d'exploration où les objectifs fixés par l'interviewer s'accordent mal ou pas du tout avec la p-prim d'Ohm sont souvent confuses. Durant ces périodes, les élèves s'expriment en des termes qui peuvent faire penser aux p-prims reliées à la notion d'équilibre, comme la p-prim d'annulation («*canceling*») et la p-prim de dépassement («*overcoming*»).

Au cours de l'exploration de la situation de la boîte glissant sur le sol, l'interviewer demande à Vincent de faire avancer la boîte bleue le plus rapidement possible sur le sol (Vincent, p. 9). Après avoir réaffirmé que la vitesse initiale est perdue durant le mouvement, Vincent propose d'essayer d'arrêter le bloc en mélangeant la vitesse et la force. L'interviewer l'encourage alors à explorer cette avenue. Par un essai impliquant à la fois la vitesse et la force, il observe d'abord que la boîte ralentit (perd une partie de sa vitesse initiale) et qu'ensuite elle continue à une vitesse constante en raison de la force continue exercée sur la boîte. Il conclut donc

que la force a toujours le dessus sur la vitesse. Il intègre alors la masse dans son discours (son objectif étant toujours de faire arrêter la boîte). Il affirme que la boîte s'arrêtera si la masse est plus grande. La p-prim d'Ohm utilisée par Vincent ne permet pas d'atteindre l'objectif qu'il s'est lui-même fixé (celui d'arrêter la boîte, malgré une certaine force exercée sur la boîte). En effet, la masse ne fait que pondérer l'effet de la force (si la masse est plus petite, la vitesse sera plus grande pour une certaine force); la masse ne peut pas annuler l'effet de la force à moins d'être une masse infinie, mais ce n'est pas possible dans la situation et Vincent ne réfère pas à cette possibilité. Comme la p-prim s'avère inadaptée à la situation (elle pourrait l'être si Vincent parlait de frottement, mais tel n'est pas le cas), il utilise d'autres formes de raisonnement qualitatif qui ressemblent beaucoup à la p-prim de dépassement. Vincent dit : « comme la force est continue, mais que la masse est plus forte, ça va peut-être la faire ralentir » (Vincent, p. 10) et plus loin : « [c]omme la masse est plus forte, même si la force est continue, bien, ça va sûrement faire ralentir la boîte ». Ainsi, si la masse est plus forte que la force - autrement dit, si l'effet de la masse (qui freine le mouvement de la boîte) dépasse l'effet de la force (qui est responsable du mouvement de la boîte) - alors la boîte s'arrêtera peut-être. Cette activation de la p-prim de dépassement ne semblait pas avoir une forte priorité d'appel avant que Vincent ne propose son objectif de faire arrêter la boîte avec une force non nulle. De plus, l'activation de la p-prim de dépassement n'a montré aucune « fiabilité » avec la p-prim d'Ohm. Jamais, à cause de l'activation de la p-prim de dépassement, Vincent n'a remis en question son utilisation aristotélicienne de la p-prim d'Ohm.

Dans les cas problématiques, Camille met également de côté la p-prim d'Ohm et active des p-prim reliées à la notion d'équilibre. Lorsque l'interviewer lui demande de déplacer la boîte à une vitesse constante, tout en gardant une force nulle, Camille bascule de raisonnements fondés sur la p-prim d'Ohm à des raisonnements s'appuyant sur la p-prim d'annulation. À ce moment, pour elle, si la boîte arrête, c'est parce que la masse est plus grande que la vitesse (p-prim de dépassement). Elle essaie alors « d'égaliser » la masse et la vitesse pour que la boîte se déplace à une

vitesse constante. Dans ses essais, Camille va même jusqu'à laisser tomber les valeurs absolues de masse et de vitesse pour se concentrer sur la position relative des curseurs de vitesse et de masse : elle place le curseur de vitesse vis-à-vis le curseur de masse pour qu'ils soient au même niveau.

Camille : La boîte n'a pas bougé longtemps, parce que la masse est plus grande que la vitesse.

Interviewer : C'est la même pourtant [dans l'essai précédent, Camille avait placé la vitesse à 3 et la masse à 3].

Camille : La masse 3 est lourde et la vitesse 3 n'est pas beaucoup [Camille fait référence à la position relative des curseurs de contrôle de la vitesse et la masse].

Interviewer : Que vas-tu faire pour que la boîte se déplace à une vitesse constante?

Camille : Je vais les égaliser.

Interviewer : Tu veux arriver à égaliser vitesse et masse ?

Camille : Oui.

Interviewer : Et la boîte se déplacera à une vitesse constante ?

Camille : Peut-être.

[Camille place alors le curseur de la vitesse dans le milieu du contrôle, à la même hauteur que le curseur de la masse.] (Camille p. 11)

Un peu plus loin dans l'entrevue, alors qu'il est question à nouveau de déplacer la boîte à une vitesse constante, Camille utilise à nouveau la p-prim d'annulation en disant : « Si la vitesse égale la force, peut-être que ça va marcher » (Camille, p. 14). Comme précédemment, l'activation des p-prim reliées à l'équilibre ne permet pas de remettre en question l'utilisation de la p-prim d'Ohm.

Clara utilise également la p-prim de dépassement pour contourner une limite dans l'utilisation de la p-prim d'Ohm, cette dernière ne permettant pas d'expliquer le fait qu'un objet demeure immobile, même si on exerce une force, à condition toutefois que cette force soit plus faible que la force de frottement. Selon la p-prim

d'Ohm, en effet, dès qu'une force est exercée, la boîte doit se déplacer. Si la masse est très grande, cette vitesse peut-être faible, mais ne peut en aucun cas être nulle (sauf si la masse est infinie). N'intégrant pas la notion de frottement dans son discours, Clara utilise la p-prim de dépassement pour expliquer que la boîte n'avance pas dans certains cas et ce, même si une force est exercée. Elle conclut d'ailleurs que, pour faire avancer la boîte, « |i| faut une force plus grande que la masse » (Clara, p. 2). Cassandra est dans la même situation que les élèves cités précédemment, mais pour elle, si le bloc n'avance pas, c'est à cause de la gravité. Elle ne dit donc pas que la masse est plus grande que la force, mais que la gravité est plus grande que la force : « Si la force est plus grande que celle qui retient le bloc au sol, la gravité, le bloc n'avance pas » (Cassandra, p. 2). Elle conserve cependant l'idée que la masse annule la force, c'est-à-dire que plus la masse est élevée, plus l'effet de la force est atténué.

Quel intérêt peut avoir dans le cadre de cette étude cette activation des p-prim d'annulation et de dépassement (ci-après « p-prim d'équilibre ») ? Rappelons que le but de notre étude est d'examiner les effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel reliés à la notion d'inertie. L'activation des p-prim reliées à l'équilibre, parce qu'elle ne permet jamais de remettre en question l'utilisation de la p-prim d'Ohm sous sa forme aristotélicienne, n'a qu'un intérêt limité. Certes, elle permet de sortir de l'utilisation répétitive de la p-prim d'Ohm. Mais, loin de favoriser les processus de changement conceptuel, l'activation des p-prim d'équilibre permet aux élèves d'éviter de remettre en question leur utilisation de la relation force-vitesse-masse. Pour toutes ces raisons, il faut donc relativiser l'importance de l'activation des p-prim d'équilibre lors de l'exploration du micromonde aristotélicien dans les processus de changement conceptuel.

* * *

En résumé, l'analyse des entrevues concernant l'utilisation d'un micromonde aristotélicien nous montre que les élèves adhèrent spontanément aux principes aristotéliciens en utilisant la p-prim d'atténuation (« dying away ») pour expliquer le ralentissement et l'arrêt des objets en mouvement et en utilisant la p-prim d'Ohm pour expliquer le fait qu'un objet poussé plus fort voit sa vitesse constante de déplacement augmentée à moins que la masse ne soit augmentée. Dans le contexte d'un micromonde aristotélicien, ces deux p-prim semblent posséder une très forte priorité d'appel. Ajoutons que l'utilisation du micromonde aristotélicien n'a pas permis de remettre en question la mauvaise utilisation que font les élèves des p-prim d'atténuation et d'Ohm. En fait, dans les situations problématiques où les p-prim d'atténuation et d'Ohm ne permettent pas d'expliquer certains phénomènes ou de faire certaines prédictions, les élèves ont recours à d'autres p-prim (principalement les p-prim d'annulation et de dépassement) ou mettent de côté des données de la situation problématique et n'en tiennent pas compte.

2. Effets de l'utilisation d'un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus

Dans cette partie, il est question des effets de l'utilisation d'un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus sur les processus de changement conceptuel reliés à l'apprentissage du concept d'inertie. Ce micromonde inspiré de la notion d'impétus met en scène une flèche propulsée dans un univers où l'effet du frottement et de la résistance de l'air sur le mouvement n'est pas aussi important que dans un micromonde aristotélicien. Parmi les effets observés, on remarque la remise en question de l'utilisation de la p-prim d'atténuation (principe du repos) et l'incompréhension face au fait que plus la masse est élevée, plus la flèche continue loin pour une vitesse initiale donnée. Il convient de rappeler que ces effets ne sont pas strictement reliés à l'utilisation d'un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus. Il ne faut pas oublier que les élèves ont exploré auparavant un

micromonde aristotélicien. Les effets seraient sans doute différents, si les élèves avaient exclusivement exploré un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus. Il est donc préférable d'affirmer que ce sont des effets de l'utilisation d'un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus suite à l'utilisation d'un micromonde aristotélicien.

2.1 Remise en question souvent hésitante de l'utilisation de la p-prim d'atténuation au profit du principe d'inertie

Un des effets observés le plus important est la remise en question du fait que tout objet en mouvement ralentit et finit par s'arrêter. Ce principe est universellement accepté et utilisé par les participants à cette étude. L'exploration de la situation 3 où une flèche est propulsée amène les élèves à remettre en question leur utilisation de la p-prim d'atténuation au profit de l'utilisation du principe d'inertie selon lequel les objets conservent leur mouvement en l'absence de force agissant sur eux. Cependant, cette remise en question n'est pas toujours parfaitement claire; elle est même souvent hésitante. On observe les élèves passer du principe du repos au principe d'inertie et retourner au principe du repos et ainsi de suite. L'unique exception à cette hésitation, c'est Vincent qui montre une franche adhésion au principe d'inertie. Il est intéressant de noter que seul Vincent utilise la notion de frottement pour justifier sa prise de position.

Au début de l'exploration de la situation 3, Camille utilise la p-prim d'atténuation pour expliquer l'influence qu'aura la vitesse sur le mouvement des objets : « Lorsque [la flèche] n'aura plus de vitesse, elle s'arrêtera et tombera » (Camille, p. 19). Plus loin au cours de l'entrevue, après avoir examiné l'effet de la masse sur le mouvement, l'interviewer propose d'imaginer que la flèche se déplace dans un monde sans gravité. Camille affirme alors que la flèche continue indéfiniment :

Interviewer : S'il n'y avait pas de gravité, si on n'était pas sur Terre, qu'arriverait-il à la flèche ?

Camille : Elle continuerait.

Interviewer : Elle continuerait comment ?

Camille : Elle continuerait tout le temps. (Camille, p. 25)

C'est la première fois qu'elle affirme que les objets en mouvement n'arrêteront pas nécessairement. Il ne faudrait pas penser pour autant que Camille a abandonné la p-prim d'atténuation, parce que, juste après avoir affirmé que la flèche allait continuer indéfiniment, elle affirme le contraire :

Interviewer : Quel sera le mouvement de cette flèche à partir du moment où elle sera décochée avec une vitesse de 50, par exemple ? [...]

Camille : Elle irait de moins en moins vite, parce que, même s'il n'y a pas de gravité, puisque la vitesse diminuera, elle va aller de moins en moins vite. (Camille, p. 26)

Cette remise en question hésitante de la p-prim d'atténuation se retrouve également chez d'autres élèves. Hadrien hésite clairement à au moins trois reprises entre le principe du repos et le principe d'inertie en affirmant que la flèche s'arrêtera en l'absence de gravité, mais qu'il est possible qu'elle continue (Hadrien, pp. 4-5). Même chose pour Cassandra (p. 4) : après avoir affirmé que la flèche continuera, elle affirme qu'elle finira par s'arrêter. Même chose pour Simon (p. 4) qui dit d'abord que la flèche s'arrêtera presque tout de suite, pour ensuite dire que la flèche ne s'arrêtera jamais et, finalement, affirmer que la flèche va arrêter si elle est lourde. Même chose pour Clara (p. 4) qui change d'idée trois fois en moins de dix minutes d'entrevue et qui va même jusqu'à affirmer qu'une fois arrêtée, la flèche va se remettre à bouger, pour finalement avouer qu'elle ne sait pas. Bref, tous les élèves ont remis en question leur utilisation de la p-prim d'atténuation. Un seul par contre a réellement abandonné sans hésitation la p-prim d'atténuation au profit du principe d'inertie et c'est Vincent.

Le cas de Vincent est particulièrement intéressant non seulement parce qu'il a clairement laissé tomber la p-prim d'atténuation pour le principe d'inertie, mais parce que son changement dans l'utilisation des p-prim se produit en même temps que

début l'introduction de la notion de frottement. Quand l'interviewer demande à Vincent ce qui arrivera à la flèche si on enlève la gravité, il affirme :

C'est comme n'importe quoi, la flèche va ralentir à un moment donné. Mais comme elle ne sera plus attirée vers le sol, elle va flotter un peu dans les airs, parce qu'il n'y aura plus de vitesse et elle va rester là. (Vincent, p. 24)

Si on demande à Vincent pourquoi la flèche s'arrête, il répond que ce n'est rien d'autre que le temps qui fera arrêter la flèche :

Interviewer : Qu'est-ce qui fait ralentir la flèche ?

Vincent : C'est comme n'importe quoi. Si on lance une balle, au fur et à mesure, elle va perdre de la vitesse. Quand elle aura plus de vitesse...

Interviewer : Ma question, c'est qu'est-ce qui fait perdre de la vitesse ?

Vincent. Le temps un peu. Si on la tire, évidemment, ça va avancer, mais c'est sûr qu'elle fera pas le tour de la terre à 80km/h; c'est sûr qu'elle va arrêter à un moment donné. Si on tirait une flèche dans l'espace... Ou quand il y a un peu de gravité, si tu la tires, elle va arrêter avant d'avoir même pas fait l'Amérique. (Vincent, p. 24)

Après avoir exploré la situation sans gravité, l'interviewer affirme qu'il est possible également d'enlever la résistance de l'air et la friction. À ce moment, Vincent propose de tout enlever (gravité, résistance de l'air, frottement). Lorsqu'on lui demande ce qui arrivera, il dit : « Comme il n'y a plus de frottement, ça ne perdra plus de vitesse et ça va rester à une vitesse constante ». Et plus loin :

Moi je dis que ça va garder une vitesse constante, parce qu'il n'y aura plus de résistance. Elle va avancer, elle va avancer. Comme s'il n'y a pas de résistance, je pourrais donner une pichenotte à une chose, ça n'avancerait pas beaucoup, mais ça ferait le tour de la terre parce qu'il n'y aurait pas de résistance du tout. Donc ça va garder une vitesse constante. (Vincent, p. 26)

Il est surprenant de remarquer que Vincent n'avait jamais parlé du frottement auparavant. Il n'avait jamais dit que, s'il n'y a pas de frottement, l'objet va continuer indéfiniment et, soudainement, simplement parce que l'interviewer a parlé de

frottement, Vincent est passé du principe du repos au principe d'inertie. Le principe d'inertie n'est pas encore utilisé de façon organisée et systématisée, parce qu'un peu après, Vincent retourne dans la logique du principe du repos. Puis, il retourne de nouveau au principe d'inertie, qu'il gardera cette fois :

Interviewer : Tu m'as dit à plusieurs reprises...

Vincent : Comme n'importe quoi ! [Rires]

Interviewer : C'est en plein ça : quand on lance la flèche, comme n'importe quoi, c'est le temps qui va faire que ça arrête. [...]

Vincent : Bien s'il n'y a pas de frottement oui, elle va arrêter à un moment donné à cause du temps. Ah, mais non ! Même ça, non ! (Vincent, p. 26)

Par la suite, Vincent utilise toujours le principe d'inertie sans revenir à la p-prim d'atténuation. Il explique même le ralentissement des objets à l'aide de la notion de frottement et de résistance de l'air : « [la vitesse] diminue parce qu'il y a la résistance de l'air. Mais quand on enlève la résistance de l'air, ça garde une vitesse stable » (Vincent, p. 29). À la fin de la situation 3, Vincent affirme même qu'il est normal que les objets continuent leur mouvement s'il n'y a pas de résistance de l'air.

Il est particulièrement intéressant de noter le rôle de l'évocation de la notion de frottement dans cette évolution conceptuelle. Il semble que l'activation de la notion de frottement ait une très faible priorité d'appel dans l'exploration des situations. Jamais les élèves ne parlent de frottement ou de résistance de l'air. La p-prim d'atténuation, au contraire, semble, elle, avoir une très forte priorité d'appel. Cependant, lorsque la notion de frottement est évoquée, il semble que la p-prim d'atténuation se désactive par une forte priorité de « fiabilité ». Pour favoriser les processus de changement conceptuel, il pourrait être intéressant de trouver des moyens d'augmenter la priorité d'appel de la notion de frottement.

2.2 Remise en question de l'idée que la masse cause toujours une résistance au mouvement et incompréhension devant l'idée que la masse peut aider la continuation du mouvement

Dans l'analyse des effets d'un micromonde aristotélien, nous avons vu que les élèves utilisent la p-prim d'Ohm pour expliquer les effets de la force sur le mouvement de la boîte qui glisse sur le sol. Ils associent une augmentation de vitesse à une augmentation de force. À la force et la vitesse vient s'ajouter un troisième paramètre, la masse, qui fait office de résistance au mouvement. Pour une force donnée, la vitesse sera plus grande ou moins grande, selon la valeur de la masse. Une masse plus importante donne une vitesse plus lente et une masse moins importante donne une vitesse plus rapide (concept de masse en tant que résistance). Dans le micromonde inspiré de la théorie de l'impétus de la situation 3 (la flèche propulsée), la force n'est pas un paramètre que l'on peut contrôler. Seules la vitesse initiale et la masse de la flèche peuvent être modifiées. Malgré le fait qu'il ne soit plus question de force mais bien de vitesse initiale, les élèves continuent de concevoir la masse comme quelque chose qui s'oppose au mouvement. Pourtant, pour une vitesse initiale donnée, plus la masse est grande, plus les forces de frottement sont négligeables et plus l'objet propulsé a tendance à conserver sa vitesse initiale (concept de masse en tant que mesure de l'inertie). Les élèves trouvent très bizarre le fait que la distance augmente avec la masse et sont amenés à réfléchir sur le rôle de la masse comme étant exclusivement une mesure de la résistance au mouvement.

Au début de l'exploration de l'effet de la masse dans la situation 3, Vincent abaisse la masse à trois reprises afin que la flèche se rende plus loin (Vincent, p. 20) et ce, malgré le fait qu'il voit qu'en diminuant la masse, la flèche se rend moins loin. Il finit par dire que c'est bizarre et qu'on « dirait que ça va plus loin quand on augmente la masse, contraire à l'autre [situation] » (Vincent, p. 20). Ensuite, il augmente la masse et constate que la flèche se rend plus loin. Durant le reste de l'entrevue (une trentaine de minutes), les questions de l'interviewer ne portent pas sur cet effet « bizarre » de la masse, mais malgré cette trentaine de minutes écoulées sans

en parler, Vincent n'a pas oublié qu'il trouvait l'effet de la masse un peu bizarre. C'est en fait le principal commentaire qu'il fait à la fin de l'exploration de la situation 3 :

Interviewer : Avant de passer à la [situation] suivante, j'aimerais ça que tu me rappelles ce que tu te souviens par rapport à [cette situation].

[...]

Vincent : Je me rappelle aussi que c'était bizarre, parce que moins de masse... [...] Plus on donnait de masse, plus ça allait loin. [...]

Interviewer : Tu as qualifié ça de bizarre, n'est-ce pas?

Vincent : Oui, parce que quand on fait des avions, on essaie de prendre des matériaux légers pour que ça puisse mieux voler. D'habitude, quand c'est lourd ça tombe plus; donc c'est ça que je trouve bizarre.

Vincent constate l'effet inertiel de la masse, mais ne le comprend pas et le qualifie de « bizarre ».

Très clairement, Camille pense également qu'il est bizarre que la distance de la flèche augmente quand on augmente la masse. Par contre, au début, avant même avoir fait des essais, elle affirme : « si la masse est plus grande, elle ira plus loin, parce que... Elle ira plus loin, mais je ne sais pas pourquoi » (Camille, p. 20). De plus, elle fait plusieurs essais en utilisant ce principe de masse-plus-grande-donne-distance-plus-loin. Il n'est pas évident de dire si Camille possédait dès le départ l'idée intuitive que les flèches plus lourdes vont plus loin si on les propulse à la même vitesse initiale ou s'il ne s'agissait que d'un choix au hasard. Une chose est certaine cependant, c'est que cette utilisation du concept de masse favorisant le mouvement ne dure pas. Sans qu'il y ait d'événement particulier, Camille remet tout de suite sa conception de l'effet de la masse en question :

Camille : Ce n'est pas assez... C'est trop même peut-être. [Camille parle de la masse. Lors de l'essai précédent, la flèche n'était pas allée assez loin. Camille propose d'abord d'augmenter la masse en disant que ce n'est pas assez, puis elle dit que la masse est peut-être même trop haute.]

Interviewer : Trop ?

Camille : Oui, je vais essayer moins, parce que si la masse est plus grande... Oui, c'est cela. Si la masse est plus grande, ce sera plus lourd, alors la vitesse sera moins grande. Si la masse est plus petite, la vitesse pourra être plus grande et elle pourra aller plus loin. Je vais baisser la masse à 1. (Camille, p. 21)

Par la suite, Camille s'engage obstinément à trois reprises à diminuer la masse pour que la flèche tombe plus loin. Elle finit par être confuse en affirmant : « Donc, je vais monter... Non, descendre... » (Camille, p. 21). Lorsqu'on la questionne, elle affirme finalement qu'elle s'était trompée et que la masse plus grande permet à la flèche d'aller plus loin :

Interviewer : Qu'arrive-t-il lorsque tu diminues la masse ?

Camille : Je ne comprends pas.

Interviewer : Depuis tantôt, tu es partie de 3 et tu as diminué la masse.

Camille : Quand la masse était à 3, la flèche allait trop loin. Quand j'étais à 2,5, la flèche allait moins loin. Alors, si je descends, la flèche ira de plus en moins loin et elle tombera entre la ligne grise et la bleue.

Interviewer : Mais tantôt, tu ne disais pas que plus la masse est grande moins la flèche ira vite ?

Camille : Oui, mais je pense que je me suis trompée. Plus la masse est grande, plus la flèche se rend loin. Plus la flèche est petite, moins la flèche se rend loin.

Plus loin au cours de l'entrevue, l'interviewer demande comment faire pour que la flèche ne s'arrête jamais ou qu'elle continue le plus loin possible. Camille dit alors qu'il faut peut-être augmenter la vitesse et mettre le moins de masse possible (Camille, p. 25). Elle retourne donc avec le concept de masse-résistance. Bref, Camille hésite entre une conception de la masse et une autre, quoique le concept de masse-résistance lui soit beaucoup moins bizarre. Il est intéressant de noter que Camille ne fait jamais référence au frottement ni à la résistance de l'air.

Les autres élèves aussi expriment leur incompréhension devant les propriétés d'inertie de la masse. En faisant des essais, Hadrien réalise que plus la masse est

grande, plus la flèche tombe loin, mais il pensait que c'était l'inverse (Hadrien, p. 4). Plus tard, il augmente la masse pour que la flèche arrête plus vite, mais il finit par dire que, si la masse est plus grande, l'élan sera plus grand et donc la flèche ira plus loin (Hadrien, p. 5). Cassandra et Clara trouvent bizarre aussi que la flèche avec une masse plus grande tombe moins vite (Cassandra, p. 3; Clara, p. 3). Même chose pour Simon, sauf que lui affirme carrément que « ça ne fait pas ça dans la réalité » (Simon, p. 4).

En résumé, un des effets de l'utilisation d'un micromonde inspirée de la théorie de l'impétus est de remettre en question l'idée que la masse cause toujours une résistance au mouvement. Cette remise en question ne mène pas directement à l'adoption d'une nouvelle définition du concept de masse ou à une nouvelle délimitation du domaine d'applicabilité du concept de masse-résistance. Elle mène plutôt à une incompréhension profonde qui va de la négation (les élèves continuent à augmenter la masse, même s'ils s'éloignent de leur but) au refus (ce n'est pas comme cela dans la réalité).

3. Effets de l'utilisation d'un micromonde newtonien

Rappelons que les effets de l'utilisation d'un micromonde newtonien rapportés dans cette partie de l'analyse sont ceux observés suite à l'exploration d'un micromonde aristotélien, puis d'un micromonde inspiré de la théorie de l'impétus. Les effets observés sans cette exploration préalable auraient sans doute été différents. Rappelons aussi que l'exploration du micromonde newtonien se déroule en deux parties. On explore d'abord le comportement d'une balle qui roule sur différentes rampes (situation 4) et, ensuite, le comportement d'une balle lâchée du haut du mât d'un bateau en mouvement (situation 5). Rappelons finalement que, contrairement aux autres parties de l'analyse, Camille et Vincent se situent à des niveaux d'exploration différents. Même si nous verrons que Vincent n'utilise pas de façon récurrente et systématique le principe d'inertie dans ses explorations, il a intégré,

contrairement à Camille, la notion de frottement dans ses explications, ce qui engendre des explications différentes. Malgré cette importante différence entre les deux cas, on peut remarquer certains effets similaires. Premièrement, les deux élèves montrent de l'instabilité dans l'utilisation de la p-prim d'atténuation et du principe du repos. Ils activent la p-prim d'atténuation, puis la désactivent au profit du principe d'inertie, puis la réactivent... Ceci montre clairement une remise en question de l'utilisation de la p-prim d'atténuation dans les contextes newtoniens, mais cette remise en question demeure hésitante et fragile. Deuxièmement, on assiste à une complexification des critères de validité des principes due à une plus grande prise en compte du contexte. Les élèves n'activeront pas simplement la p-prim d'atténuation. Ils diront par exemple que les objets s'arrêtent toujours, mais que s'ils sont légers, ils ne s'arrêteront pas tout de suite ou, s'il n'y a pas de gravité, les objets ne s'arrêteront pas. Les critères de validité de Vincent intègrent la notion de frottement. Il va jusqu'à dire que s'il n'y a pas de résistance de l'air, l'objet continuera indéfiniment, mais que si tel n'est pas le cas, l'objet s'arrêtera.

3.1 Instabilité dans l'utilisation de la p-prim d'atténuation et du principe d'inertie

Lors de l'exploration du micromonde aristotélien, Camille utilisait la p-prim d'atténuation de façon constante et sans vraiment d'hésitation. L'exploration de la situation 3, où la flèche est décochée horizontalement dans les airs, a amené Camille à douter de la validité de la p-prim d'atténuation et à hésiter entre principe du repos et principe d'inertie. Dans les entrevues où Camille utilise le micromonde newtonien, cette hésitation est encore plus évidente. À de nombreuses reprises, Camille passe d'un principe à l'autre. N'ayant pas intégré la notion de frottement à son discours, elle n'arrive pas à construire un discours stable et cohérent lui permettant de régulariser son utilisation de la p-prim d'atténuation et du principe du repos.

Dès le début de l'exploration de la situation 4, Camille hésite :

La balle va tout le temps faire cela [osciller], sinon elle ralentira dans l'autre sens, parce que, lorsqu'elle va monter [sur la rampe], elle ira presque aussi vite quand elle va descendre que lorsqu'elle est partie au début [...] (Camille, p. 28)

[...]

Elle va sûrement s'arrêter [d'osciller] à un moment donné, à part si elle ne s'arrête pas. (Camille, p. 30)

Parfois, l'hésitation n'est pas explicite. Dans une même explication, Camille peut passer d'un principe à l'autre, sans faire de référence explicite au passage d'un principe à l'autre :

Interviewer : Si le creux n'est pas prononcé, s'il est assez large, est-ce que la balle continuera tout le temps d'osciller ?

Camille : Peut-être, parce que si le creux est long et large, la balle prendra de la vitesse pour aller de l'autre côté, mais elle s'arrêtera, parce qu'elle ne remontera plus et qu'elle ne descendra plus.

Interviewer : Que veux-tu dire ? Je ne comprends pas.

Camille : Quand la balle descend, elle a de la vitesse. Mais, si c'est large, elle aura le temps de s'arrêter puisque c'est plat... si le creux est plat... Parce que... Elle n'aura pas encore redescendu, elle va s'arrêter. (Camille, p. 32)

Par la suite, Camille utilise la p-prim d'atténuation et remet à nouveau en question cette utilisation. Dans la situation 5, le scénario est le même. Camille pense d'abord que si le bateau est en mouvement, la balle lâchée du haut du mât tombera dans le sens opposé au mouvement - c'est-à-dire qu'elle perdra de sa vitesse initiale horizontale, ce qui est contraire au principe d'inertie et conforme au principe du repos - puis elle saute d'un principe à l'autre. Parfois, elle dit que la balle ralentira, d'autres fois, qu'elle continuera avec le bateau. Il arrive aussi qu'elle dise clairement qu'elle hésite entre les deux : « Lorsqu'on lâchera la balle, soit qu'elle continuera toujours, comme avec la flèche, soit elle restera là » (Camille, p. 49).

Parlons de Vincent maintenant. Lors de l'exploration du micromonde inspiré de la théorie de l'impétus, il a clairement remis en question le principe du repos et montré qu'il adhérerait au principe d'inertie. Il est même allé jusqu'à intégrer la notion de frottement dans son discours. On aurait pu penser que Vincent allait utiliser le principe d'inertie de façon récurrente et systématique à partir de ce moment, mais tel n'est pas le cas. Comme Camille, les explications de Vincent ne sont pas constantes. Il adhère d'abord clairement au principe du repos : « Bien, c'est sûr que [la balle va ralentir] à force de monter. » (Vincent, p. 33). Ensuite, il semble comprendre pourquoi le mouvement d'oscillation de la balle n'arrête pas :

Ah, je viens de comprendre un peu parce que, quand je l'ai fait partir, elle a pris de la vitesse et elle a remonté et d'où c'est pris, elle a repris de la vitesse. Donc, en fait, je pense que ça peut vraiment fonctionner indéfiniment. (Vincent, p. 34)

Mais il avoue un peu plus tard qu'il « trouve ça vraiment spécial » et que, si on était dans la réalité, « après 3 ou 4 coups comme ça, ça aurait arrêté » (Vincent, p. 35). Vincent demande à ce moment à l'interviewer s'il n'aurait pas enlevé la résistance de l'air et ce dernier répond que oui. À nouveau, on pourrait penser que Vincent a rejeté définitivement le principe du repos au profit du principe d'inertie, d'autant plus qu'il intègre à ce moment la notion de frottement. Pourtant, Vincent montre encore une hésitation et une instabilité certaine et, après avoir utilisé le principe du repos, Vincent retourne au principe d'inertie.

En fait, il semble que, lorsque la notion de frottement n'est pas présente dans l'esprit de Vincent, il utilise le principe d'inertie et que, dès que la notion de frottement est activée, elle désactive la p-prim d'atténuation et active le principe du repos par une très forte priorité de « fiabilité ». Cela se produit au moins à trois reprises. Une première fois où c'est l'interviewer qui active la notion de frottement :

Interviewer : Si on enlève l'air. [...]

Vincent : Bien d'après moi, ça va continuer indéfiniment, il n'y aura pas de résistance. (Vincent, p. 36)

Et deux fois où c'est Vincent lui-même qui se met à parler du frottement ou de la résistance de l'air :

Vincent : Vous n'auriez pas enlevé le frottement, vous-là ?

Interviewer : [...] On peut regarder... Il n'y a pas de résistance de l'air.

Vincent : Ah! C'est pour cela que ça n'arrête pas! [Rires]

Interviewer : Tu penses que c'est pour ça que ça n'arrête pas ?

Vincent : Sûr. (Vincent, p. 35)

[...]

Vincent : Non, non. Ce que je veux dire, c'est que je crois que vous avez enlevé la résistance de l'air là-dessus parce que dans toutes les quatre [situations], il n'y avait pas de résistance de l'air. Donc, c'est sûr que ça va continuer [...] (Vincent, p. 41)

En terminant, mentionnons que cette instabilité dans l'utilisation de la p-prim d'atténuation n'est pas aussi présente chez les autres élèves. Ils adhèrent d'une façon beaucoup plus stable au principe du repos. Cassandra est une exception notable cependant. Comme Camille et Vincent, elle change de principe ou hésite à plusieurs reprises.

3.2 Complexification et contextualisation des critères de validité de la p-prim d'atténuation

Un deuxième effet observé à la fois dans les verbalisations de Camille et dans celles de Vincent est l'augmentation de l'importance du contexte lors de l'utilisation de la p-prim d'atténuation. Au début, les élèves utilisent cette p-prim de façon absolue et sans discuter des limites ou des critères de validité reliés à cette dernière. Puis, au cours des entrevues, le discours des élèves se complexifie pour expliquer les résultats obtenus à l'aide du micromonde. Ils n'affirment plus que l'objet s'arrêtera mais plutôt qu'on ne le verra pas s'arrêter dans la situation, parce qu'il met beaucoup

de temps avant d'arrêter, parce qu'il n'y a pas de gravité, parce qu'il est lourd ou parce qu'il n'y a pas de frottement : ils raffinent leur discours.

En cours d'exploration, malgré son instabilité dans l'utilisation du principe d'inertie, Vincent développe des critères de validité à l'utilisation de la p-prim d'atténuation. Il affirme lors de l'exploration de la situation 5 que la vitesse initiale horizontale de la balle est conservée (la balle suit le bateau) s'il n'y a pas de gravité, mais que s'il y a de la gravité, la vitesse horizontale diminue (et la balle touche le sol derrière le mât du bateau) (Vincent, p. 58). Ainsi, il affirme que la p-prim d'atténuation n'est vrai qu'en présence de gravité; il ajoute un critère de validité qui tient compte du contexte. À d'autres moments, Vincent utilise le frottement comme critère de validité (Vincent, p. 35; p. 36; p. 39; p. 41; p. 43; p. 44; pp. 46-47; p. 62, p. 63), ce qu'il avait commencé à faire lors de la situation 3, mais qu'il systématise davantage lors des situations 4 et 5 : s'il y a du frottement, la p-prim d'atténuation est valide et les objets en mouvement finissent par s'arrêter. Par contre, en l'absence de frottement, les objets n'arrêtent pas et continuent indéfiniment. Vincent approfondit sa prise en compte du contexte jusqu'à faire la distinction entre deux types de frottement : « Il y a deux sortes de résistances. Quand tu glisses, il y a la friction. Et il y a la résistance de l'air [...] » (Vincent, p. 47).

Contrairement à Vincent, Camille ne tient jamais compte du frottement dans ses explications. Elle n'ira pas jusqu'à affirmer que les objets arrêtent ou continuent selon la présence ou l'absence de frottement. Pourtant, comme pour Vincent, on assiste à une complexification et une contextualisation de l'utilisation de la p-prim d'atténuation. Camille n'affirme plus simplement que les objets en mouvement s'arrêtent. Par exemple, dans la situation 4 où la balle roule sur différents plans inclinés, après que l'interviewer ait demandé s'il existe une façon pour que la balle n'arrête pas, elle précise qu'il « ne faudrait pas mettre de creux ou un creux plus petit » (Camille, p. 31). Juste après elle affirme cependant que, même avec un très petit creux, la balle s'arrêtera quand même, mais que ce sera long. Ce qui est intéressant, c'est que le discours de Camille se raffine. Plus loin dans l'entrevue,

après avoir observé que la balle ne s'arrêtait pas, Camille en vient à inclure la masse dans son discours pour expliquer ses observations et le domaine de validité de son principe du repos :

Interviewer : Que penses-tu du comportement de cette balle qui ne s'arrête pas tout de suite et qui continue longtemps ?

Camille : Je ne sais pas trop. Je pense que la balle est quand même légère. Ce n'est pas comme une balle vide, mais elle est légère comme une balle de golf. (Camille, p. 36)

Pour expliquer que la balle ne s'arrête pas, Camille parle aussi du fait que, selon elle, la balle prend tellement de temps avant d'arrêter que nous n'avons pas le temps de la voir s'arrêter dans la situation (Camille, p. 37). Après que l'interviewer ait demandé de comparer la situation 1, où une boîte glisse sur le sol et s'arrête, et la situation 4, où une balle roule sur un plan incliné et ne s'arrête pas, Camille précise que si la balle « s'arrête après longtemps ou qu'elle ne s'arrête pas » (Camille, p. 40), c'est parce qu'elle roule, contrairement à la balle qui glisse. La notion de frottement est vaguement présente à ce moment, mais Camille n'approfondit pas son rôle : elle ne fait que mentionner qu'une balle qui roule continuera un bon bout de temps, « sauf si elle frotte quelque chose » (Camille, p. 40), mais sans plus. En plus de préciser son discours avec la notion de masse et celle de roulement, cette élève, à la fin de l'exploration de la situation 5, parle également de gravité, en disant que l'absence de gravité dans la situation explique le fait que la balle suive le mouvement du bateau, mais que dans la réalité (en présence de gravité), le bateau devrait se déplacer plus vite que la balle : « La balle continuera avec le bateau, parce que le bateau, s'il n'a pas de gravité, c'est un peu le sens, le courant dans le sens où les objets vont » (Camille, p. 51).

La complexification et la contextualisation ne sont pas aussi importantes chez certains élèves qui ont davantage tendance à nier la possibilité que le principe d'inertie soit valable et ce, peu importe le contexte. Il est vrai qu'ils hésitent assez souvent entre le principe de repos (ce qu'ils pensent) et le principe d'inertie (ce qu'ils observent dans la situation), mais ils n'essaient pas de concilier les deux en se servant

du contexte (masse, gravité, frottement, etc.). Ils affirment que, dans la réalité, ça ne se passe pas comme cela (Hadrien, p. 7; Simon, p. 6). Ils essaient sans relâche d'augmenter la vitesse du bateau, même s'ils voient que la balle suit toujours le bateau (Hadrien, p. 8). Ils affirment que l'ordinateur a un problème (Clara, p. 6, p. 7). Même si la tendance à tenir compte davantage du contexte est moins frappante avec ces élèves, elle est tout de même présente. Simon (p. 5) et Hadrien (p. 6) utilisent la gravité pour expliquer certaines observations. Cassandra (pp. 6-7) affirme que le vent et la gravité empêchent la balle de continuer avec le bateau.

L'exploration d'un micromonde newtonien a pour effet de rendre le discours des élèves instables (ils passent sans trop de logique d'un discours fondé sur le principe du repos à un discours fondé sur le principe d'inertie) et d'encourager une prise en compte plus grande du contexte dans lequel se déroule le mouvement.

4. Effets de la réutilisation des micromondes suite à une première exploration

Après avoir exploré une première fois les situations, les sujets refont un bref survol de chacun des micromondes. Le but est d'observer si les interactions entre le sujet et le micromonde ont évolué suite à une première exploration. L'analyse des entrevues montre que l'utilisation du principe d'inertie se fait plus fréquente et plus constante que lors de l'exploration initiale des micromondes. On assiste aussi à une augmentation de la priorité d'appel de la notion de frottement qui, rappelons-le, était particulièrement faible dans l'analyse des entrevues précédentes.

4.1 Stabilisation relative de l'utilisation du principe d'inertie

Parler ici de stabilisation complète de l'utilisation du principe d'inertie serait une erreur dans le cas de Camille. En effet, même lors de la réexploration des micromondes, il arrive parfois qu'elle hésite entre la p-prim d'atténuation et le

principe d'inertie, ou passe rapidement d'un principe à l'autre sans justification convaincante. Mais, contrairement à ce qui a été observé précédemment, Camille semble accepter beaucoup plus facilement le principe d'inertie. Avant, lorsqu'elle observait des situations où les objets ne s'arrêtent pas (la flèche sans résistance de l'air, la balle roulant sur la rampe, etc.), elle refusait la plupart du temps d'accepter l'idée d'inertie. Pour elle, les objets allaient nécessairement s'arrêter un jour. Elle affirmait souvent que l'arrêt complet allait être long, mais il allait indubitablement arriver. Lors de la réutilisation des micromondes, Camille est beaucoup plus ouverte à accepter le principe d'inertie. Elle affirme que « s'il n'y a pas d'air, peut-être le bloc va tout le temps continuer » (Camille, p. 52) ou, avec plus d'hésitation, qu' « elle va continuer, mais peut-être qu'elle va s'arrêter plus loin ou ne pas s'arrêter » (Camille, p. 59). Elle va même souvent jusqu'à affirmer elle-même, à plusieurs reprises, que tel ou tel objet ne s'arrêtera jamais (Camille, p. 52; p. 53; p. 55; p. 60; p. 62; p. 63; p. 64; p. 65; p. 66). L'extrait suivant est un bon exemple illustrant l'ambivalence de Camille, penchant davantage vers le principe d'inertie :

Elle va arrêter ou elle ne va pas s'arrêter, mais je pense plus qu'elle ne s'arrêtera pas, parce que, s'il n'y a pas de résistance de l'air et pas de gravité, alors la balle va flotter, mais elle va continuer à bouger. (Camille, p. 65)

Vers la fin des entrevues, Camille se montre beaucoup plus confiante dans son utilisation du principe d'inertie : « Je pense que la balle va continuer éternellement. S'il n'y a pas d'air, pas de gravité, alors il n'y aura rien qui pourrait la faire arrêter » (Camille, p. 69). En résumé, même si nous n'assistons pas ici à une stabilisation parfaite de l'utilisation du principe d'inertie, il est clair que Camille accepte et utilise beaucoup plus souvent ce principe.

Pour Camille, nous avons parlé d'une stabilisation relative de l'utilisation du principe d'inertie. Pour Vincent, nous pouvons parler d'une réelle stabilisation : il utilise systématiquement le principe d'inertie. La seule exception notable est lorsqu'il explore l'effet de la variation de la masse sur la distance parcourue par la flèche pour une vitesse initiale donnée. D'abord, Vincent utilise une conception de la

masse comme étant une résistance au mouvement et ne comprend pas pourquoi une masse plus élevée permet d'aller plus loin, puis il explique :

Hey, c'est vrai ça. L'air a une force. Si c'est moins lourd, l'air va pouvoir mieux pousser. Si c'est plus lourd, elle va avoir plus de difficulté à pousser la flèche. Même quand c'est la même vitesse de départ, il va être plus facile de pousser une flèche légère que de pousser une flèche lourde. [...] L'air va avoir plus de facilité à le pousser parce qu'il est plus léger, alors que le lourd... (Vincent, pp. 70-71)

À l'exception de cet exemple, Vincent affirme toujours que les objets vont continuer dans telle ou telle situation (sans frottement, sans friction...). Il s'agit d'un changement plutôt important par rapport aux entrevues précédentes où il lui arrivait assez fréquemment de passer du principe d'inertie à celui du repos.

4.2 Augmentation du degré de priorité d'appel de la notion de frottement

Nous l'avons dit : l'un des effets de la réutilisation des micromondes est la stabilisation de l'utilisation du principe d'inertie. Une explication possible à cette stabilisation est l'augmentation de la priorité d'appel de la notion de frottement. Dans l'analyse des entrevues précédentes, nous avons mentionné que le frottement n'avait qu'une assez faible priorité d'appel. Ce n'est pas le cas ici : il est davantage question des effets de la présence ou de l'absence de frottement, et c'est peut-être pour cette raison que l'utilisation de la notion d'inertie se stabilise.

Dès le début de l'entrevue, Camille parle de la résistance de l'air, chose qu'elle n'avait jamais faite auparavant :

Interviewer : Qu'est-ce qui faisait arrêter le bloc ?

Camille : Il n'avait plus de vitesse.

Interviewer : Qu'est-ce qui faisait perdre de la vitesse au bloc ?

Camille : On le pousse, mais il y a toujours comme quelque chose en avant de lui qui le pousse dans un autre sens un peu, alors...

Interviewer : Répète cela.

Camille : Au début, on le pousse avec la vitesse, mais il y a toujours quelque chose en avant qui le pousse dans l'autre sens. [...]

Interviewer : Il y a quelque chose qui pousse dans l'autre sens... Qu'est-ce que c'est ?

Camille : C'est comme le vent, mais pas vraiment le vent. C'est comme l'air qui pousse. Puisque c'est une surface plane, c'est comme si on mettait un grand carton et qu'on poussait contre le vent. Parfois, c'est dur, parce que le vent est fort. C'est la même chose avec l'air. (Camille, p. 51)

Après ces explications, Camille affirme que « s'il n'y a pas d'air, peut-être que le bloc va tout le temps continuer » (Camille, p. 52). Par la suite, même si Camille utilise parfois le principe du repos, elle fait beaucoup plus souvent référence au principe d'inertie et même, parfois, elle utilise le frottement comme élément contextuel qui permet d'expliquer et de prendre position : « il va glisser tout le temps, parce qu'il n'a pas de frottement » (Camille, p. 55), « s'il n'y a pas d'air [...], elle remontera plus » (Camille, p. 60), « s'il n'y a pas de résistance de l'air, ça fera comme la flèche, peut-être que la balle ne s'arrêtera pas » (Camille, p. 64), « s'il n'y a pas d'air, pas de gravité, alors il n'y aura rien qui pourrait la faire arrêter » (Camille, p. 66). Dans le cas de Camille, c'est un changement plutôt radical que cette utilisation répétée de la notion de frottement, puisqu'auparavant, elle n'y faisait pas référence.

L'augmentation de la priorité d'appel de la notion de frottement est également présente lors des entrevues avec Vincent, et peut-être d'une façon encore plus accentuée. Rappelons que Vincent introduit la notion de frottement dès la situation 3. Pourtant, dans ses explications lors de l'exploration des situations 4 et 5, Vincent n'utilise pas d'emblée la notion de frottement. Au contraire, il a plutôt tendance à adopter le principe du repos, puis à faire des essais, pour enfin parler du frottement et finalement adhérer au principe du repos : la notion de frottement n'a qu'une faible priorité d'appel. Au cours de la dernière entrevue, c'est tout le contraire : une forte

priorité d'appel peut être associée à la notion de frottement. Dès le début, lorsque l'interviewer demande s'il est normal que la boîte arrête, Vincent répond : « Bien oui à cause du frottement » (Vincent, p. 66). De plus, Vincent contextualise presque toujours ses explications en verbalisant ce qui arrive avec et sans frottement : « Sans résistance de l'air, sans friction et avec gravité : on va commencer par ça. [...] elle va descendre et va rouler indéfiniment [...] » (Vincent, p. 75).

* * *

Le tableau 8 résume les effets de l'utilisation de chacun des micromondes. On remarque que le micromonde aristotélicien permet aux élèves d'explicitier ce qu'ils pensent du mouvement par l'activation de p-prims telles que la p-prim d'atténuation et la p-prim d'Ohm. Le micromonde inspiré de la théorie de l'impétus amène les élèves à se questionner sur la validité des p-prims qu'ils ont commencé à activer lors de l'exploration du micromonde aristotélicien. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, l'utilisation d'un micromonde newtonien ne permet pas de rejeter catégoriquement la p-prim d'atténuation et encore moins d'adhérer systématiquement au principe d'inertie. L'exploration du micromonde newtonien amène plutôt les élèves à hésiter entre la p-prim d'atténuation et le principe du repos. La réexploration de l'ensemble des situations amène cependant une certaine stabilisation de l'utilisation du principe d'inertie associée à une augmentation du degré de priorité d'appel de la notion de frottement.

Tableau 8: Effets de l'utilisation de micromondes historiques

Micromonde aristotélien	<ul style="list-style-type: none"> • Activation de la p-prim d'atténuation • Activation de la p-prim d'Ohm • Activation de la p-prim d'annulation et de la p-prim de dépassement lorsque la p-prim d'Ohm n'arrive pas à expliquer le phénomène
Micromonde inspiré de la théorie de l'impétus	<ul style="list-style-type: none"> • Remise en question hésitante de l'utilisation de la p-prim d'atténuation au profit de la notion d'inertie • Remise en question de l'idée que la masse cause toujours une résistance au mouvement et incompréhension devant l'idée que la masse puisse aider la continuation du mouvement
Micromonde newtonien	<ul style="list-style-type: none"> • Instabilité dans l'utilisation de la p-prim d'atténuation et du principe d'inertie • Complexification et contextualisation des critères de validité de la p-prim d'atténuation
Réutilisation des micromondes	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisation relative de l'utilisation du principe d'inertie • Augmentation du degré de priorité d'appel de la notion de frottement

5. Réponses aux questions de recherche

Dans les sections précédentes, nous avons discuté en détails des effets de l'utilisation de micromondes historiques, mais nous n'avons jamais répondu directement aux questions spécifiques, bien que tous les éléments de réponse aient déjà été présentés. Dans cette section, nous reprenons ces éléments de réponse afin de répondre directement et de façon concise aux questions spécifiques de la recherche. Rappelons d'abord la question générale de recherche : Quels sont les effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel reliés à la mécanique chez des élèves de cinquième année du primaire ? De cette question générale, nous avons retenu quatre aspects pouvant s'exprimer sous forme de quatre questions spécifiques de recherche.

5.1 Les situations permettent-elles l'activation de p-prims? Si oui, comment les élèves les utilisent-ils?

Comme le montre le tableau 9, l'utilisation de micromondes historiques permet d'activer différentes p-prim et, souvent, de différentes façons. La p-prim la plus fréquente est celle d'atténuation selon laquelle tout objet qui se déplace à une certaine vitesse voit sa vitesse diminuer progressivement jusqu'à devenir immobile. La p-prim d'Ohm a également été activée et ce, sous deux formes. La première, plus fréquente, utilisait la force comme agent et la vitesse comme résultat avec la masse comme résistance. Ainsi, plus on pousse fortement sur un objet, plus la vitesse constante à laquelle il se déplace est élevée. La masse joue un rôle de résistance : pour une force donnée, plus la masse est grande, plus la vitesse sera petite. La deuxième forme se manifestait lorsqu'il était question de la chute des corps : nous avions la masse comme agent du mouvement et la vitesse de chute comme résultat. Un objet tombe donc d'autant plus vite que sa masse est élevée.

Les p-prim d'annulation et de dépassement ont aussi été activées lors de l'exploration des micromondes. Le fait qu'un objet se déplace à une vitesse constante était parfois vu comme une lutte entre le paramètre « vitesse » qui contribue à faire avancer l'objet plus vite et le paramètre « masse » qui, au contraire, contribue au ralentissement des objets. Lorsqu'ils pensent que ces deux paramètres sont équivalents, certains élèves affirment qu'il est normal qu'un objet se déplace à une vitesse constante. La deuxième utilisation de la p-prim d'annulation place la masse en opposition à la force : lorsque la masse est aussi grande que la force, l'effet de mouvement de la force est annulé et l'objet reste immobile. Les élèves se sont parfois également servi de la p-prim de dépassement pour expliquer leurs observations ou faire des prédictions. Les façons d'utiliser cette p-prim sont cette fois plus nombreuses. Dans la première utilisation, la vitesse et la masse s'affrontent. Si l'agent le plus fort est la masse, alors l'objet ralentit. Dans la deuxième, si la force est plus grande que la masse, l'objet se déplace. Et finalement, lorsque la gravité pousse plus fort que la force externe exercée sur l'objet, ce dernier ralentit.

Tableau 9: P-prim activées lors de l'utilisation des micromondes historiques

P-prim activée	Utilisation		
Atténuation (« dying away »)	Ce qui diminue : vitesse		
Ohm	<u>Utilisation #1</u> Agent : force Résultat : vitesse Résistance : masse	<u>Utilisation #2</u> Agent : masse Résultat : vitesse de chute Résistance : dépend de l'élève	
Annulation (« cancelling »)	<u>Utilisation #1</u> Agent 1 : masse Agent 2 : vitesse Résultat : vitesse constante	<u>Utilisation #2</u> Agent 1 : masse Agent 2 : force Résultat : immobilité	
Dépassement (« overcoming »)	<u>Utilisation #1</u> Agent faible : vitesse Agent plus fort : masse Résultat : ralentissement	<u>Utilisation #2</u> Agent faible : masse Agent plus fort : force Résultat : déplacement	<u>Utilisation #3</u> Agent faible : force Agent plus fort : gravité Résultat : ralentissement

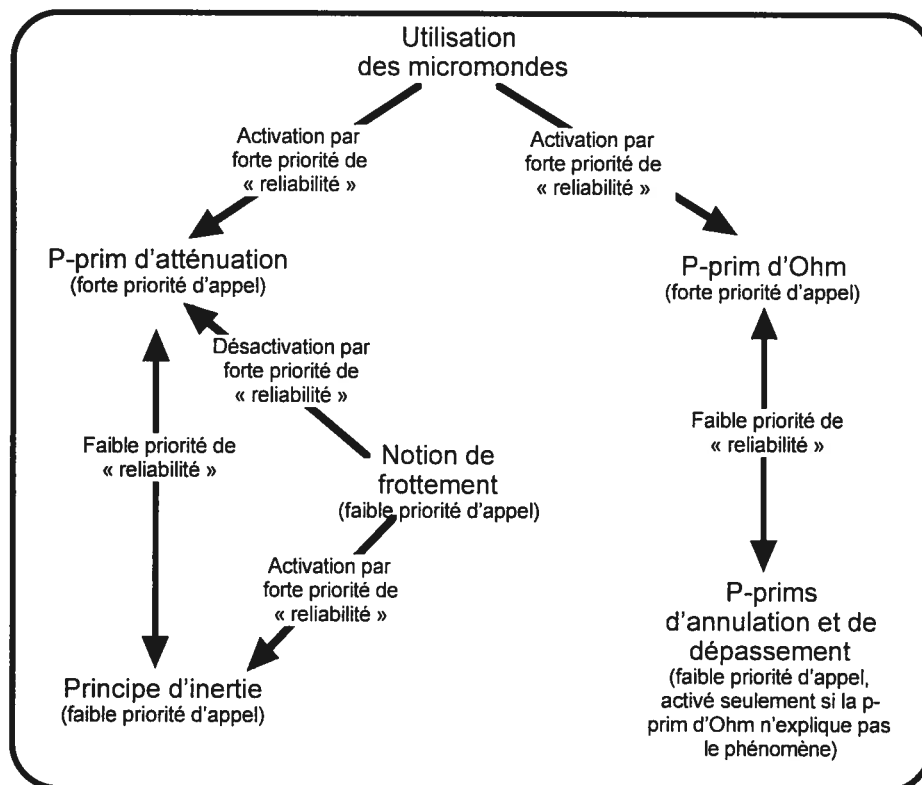
5.2 Quelles sont les priorités d'appel et de «reliabilité» des p-prim utilisées?

La figure 11 montre les différentes priorités d'appel et de «reliabilité» émergeant de l'analyse des entretiens. Il est clair que l'utilisation de micromondes historiques active avec une forte priorité d'appel la p-prim d'Ohm et, avec une très forte priorité d'appel, la p-prim d'atténuation. En fait, dès qu'il est question de force ou de chute des corps, la p-prim d'Ohm s'active et, dès qu'il est question du mouvement d'un objet sans l'intervention d'une force continue qui alimente le mouvement, la p-prim d'atténuation est activée.

En opposition les p-prim d'annulation et de dépassement ne montrent qu'une faible priorité d'appel. En fait, ce n'est que dans les cas où la p-prim d'Ohm ne fonctionne pas que les élèves, sans dire explicitement qu'ils changent d'idée, passent à la p-prim d'annulation ou de dépassement. Le principe d'inertie ne possède, lui aussi, qu'une très faible priorité d'appel. Dès qu'il est question d'objet en mouvement, la p-prim d'atténuation est activée et le principe d'inertie ne l'est pas; ce dernier présente donc une plus faible priorité d'appel. Au cours des entretiens, la priorité relative de la p-prim d'atténuation et du principe d'inertie se modifie; il en sera question plus loin.

L'un des aspects les plus intéressants de l'analyse des entrevues concerne la place et le rôle de la notion de frottement dans la compréhension des micromondes. Il a été surprenant de constater à quel point – et cela est surtout vrai au début des entrevues – l'utilisation de micromondes historiques ne permet que très difficilement d'activer la notion de frottement. En effet, les élèves ont tendance à utiliser toutes sortes de concepts (comme la gravité) plutôt que d'utiliser la notion de frottement. Pourtant, cette notion montre une assez forte priorité de « reliabilité » avec la p-prim d'atténuation et la notion d'inertie (cela est particulièrement vrai dans le cas de Vincent) : la notion d'inertie désactive la p-prim d'atténuation à son profit. Par contre, la p-prim d'atténuation n'est pas facilement mise en relation avec la notion d'inertie, ce qui semble rendre difficile le changement conceptuel.

Figure 11: Priorités d'appel et de « reliabilité » reliées à l'utilisation de micromondes historiques



5.3 Les situations permettent-elles aux élèves de remettre en question l'utilisation de leurs p-prim ?

L'utilisation de micromondes permet de remettre en question l'utilisation de la p-prim d'atténuation. Cette remise en question n'est cependant pas toujours claire. En fait, lors de l'exploration du micromonde aristotélicien, les élèves adhéraient clairement à la p-prim d'atténuation. Dès l'exploration du micromonde inspiré de la théorie de l'impétus, nous avons assisté à une remise en question, mais une remise en question hésitante. Parfois, ils utilisaient la p-prim d'atténuation, parfois le principe du repos. Lors du retour sur chacun des micromondes, nous avons assisté à une nette stabilisation de l'utilisation du principe d'inertie dans le cas de Vincent et à une stabilisation encore incomplète dans le cas des autres élèves.

5.4 Est-ce que le parcours des élèves à travers les micromondes permet d'organiser et de systématiser leur utilisation des p-prim ?

L'utilisation de micromondes historiques permet de systématiser et d'organiser partiellement l'utilisation du principe d'inertie. En effet, en cours d'exploration, on remarque une prise en compte toujours plus grande du contexte. Les élèves sont plus aptes à parler des critères de validité de la p-prim d'atténuation. Cette organisation est cependant en construction et, à la fin des entrevues, cette construction n'est encore que partielle.

Conclusion

Le but de la présente recherche était d'examiner les effets de l'utilisation d'une séquence de micromondes inspirés de l'histoire des sciences sur les processus de changement conceptuel reliés à la notion d'inertie auprès des élèves de cinquième année du primaire. L'analyse des entrevues avec les élèves a permis d'étudier quelques-uns des effets de l'utilisation de micromondes historiques.

Le tableau 10 résume les principales étapes de l'évolution conceptuelle observée au cours des entrevues. D'abord, les élèves utilisent spontanément la p-prim d'atténuation en disant que tout objet en mouvement finit par s'arrêter. Cette utilisation se fait de façon absolue, sans tenir compte du contexte : dans tous les cas, les objets en mouvement finissent par s'arrêter. Ensuite, les élèves se montrent un peu plus hésitants : peut-être que la p-prim d'atténuation n'est pas valide dans tous les contextes. Cette remise en question se fait progressivement au cours de l'exploration des micromondes. Au cours de l'étape qui suit, il n'est pas rare de voir les élèves passer du principe du repos au principe d'inertie sans en prendre réellement conscience. Cela est déjà le signe d'une évolution conceptuelle significative : les élèves n'utilisent plus spontanément et sans nuance la p-prim d'atténuation. Rien n'est encore clair dans leur esprit, mais, à ce stade, ils sont capables d'envisager qu'un objet puisse ne jamais s'arrêter, ce qui n'était pas le cas auparavant. Il vient un moment où les élèves essaient d'expliquer ou de justifier pourquoi les objets en mouvement s'arrêtent ou ne s'arrêtent pas aussi vite qu'ils le croyaient. On assiste alors à une phase de complexification et surtout de contextualisation des critères de validité de la p-prim d'atténuation. Les élèves ne diront plus de façon absolue que tout objet en mouvement s'arrête; ils diront plutôt que dans telle ou telle situation il se peut que l'objet ne s'arrête pas tout de suite ou qu'il n'arrête jamais. Finalement, on remarque une utilisation plus fréquente et systématique du principe du repos, en particulier chez Vincent, qui a intégré la notion de frottement au discours.

Cette étude a permis d'identifier l'un des effets les plus intéressants de l'utilisation de micromondes historiques : la contextualisation des affirmations suite à

une progression du micromonde le plus intuitif et conforme au sens commun, voire le plus terrestre (micromonde aristotélicien) à un micromonde beaucoup plus abstrait où le frottement peut être absent (micromonde newtonien). L'avantage principal de l'utilisation de micromondes historiques dans l'apprentissage de la notion d'inertie semble être de favoriser progressivement le passage du plus concret au plus idéalisé.

Tableau 10: Étapes de l'évolution conceptuelle observée au cours de l'exploration des micromondes historiques

1. Les élèves utilisent spontanément et inconditionnellement la p-prim d'atténuation pour expliquer ou prédire le comportement d'un objet en mouvement.
2. Placés dans un contexte où la p-prim d'atténuation n'est plus inconditionnellement vraie, les élèves remettent en question avec hésitation la validité de la p-prim d'atténuation.
3. Après cette remise en question hésitante, les élèves utilisent de façon instable parfois la p-prim d'atténuation et parfois le principe d'inertie sans pouvoir expliquer pourquoi ils choisissent l'un plutôt que l'autre.
4. Les élèves cherchent à délimiter le domaine de validité de la p-prim d'atténuation en tenant compte du contexte : si telle condition est remplie ou ne l'est pas, alors l'objet s'arrêtera ou ne s'arrêtera pas.
5. Une fois le domaine de validité circonscrit, l'utilisation du principe d'inertie se montre plus stable (particulièrement stable dans le cas de Vincent et un peu moins dans le cas de Camille).

Même si l'analyse des entrevues permet de constater les effets positifs de l'utilisation des micromondes historiques pour favoriser le changement conceptuel, il convient de demeurer prudent face à ces conclusions. Il faut d'abord questionner le caractère généralisable de ces conclusions. En tout, seulement six élèves ont exploré les micromondes. De ces six élèves, seules les verbalisations de deux élèves ont été entièrement transcrites, puis analysées. Les entrevues des quatre autres élèves n'ont servi au cours de l'analyse qu'à trianguler les interprétations découlant des verbalisations des deux principaux sujets. Il faut donc regarder les conclusions de cette étude comme des exemples d'effets de l'utilisation de micromondes historiques plutôt que comme des effets généralisés.

Il faut aussi éviter d'associer trop rapidement les effets positifs rapportés dans cette étude à l'histoire des sciences ou à l'utilisation de situations informatisées. Essayer de savoir si c'est l'histoire des sciences ou bien l'utilisation de l'informatique

qui a eu des effets positifs sur le changement conceptuel n'est pas une question à laquelle cette étude peut répondre. Nous avons étudié les effets de l'utilisation combinée de l'histoire des sciences et de l'informatique. Il est impossible de pondérer l'importance relative de chacun de ces aspects.

Ces deux limites à cette étude (généralisabilité restreinte et impossibilité d'associer les effets positifs exclusivement à l'histoire des sciences) ouvrent la porte à des études plus approfondies. Il serait pertinent de reprendre la présente étude, mais avec un nombre plus important de sujets afin de vérifier si les conclusions demeurent les mêmes. Aussi, il pourrait être intéressant de mettre de côté la dimension « micromonde » pour se limiter aux effets de l'utilisation de l'histoire comme approche pour l'enseignement des sciences.

Cette étude ouvre également la voie à de nombreuses autres études. On pourrait par exemple reprendre le concept de micromondes historiques et le transférer à d'autres domaines de connaissances comme des micromondes historiques sur l'électricité, les réactions chimiques, etc. On pourrait également chercher à comprendre pourquoi la notion de frottement montre une si faible priorité d'appel alors qu'elle a un rôle crucial dans la compréhension de la notion d'inertie. Une autre option pourrait être de développer des micromondes historiques à des fins d'enseignement plutôt que de recherche. On pourrait reprendre les micromondes de cette étude et les adapter pour qu'ils puissent servir dans les classes des écoles primaires en développant entre autre un protocole d'exploration libre (sans interviewer) destiné aux élèves afin qu'ils explorent de façon autonome les micromondes.

Bibliographie

Aristote (2002). *Physique*. Paris : Flammarion.

Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology : a cognitive view*. New York: Holt, Rinehart & Winston.

Confrey, J. (1990). A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming. In C. B. Cazden (Ed.), *Review of Research in Education*, 16 (pp. 3-56). Washington, NW: American Educational Research Association.

De Berg, K. (1989). The emergence of quantification in the pressure-volume relationship for gases: a textbook analysis. *Science Education*, 73 (2), 115-134.

diSessa, A. A. (1982). Unlearning aristotelian physics: A study of knowledge-based learning. *Cognitive science*, 6(1), 37-75.

diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10 (2 & 3), 105-225.

Driver, R. & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.

Dugas, R. (1950). *Histoire de la mécanique*. Paris : Éditions du Griffon Neuchâtel.

Duhem, P. (1914). *La théorie physique : son objet, sa structure, deuxième édition*. Paris : Marcel Rivière & Cie Éditeurs.

Gabel, D., Sherwood, R., & Enochs, L. (1984). Problem-solving skills of high school chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, 21, 221-233.

Gagnon, M. & Hébert, D. (2000). *En quête de sciences : introduction à l'épistémologie*. Montréal : Fides.

Gingras, Y., Keating, P. & Limoges, C. (1998). *Du scribe au savant : les porteurs du savoir de l'Antiquité à la révolution industrielle*. Montréal : Les Éditions du Boréal.

Goulard, B. (2000). *Évolution des concepts en physique*. Notes de cours non publiées.

Hegel, (1993). *Phénoménologie de l'esprit*. Paris : Gallimard

Johnston, A. T., & Southerland, S. A. (2001, March). *Conceptualizing the nature of science: Extra-rational evaluations of tiny atoms, round planets, and big bangs*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association of Research in Science Teaching, St. Louis, MO.

Kaufman, D. R., Vosniadou, S., diSessa, A. A. & Thagard, P (2000). Scientific Explanation, Systematicity, and Conceptual Change (pp. 5-9). In L. Gleitman & A.K. Joshi (eds.), *Proceedings of the Twenty-First Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Mahwah ,NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press. Traduction utilisée : Kuhn, T. S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.

Lakatos, I. (1970). Falsifications and the methodology of scientific research programs. In I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and The Growth of Knowledge*, (pp. 91-196). Cambridge: Cambridge University Press.

Larochelle, M. & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Québec : PUQ.

Legendre, M.-F. (1995). Analyse d'une activité d'apprentissage à l'aide du modèle de l'équilibration. *Revue des sciences de l'éducation*, 21(3), 473-502.

Legendre, M.-F. (1997). Task analysis and validation for a qualitative, exploratory curriculum in force and motion. *Instructional science*, 25, 255-305.

Lin, H.-S. (1998). The effectiveness of teaching chemistry through the history of science. *Journal of Chemical Education*, 75, 1326-1330.

Lin, H.-S., Hung, F.-Y., & Hung, S.-C (2002). Using the history of science to promote students' problem-solving. *International Journal of Science Education*, 25 (5), 453-464.

Linder, C. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, 77, 293-300.

Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23 (1), 55-81.

Mach, E. (1943). On instruction in the classics and sciences. In *Popular Scientific Lectures*. La Salle: Open Court Publishing.

Matthews, M. R. (1989). History, philosophy and science teaching: a brief review. *Synthese*, 80, 1-8.

Matthews, M. R. (1994). *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York: Routhledge.

Monk, M. & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: a model for the development of pedagogy. *Science Education*, 81, 405-424.

Nakhleh, M. B. (1993). Are our students conceptual thinkers or algorithmic problem solvers ? *Journal of Chemical Education*, 70 (1), 52-55.

Nakhleh, M. B. & Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving, there is a difference. *Journal of Chemical Education*, 70 (3), 190-192.

Nersessian, N. J. (1991). Conceptual change in science and in science education (p. 126-142). In M. R. Matthews (ed.), *History, philosophy and science teaching*. Toronto : Teachers College Press.

Papert, S. (1981). *Jaillissement de l'esprit*. Paris : Flammarion.

Pintrich, P. R., Marx, R. W. & Boyle R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: the role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63 (2), 167-199.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.

Potvin, P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuel en physique au secondaire*. Thèse, Université de Montréal.

Rosmorduc, J. (1979). *Histoire de la physique et de la chimie de Thalès à Einstein*. Paris : Éditions Études Vivantes.

Sequeria, M. & Leite, L. (1991). Alternative conceptions and history of science in physics teacher education. *Science Education*, 75 (1), 46-56.

Southerland, S. A., Abrams, E., Cummins, C. L., & Anzelmo, J. (2001). Understanding students' explanations of biological phenomena: conceptual framework or p-prims? *Science Education*, 85, 328-348.

Strike, K. A. & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change (pp. 147-176). In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Eds.), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology, and Educational Theory and Practice*. New York: State University of New York.

Thouin, M. (1996). *Les conceptions des élèves et les activités d'apprentissage en sciences de la nature au primaire*. Montréal : Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal.

Thouin, M. (1997). *La didactique des sciences de la nature au primaire*. Sainte-Foy : Éditions Multimondes.

Toulmin, S. (1972). *Human understanding : general introduction and part I*. Princeton: Princeton University Press.

Vermesh, P. (1994). *L'entretien d'explicitation*. Paris : ESF.

Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *International Journal of Science Education*, 1 (2), 205-221.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.

Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 177-210). New York: Macmillan.

Annexes

Annexe 1 : Extraits des entretiens avec Camille

[p. 1]

Entrevue 1

Situation 1

[...]

[p. 4]

I : Pourquoi il est écrit vitesse puisque tu as dit que c'est la distance?

C : C'est peut-être la vitesse à laquelle la boîte part. Comme cela, la boîte est propulsée plus loin.

I : Pourquoi la boîte arrête en chemin?

C : Parce qu'il n'y a plus de vitesse.

I : Qu'est-ce qui arrive à cette vitesse?

C : Je ne sais pas.

[...]

[p. 5]

I : Tu as l'air songeuse. À quoi penses-tu?

C : La force veut peut-être dire : plus c'est haut, moins ça va vite [C voulait dire plus vite comme nous le verrons plus loin]. S'il y a moins de force, la boîte ira moins vite.

I : Tu as dit que plus la force est haute, plus la boîte va vite?

C : Oui, parce que la boîte peut-être plus lourde, alors elle ira moins vite. C'est cela.

I : Répète, car je veux être certain de bien comprendre.

C : La force veut peut-être dire si la boîte est lourde ou pas. C'est un peu comme la masse, mais c'est pour aller plus vite ou moins vite.

I : Tu dis que la force est un peu comme la masse?

C : Oui, c'est la force à laquelle elle va, mais c'est comme un peu la vitesse et la masse. C'est entre les deux.

I : C'est entre les deux? Veux-tu m'expliquer?

C : La masse, c'est le poids. Si la masse est très haute, la boîte ira sûrement moins vite. Si la vitesse est plus haute, la boîte ira plus vite. Alors, la force, c'est entre les deux. La boîte ira vite. Si on place la vitesse 4,5, la boîte se déplacera moyennement vite. Si on place la vitesse plus bas, la boîte ira sans doute plus vite ou moins vite.

I : Je n'ai pas compris pourquoi tu places la force entre la vitesse et la masse.

C : Parce que la masse...

I : Tu disais que la masse faisait diminuer la vitesse.

C : Parce que c'est plus lourd.

I : La vitesse, plus c'est haut, plus la boîte sera propulsée rapidement.

C : La force, je la place entre les deux, parce que c'est un peu la même chose. C'est entre la vitesse et la masse, parce que la masse fait que la boîte se déplace plus lentement ou plus vite et, la vitesse, c'est la vitesse à laquelle la boîte se déplacera. Si on place la vitesse plus haut, la boîte ira plus loin et, plus bas, moins loin.

I : Où se situe la force? C'est cela que je ne comprends pas.

C : C'est ni l'un, ni l'autre.

[p. 6]

I : OK, ni l'un, ni l'autre.

C : C'est un peu entre les deux.

I : C'est différent. Et que fait la force exactement?

C : La force fait avancer, mais avec une masse.

I : Avant il n'y avait pas de masse?

C : Oui, il y avait sûrement une masse, mais moins.

I : Le fait d'augmenter la force augmente la masse? C'est cela?

C : Oui, mais il y a aussi la vitesse en même temps.

I : Parfois, je vais te demander d'expliquer ce que tu dis, parce que je veux être certain de comprendre ce que tu dis et, parfois, c'est très difficile de le dire clairement et c'est pourquoi je vais te poser des questions pour comprendre.

[...]

[p. 8]

I : J'aimerais que la vitesse de la boîte bleue augmente.

C : La plus vite?

I : Qu'elle augmente. Je veux que la boîte bleue se déplace de plus en plus rapidement, qu'elle accélère

C : Est-ce que je prends juste la force?

I : Oui, tu ne peux déplacer que la force.

Vitesse : 0

Force : [env. 5 : vitesse de 0,4]

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte se déplace et n'arrête pas.]

I : La vitesse est de 0,4m/s. J'aimerais que la vitesse augmente.

C : Peut-être...

I : À quoi as-tu pensé?

C : Je me demande si on pouvait changer la force durant l'essai, mais cela ne fonctionne pas.

I : Tu penses qu'en changeant la force en cours de route...

C : La boîte ira plus vite.

I : Veux-tu l'essayer?

<C augmente la force durant le mouvement de la boîte.>

[La boîte accélère.]

C : Ah oui, ça fonctionne.

[p. 9]

I : Comment expliques-tu cela?

C : Je ne sais pas. Peut-être que si la boîte part d'une force et qu'on augmente cette force... On donne de plus en plus une force plus grande, alors la boîte va plus vite.

[...]

I : Que retiens-tu par rapport à la force? Commence par la vitesse. De quoi tu te rappelles? Quand tu as utilisé la vitesse, qu'est-ce que ça faisait au juste?

C : À chaque fois que je montais la vitesse, la boîte allait plus vite. Et aussi, la boîte allait plus loin, mais elle arrêtait. Si on plaçait la vitesse à 0,3, la boîte allait arrêter à une certaine place. À 10, elle arrêtait plus loin. Avec la force, la boîte n'arrêtait pas. C'est un peu comme la vitesse, mais la boîte bouge tout le temps. La force, c'est comme un peu la vitesse à laquelle le bloc ira.

I : Si je te dis que la force est comme un bonhomme invisible qui pousse sur le bloc, comment expliques-tu le fait que le bloc n'accélère pas, que le bloc ne prenne pas de vitesse. Quand tu places la force à 4,5, la boîte se déplace à une vitesse constante. Pourquoi est-ce que la boîte n'accélère pas?

C : Parce que c'est toujours la même force. Le bonhomme invisible pousse toujours de la même manière.

[...]

C : Je vais voir avant ce que fait la masse, si ça ralentit ou augmente.

[p. 10]

Vitesse : 50

Force : 0

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte se déplace et n'arrête pas.]

C : À 1, la boîte se déplace rapidement. Je vais essayer plus haut.

I : Est-ce que tu penses que la boîte ira plus vite ou moins vite?

C : Moins vite parce que la masse sera plus lourde, alors la boîte sera plus lourde à transporter. Si la vitesse est plus forte que la masse, la boîte se déplacera sûrement vite. Si la masse est plus haute que la vitesse, la boîte ne bougera pas.

[...]

I : J'aimerais que le bloc bleu se déplace à une vitesse constante, mais sans toucher à la force.

C : Donc, toujours la même force.

I : Oui, la force à 0; il n'y a pas de petit bonhomme invisible qui pousse.

Vitesse : [26?]

Force : 0

Masse : 3

<Démarrer>

[La boîte se déplace plus rapidement.]

C : [?]

[p. 11]

I : Ce n'est pas évident. Réinitialise. Je t'avais demandé que la boîte arrête. Tu peux toujours regarder l'indicateur de vitesse si elle diminue. J'aimerais que la boîte se déplace à une vitesse constante et je crois que ça diminue. Si tu regardes la vitesse en refaisant l'essai, tu vois que la vitesse diminue.

C : Je vais essayer à la même unité 3 et 3.

Vitesse : 3

Force : 0

Masse : 3

<Démarrer>

[La boîte se déplace et arrête rapidement.]

C : La boîte n'a pas bougé longtemps, parce que la masse est plus grande que la vitesse.

I : C'est la même pourtant?

C : La masse 3 est lourde et la vitesse 3 n'est pas beaucoup.

I : Que vas-tu faire pour que la boîte se déplace à une vitesse constante?

C : Je vais les égaliser.

I : Tu veux arriver à égaliser vitesse et masse.

C : Oui.

I : Et la boîte se déplacera à une vitesse constante.

C : Peut-être.

[C place le curseur de la vitesse dans le milieu à la même hauteur que le curseur de masse.]

[...]

[p. 13]

I : J'aimerais que la vitesse reste constante du début à la fin. Tu fais varier la vitesse à 3.

Vitesse : 3

Force : 10

Masse : 1

<Démarrer>

[La vitesse de la boîte augmente de 3 à 2,4.]

[p. 14]

C : À 3, la boîte bouge beaucoup, surtout au début et la vitesse augmentent de 1 dans les unités [?].
C'est peut-être la vitesse qui fait changer, parce qu'au début, lorsque c'était à 3, ça a augmenté de 3 et ça a diminué ensuite. Quand on était à 1, ça a monté de 1 et, ensuite, ça a continué. S'il n'y a pas de vitesse, ça va toujours être [?]. Si la vitesse est égale à la force, peut-être que ça va marcher.

[...]

I : Nous allons suivre ce qui arrive à la vitesse.

C : Au début, quand la boîte passe dans les lignes, à une vitesse 7, la boîte augmente de vitesse. Mais, rendu dans les lignes, la vitesse de la balle est constante.

I : Si on reprend l'image du bonhomme invisible qui pousse?

C : Au début, il pousse plus fort et, ensuite, c'est comme un roulement à billes, ça va mieux, ça glisse plus. Ça reste normal [?].

I : Tu dis qu'il ne pousse pas toujours à la même vitesse.

C : Plus au début parce qu'il doit se donner un élan.

I : Il se donne un élan et ensuite il pousse à une vitesse constante.

[p. 15]

C : Oui.

I : Veux-tu essayer autre chose?

C : Non, c'est correct.

I : J'aimerais, avant qu'on termine, que tu me dises ce que tu retiens ou as appris?

C : La vitesse, ça fait ralentir à un certain temps, parce que la vitesse va diminuer.

I : Pourquoi la vitesse va diminuer?

C : Peut-être parce qu'à un moment il n'y a plus de vitesse, parce que la vitesse, c'est au départ, rendu plus loin, il y a moins de vitesse, la vitesse diminue et, à la fin, il n'y en a plus. La force, c'est la vitesse à laquelle la boîte se déplacera, mais la boîte n'arrêtera jamais avec la force. La masse, c'est un peu comme le poids. S'il est très lourd, il ira plus vite... Je pense...

I : Tu dis que si la boîte est plus lourde, elle ira plus vite?

C : Parce qu'à 3, la boîte avançait et qu'à 1, elle n'avance pas.

Vitesse : 0
Force : 0
Masse : 1
<Démarrer>

I : Tu fais 0, 0 et 1 pour la masse.
C : Je pense que, si on prend juste la masse, la boîte ne bouge pas.

Vitesse : 0
Force : 0
Masse : 3
<Démarrer>

I : Tu essaies à 3.
C : Avec juste la masse, il ne bouge pas. La masse est juste... Plus lourd ou moins lourd. Si plus lourd, la boîte ira plus lentement, parce quelque chose de plus lourd, c'est plus long à pousser ou à aller plus vite.
I : Autre chose à ajouter?
C : Non.
I : Alors, c'est ce que tu retiens par rapport à l'utilisation de la vitesse, de la force et de la masse.
C : Oui.
I : D'accord, merci.

Entrevue 2

[...]

Situation 2

[...]

[p. 16]

I : Que va-t-il arriver à ces deux balles?
C : Les balles vont tomber sur le sol. Il y en a une qui sera moins lente que l'autre, parce que la masse est plus petite. Pour la rouge, la masse est 0,5. Pour la bleue, la masse est 1,0.
I : Tu as dit moins lent, mais de quelle balle parlais-tu?
C : La bleue arrivera plus tôt au sol que la rouge.
I : À cause de sa masse?
C : Oui.
I : Tu peux l'essayer.

Masse de la balle bleue : 1,0
Masse de la balle rouge : 0,5
<Démarrer>
[La balle bleue tombe plus vite.]

I : N'oublie pas de toujours décrire ce que tu vois, ce à quoi tu penses. Il est arrivé ce que tu pensais?
C : Oui.
I : J'aimerais que les deux balles touchent le sol en même temps.
C : Je vais placer la masse de la balle rouge à la même que la balle, à 1.

Masse de la balle bleue : 1,0
Masse de la balle rouge : 1,0

<Démarrer>

[La balle bleue tombe à la même vitesse.]

I : J'aimerais que les deux balles descendent. Lorsque la balle bleue sera rendu sur la ligne brune, j'aimerais qu'au même moment, la rouge soit rendue sur la ligne orange.

C : Je vais descendre la masse de la balle bleue pour qu'elle soit moins lourde, alors elle descendra plus lentement que la balle rouge. Je vais la mettre à... 0,40.

Masse de la balle bleue : 0,4

Masse de la balle rouge : 1,0

<Démarrer>

[La balle bleue ne tombe pas assez vite.]

[p. 17]

C : La bleue a descendu trop lent, alors je monte à 50.

I : 0,50.

Masse de la balle bleue : 0,5

Masse de la balle rouge : 1,0

<Démarrer>

[L'objectif est réussi.]

I : C'est réussi.

C : Oui.

I : J'aimerais que la vitesse de la balle bleue augmente en descendant, mais que la vitesse de la rouge soit constante, toujours à la même vitesse. Tu m'expliques toujours ce que tu fais.

C : Je ne vais toucher à rien, mais, lorsque la balle bleue descendra, je vais augmenter la masse.

I : Tu augmenteras la masse?

C : Ça ne marchera peut-être pas.

I : Dans quel but veux-tu monter la masse.

C : Tu m'as demandé que la vitesse de la balle bleue augmente ou diminue?

I : Plus vite.

C : Je vais baisser la masse.

I : En baissant la masse, la balle descendra de plus en plus vite.

Masse de la balle bleue : <C diminue progressivement la masse.>

Masse de la balle rouge : 1,0

<Démarrer>

[La masse de la balle ne change pas.]

[...]

[p. 18]

I : Comment ferait-on? Quels objets faudrait-il lancer? Ou comment faudrait-il lancer? Qu'est-ce qui faudrait pour que la balle bleue qui tombe du toit de l'école accélère, pour que sa vitesse augmente?

C : Il faudrait qu'on l'attire vers le sol pour qu'elle se déplace plus vite.

I : Comment ferait-on cela?

C : Je ne sais pas.

I : En l'attirant vers le sol, sa vitesse augmentera?

C : Un peu comme un aimant. Si, au début, la force n'est pas assez grande et, si, en descendant, la force est plus grande, ça ira plus vite, mais on ne peut pas vraiment.

I : [Rires.] Tu imagines un espèce de truc, une balle magnétisée, que l'on relâche. Il y a une force en bas et, à mesure qu'on se rapproche du sol, la force augmente et ça ira de plus en plus vite. Est-ce

qu'on l'essaie? Non, ce n'est pas possible. C'est intéressant. Mais si tu n'as pas d'aimants à ta disposition avec un système sophistiqué pour faire cela, y a-t-il un autre moyen?

C : Je ne sais pas.

I : Tu peux choisir n'importe quel objet que tu lances du toit de l'école et tu peux le lancer de la façon que tu veux aussi.

[Silence : 5 secondes]

I : Si je prends, par exemple, une boule de quille, c'est quand même assez lourd. Qu'est-ce qui arrivera si je lâche cette boule du toit de l'école.

C : Elle descendra assez vite.

I : Connais-tu la pétanque?

C : Oui.

I : Tu sais ce que sont les petites boules argentées. Si nous avons une boule de quille et une boule de pétanque et que nous les lâchons du toit de l'école, qu'arrivera-t-il?

C : Les deux iront vite, mais la boule de quille un peu plus vite. Peut-être pas... Puisque la boule de quille est plus grosse... Je ne sais pas.

I : Tu disais que la boule de quille est plus grosse... La grosseur peut jouer?

C : Peut-être.

I : Peut-être.

C : Peut-être, mais je ne sais pas pourquoi.

I : Alors le seul moyen que tu as trouvé, mais il faut avouer qu'il est plutôt ingénieux, c'est une boule aimantée avec un qui fait en sorte que l'objet accélère et tu n'avais pas trouvé d'autres moyens. Pour toi, qu'on lance n'importe quel objet du toit de l'école, il tombera toujours plus ou moins vite selon la masse.

C : À part s'il y a du vent.

I : S'il y a du vent, qu'est-ce que ça changera?

C : Si disons que c'est une plume, la plume pourrait aller plus vite, mais elle ne descendrait pas au sol, à part si le vent va vers le sol. Sinon, je ne sais pas trop à part cela.

I : Mais je retiens cela : système pour faire accélérer les objets... Cette situation est moins longue. Peux-tu me résumer ce que tu retiens de cette situation?

C : Si la masse est plus grosse, si par exemple la boule bleue a une masse plus grosse que la rouge, elle descendra plus vite que la rouge. Puisque la masse est plus petite, elle est plus légère

[p. 19]

et elle peut descendre plus lentement. Si la bleue est plus grosse, elle descendra plus vite, parce qu'elle est moins légère.

I : Qu'est-ce qui fait que, lorsque la masse est plus grande, la balle descend plus vite?

C : Je ne sais pas, je ne sais vraiment pas...

[...]

Situation 3

[...]

J'aimerais que tu me dises ce qu'est la vitesse.

C : C'est la vitesse à laquelle la flèche ira au début. Mais, quand elle n'aura plus de vitesse... C'est un peu à la vitesse à laquelle elle est propulsée. Lorsqu'il n'y aura plus de vitesse, elle tombera et arrêtera.

[...]

[p. 20]

I : OK, je comprends ce que tu voulais dire. La masse, c'est quoi dans ce cas? C'est la masse de la flèche, mais qu'est-ce qu'elle fait?

C : Il y a toujours la vitesse à laquelle la force est propulsée, mais si la masse est plus grande, elle ira plus loin, parce que... Elle ira plus loin et plus vite, mais je ne sais pas pourquoi.

[...]

I : Réinitialise. En faisant varier juste la masse, pourrais-tu faire tomber la flèche entre le mur gris et le mur bleu.

C : Je vais augmenter la masse, mais juste un peu à 1,70.

Vitesse : 20

Masse : 1,70

<Démarrer>

[La flèche tombe avant l'objectif.]

[p. 21]

C : Ce n'est pas assez... C'est trop même peut-être.

I : Trop?

C : Oui, je vais essayer moins, parce que si la masse est plus grande... Oui, c'est cela. Si la masse est plus grande, ce sera plus lourd, alors la vitesse sera moins grande. Si la masse est plus petite, la vitesse pourra être plus grande et elle pourra aller plus loin. Je vais baisser la masse à 1.

[...]

[p. 23]

I : Qu'arrive-t-il lorsque tu diminues la masse?

C : Je ne comprends pas.

I : Depuis tantôt, tu es partie de 3 et tu as diminué la masse.

C : Quand la masse était à 3, la flèche allait trop loin. Quand j'étais à 2,5, la flèche allait moins loin. Alors, si je descends, la flèche ira de plus en moins loin et elle tombera entre la ligne grise et la ligne bleue.

I : Mais tantôt, tu ne disais pas que plus la masse est grande moins la flèche ira vite.

C : Oui, mais je pense que je me suis trompée. Plus la masse est grande, plus la flèche se rend loin. Plus la flèche est petite, moins la flèche se rend loin. À 1.

[...]

[p. 25]

I : S'il n'y avait pas de gravité, si on n'était pas sur Terre, qu'arriverait-il à la flèche?

C : Elle continuerait.

I : Elle continuerait comment? Veux-tu me décrire?

C : Elle continuerait tout le temps et elle flotterait aussi... Elle flotterait.

I : Elle flotterait.

C : Elle ne tomberait pas.

I : Elle ne tomberait pas, parfait. Quel sera le mouvement de cette flèche à partir du moment où elle serait décochée avec une vitesse de 50, peu importe? J'ai compris que tu as dit qu'elle flotterait, mais...

[p. 26]

C : Elle irait de moins en moins vite, parce que, même s'il n'y a pas de gravité, puisque la vitesse diminuera, elle va aller de moins en moins vite, mais elle continuera à flotter. Même lorsqu'elle sera arrêtée, elle continuera à flotter.

I : Je vais modifier la situation et je vais enlever la gravité pour voir ce qui se passe. Juste changer cela. La gravité, as-tu vu? La situation est à une gravité verticale comme la Terre. Je vais enlever la gravité comme cela il n'y aura plus de gravité. Je vais replacer pour qu'on puisse faire des essais. Que va-t-il arriver s'il n'y a pas de gravité?

C : Elle va continuer tout droit et elle ne va jamais s'arrêter. Elle va s'arrêter, mais ne pas descendre.

[...]

[p. 27]

C : Je ne sais pas si elle peut ne pas s'arrêter. Avec la vitesse et la masse, elle continuera toujours.

I : Si on pouvait modifier la situation comme on veut ou si nous sommes dans la réalité et qu'on peut faire ce qu'on veut, que peut-on faire pour qu'elle ne s'arrête pas, à part ton système d'aimant.

[Silence : 8 secondes]

I : Tu peux lancer la flèche comme tu veux. Tu peux la lancer au lieu que tu veux, dans les conditions que tu veux...

C : Peut-être avec du vent. Si le vent souffle tout le temps, très rare...

I : Qu'est-ce qui arrivera si le vent souffle tout le temps?

C : Puisque le vent fait une pression sur la flèche, la flèche va continuer de bouger, mais elle va sûrement ralentir [?] tomber [?]

I : Donc, tu vois comme moyen le vent qui soufflerait sur la flèche [?]. Qu'est-ce qui fait ralentir la flèche?

C : La vitesse, parce qu'au début... La vitesse, c'est un peu comme la force de propulsion qu'on la lance. Au début, elle est comme à 10 et à chaque fois qu'elle avance elle ralentit.

I : Qu'est-ce qui la fait ralentir? Pourquoi la vitesse ne reste pas à 10?

C : À cause de la masse, parce que, si la masse est grande, puisque c'est plus lourd, elle descendra plus rapidement. C'est comme avec les boules, la rouge était plus petite, alors elle descendait plus lentement que la bleue, plus grosse. Si la masse est très grosse, puisque la flèche est lourde, il faudra que la vitesse soit grande aussi pour faire bouger la flèche.

I : Veux-tu commencer la situation 4?

C : Oui.

Situation 4a

[p. 28]

I : La situation 4 est divisée est trois parties a, b et c. Je vais te montrer la partie a pour commencer. Encore une fois, décris-moi ce que tu vois.

C : Je vois encore des lignes de couleurs. Il y a comme un arc, si on peut dire. Il y a une balle. Il n'y a pas de masse et de vitesse. Il y a la position verticale et la position horizontale.

I : En brun, c'est toujours le sol. Ce que tu vois, c'est une rampe, comme tu le disais, comme un cercle ou c'est comme si le sol était courbe comme une rampe de planche à roulettes. La bille pourra rouler dessus. Si on débute la situation, qu'arrivera-t-il?

C : Sûrement, puisque la balle devra remonter, si elle ne part pas assez vite, elle ne pourra pas remonter, elle restera au milieu, ici.

I : Si on ne donne pas d'élan, on place juste la balle là et qu'on la laisse tomber, on la laisse descendre.

C : Soit qu'elle commencera vite, puis qu'elle va ralentir tranquillement pour s'arrêter au milieu, sinon, elle ira toujours à la même vitesse, mais, rendue au milieu, comme elle n'aura pas assez de vitesse pour remonter, elle restera au milieu.

[...]

C : La balle va tout le temps faire cela, sinon elle ralentira dans l'autre sens, parce que, lorsqu'elle va monter, elle ira presque aussi vite quand elle va descendre que lorsqu'elle est partie au début, parce que... c'est ça.

[...]

[p. 30]

I : Si nous avons une rampe comme celle-là avec une bille, une balle, une boule de quille, peu importe, et qu'on relâche, que va-t-il arriver? Tu comprends ce que je veux dire : si nous avons un grand truc [une rampe] et que l'on prend une grande bille ou une grosse balle, peu importe, que l'on relâche d'une certaine hauteur, disons la ligne orange, que se passera-t-il?

C : Peut-être que la balle va remonter... La balle va prendre moins de temps pour revenir se placer ici [en bas de la rampe]. Si on baisse la position verticale, la balle prendra moins de temps que si elle est placée en haut.

Position : la balle est lâchée sur la ligne orange, à la surface de la rampe.

<Démarrer>

[La balle remonte jusqu'à la ligne orange et l'essai n'est pas arrêté immédiatement.]

C : Elle va sûrement s'arrêter à un moment donné, à part si elle ne s'arrête pas

I : Tu as dit qu'elle allait sûrement s'arrêter.

C : À part si dans le logiciel elle n'est pas supposée arrêter.

I : Mais dans la réalité?

[p. 31]

C : Dans la réalité, elle s'arrêterait.

I : Elle s'arrêterait. Est-ce qu'elle semble s'arrêter? Si tu suis la vitesse, qu'arrive-t-il à la vitesse.

C : Ça va l...

I : La vitesse varie toujours, je le sais. Mais, c'est 0 et ça monte jusqu'à 6, puis 0 et ça remonte jusqu'à 6. On ne dirait pas que ça ralentit.

C : Ça ralentit parce que la boule touchait à la ligne et plus maintenant.

I : Si on attend longtemps, est-ce que la balle va arrêter?

C : Peut-être. Sûrement.

I : Tu disais que dans la réalité... Qu'est-ce qui arrivait?

C : Dans la réalité, la balle prend moins de temps avant qu'elle reste en bas au milieu, à moins que l'on parle d'une balle assez grosse et qu'on la lance pour qu'elle se déplace vite peut-être qu'elle prendra autant de temps qu'elle [dans la situation], mais ça me surprendrait.

I : Ça peut être loin, mais elle finira par s'arrêter. Je vais te poser la même question que tantôt : est-ce qu'il y aurait un moyen pour qu'elle n'arrête pas, pour qu'elle continue tout le temps? On dirait qu'elle ralentit [l'essai précédent n'a pas été arrêté].

C : Il ne faudrait pas mettre de creux ou un creux moins petit. Si c'était moins en pente, il ne tomberait pas dans le trou. Si c'est plus rond, la balle va toujours continuer, mais lorsqu'elle va s'arrêter, elle va toujours continuer un peu.

I : Si c'était plus élargi, la balle continuerait tout le temps.

C : Ça continuerait tout le temps, mais la balle arrêterait après longtemps.

I : Ça prendrait du temps mais ça finirait par arrêter. Qu'est-ce qui fait que la balle ralentit jusqu'à arrêter?

C : À un moment donné, il n'y a plus assez de vitesse et de force, alors ça descend.

I : Parfait, nous allons arrêter.

Entrevue 3

I : Pourrais-tu me dire ce que tu te rappelles de la situation 4a?

C : Il fallait faire bouger le rond vers une certaine ligne. Si on faisait bouger la position horizontale, la balle bougeait de gauche à droite. Si c'était plus à droite, ça ne faisait que tomber, parce que ça allait dans le creux.

I : Si c'était dans le milieu, tu veux dire?

C : Oui, si c'était dans le milieu, ça ne faisait que tomber et ça ne roulait pas. Et la position verticale, si c'était plus bas, alors ça ne roulait pas, ça allait au milieu. Et, plus c'était haut et plus la balle allait loin.

I : À quel point la balle allait haut? Si on partait la situation présentement la ligne bleue touche à la ligne verte à peu près. Quel serait le comportement de la balle si tu pointes avec la souris. Qu'est-ce qui arrive si on démarre la situation?

C : Elle va tomber et elle va faire ça [C montre qu'elle monte à droite puis descend puis remonte] jusqu'à ce qu'elle arrête, mais longtemps après.

I : Ça prenait beaucoup de temps?

C : Oui.

I : Si on sort de cette situation et que nous sommes dans la réalité et que nous avons une rampe et qu'on fait rouler une boule, qu'est-ce qui arrivera? Est-ce qu'il va se produire la même chose?

[p. 32]

Est-ce que la balle montera aussi haut? Est-ce que la balle finira par arrêter? Est-ce qu'elle va toujours continuer?

C : Si c'est aussi à pic, elle montera sûrement haut, mais, si le creux est plus creux, la balle s'arrêtera parce qu'elle n'aura pas assez de force pour remonter.

I : Si le creux n'est pas vraiment creux, qu'il est moins prononcé?

C : La balle va remonter plus vite que si le creux est plus petit.

I : Est-ce que la balle va s'arrêter ou est-ce qu'elle va toujours continuer à osciller?

C : C'est sûr qu'elle va s'arrêter. Si le creux est plus petit, la balle s'arrêtera plus tôt, parce que, puisque la balle va moins vite, elle aura moins de force pour remonter, alors elle restera au milieu.

I : À cause du creux.

C : Oui. Si c'est plus large, ça sera plus droit, elle va remonter et la balle prendra plus de temps avant d'arrêter

I : Si le creux n'est pas prononcé, il est assez large, est-ce que la balle continuera tout le temps d'osciller?

C : Peut-être, parce que si le creux est long et large, la balle prendra de la vite pour aller de l'autre côté, mais elle s'arrêtera, parce qu'elle ne montera plus et qu'elle ne descendra plus.

I : Que veux-tu dire? Je ne comprends.

C : Quand la balle descend, elle a de la vitesse. Mais, si c'est très large, elle aura le temps de s'arrêter puisque c'est plat... si le creux est plat... Parce que... Elle n'aura pas encore redescendu, elle va s'arrêter.

[....]

Situation 4b

I : Situation 4b. Tu as vu que les situations 4 sont décortiquées en a, b et c. Tu verras qu'elles se ressemblent un peu. Peux-tu me décrire ce que tu vois.

C : Je vois encore un arc. Il y a une branche de l'arc qui est plus longue et moins à pic et l'autre plus courte et plus à pic. Il y a encore position horizontale et verticale et les lignes de couleurs.

[p. 33]

I : C'est exactement la même chose, tu l'as bien décrit à l'exception que la première partie est plus à pic que la deuxième qui est plus longue et moins prononcée. Si on débute la situation, pourrais-tu me pointer avec la souris et me décrire en mots ce qui va arriver à la balle

C : La balle va descendre et peut-être remonter, mais ne pas remonter pas très haut... peut-être pas remonter très haut... parce que c'est plus...

I : C'est ce que tu disais quand tu parlais de creux. Il y a une petite différence parce que ce n'est pas symétrique, mais le creux est moins prononcé.

C : Comparer à l'autre, les deux côtés étaient à pic et le creux était plus petit. Cette situation, au lieu de remonter jusqu'à la ligne verte, elle va sûrement arrêter plus tôt, puisque c'est plus droit.

I : Je comprends ce que tu veux dire. Si je te demande : j'aimerais que la boule remonte jusqu'à la ligne orange du côté droit.

Position : la balle est lâchée sur de la ligne verte, à la surface de la rampe.

<Démarrer>

[La balle remonte jusqu'à la ligne verte.]

C : OK.

I : Tu as dit OK.

C : Puisque c'est haut et que ça c'est plat [C pointe le côté droit de la rampe], la balle va monter presque à la même place, parce que, finalement, ça sera moins dur à remonter, alors elle ira plus haut.

I : T'attendais-tu à cela?

C : Non.

[...]

[p. 35]

I : Est-ce possible de faire osciller la balle tout le temps ou le plus longtemps possible? Comment ferais-tu cela?

C : Je la ferais partir pour que la balle soit au plus haut, comme en ce moment. Comme elle est haute, elle redescendrait haute et remonterait haute et redescendrait haute et remonterait haute. Alors, au lieu de monter une petite côte et de redescendre sans force ni vitesse, la balle va continuer d'aller vite le plus longtemps possible.

I : Pendant combien de temps?

C : Je ne sais pas. Peut-être...

I : À peu près, tu ne peux pas le savoir exactement, mais...

C : 2 minutes 52.

I : 2 minutes 52, c'est précis! Tu penses que la balle ne continuera pas tout le temps, toi?

C : Non, mais la balle va ralentir et elle va s'arrêter, mais après longtemps, parce que la dernière fois la balle avait pris du temps avant de s'arrêter.

I : Tu te souviens... Je vais te demander... Tu parlais du plus haut possible, alors ça sera la même situation. C'était 1,3, tu as dit?

C : 1,5.

I : 1,5, parfait. Si je te demande quelque chose comme cela, mais l'inverse : au lieu de faire osciller la balle le plus longtemps possible – tu disais qu'il faut partir du plus haut et tu disais que la balle allait monter assez haut, alors la balle aura le temps de prendre de la vitesse, ce qui la fera osciller longtemps – si je te demande cette fois de faire osciller la balle, mais le moins longtemps possible. Elle doit s'arrêter le plus vite possible.

C : Je vais la placer le plus loin [C veut dire le plus en bas de la rampe], mais pas au milieu. Pas au milieu, parce qu'elle va juste tomber et ne pas bouger. Je vais la mettre à 1,9 et quand même basse.

I : Tu penses que dans cette position la balle arrêtera tout de suite? Après combien de temps la balle arrêtera-t-elle?

C : Vraiment pas beaucoup. 1 seconde.

I : C'est rapide! La balle descendra juste la partie de gauche et elle s'arrêtera tout de suite.

C : Oui.

Position : la balle est lâchée au dessus de la ligne rose, au dessus de la surface de la rampe, au centre de la rampe..

<Démarrer>

[La balle tombe et ne bouge plus.]

[p. 36]

[...]

I : Que penses-tu de cela?

C : Non, ça ne prend pas 1 seconde. Ça prend plus de temps, même si elle n'est pas haute. C'est comme... je ne sais pas trop quoi. C'est juste si on la laisserait tomber qu'elle s'arrêterait tout de suite. Si on la fait monter juste un peu, c'est sûr qu'elle ne va pas descendre et arrêter tout de suite. Elle va remonter encore un petit peu et peut-être qu'elle va s'arrêter, mais, là, elle monte et redescend encore.

I : Que penses-tu du comportement de cette balle qui ne s'arrête pas tout de suite et qui continue longtemps?

C : Je ne sais pas trop. Je pense que la balle est quand même légère. Ce n'est pas comme une balle vide, mais elle est légère comme une balle de golf. Si elle était plus légère, quand on la ferait tomber, elle tomberait puis elle revolerait, parce qu'au lieu d'aller dans le creux, elle revolerait. Et si elle était ici [C pointe l'extrémité droite de la rampe], elle retomberait parce qu'elle est légère. Mais, si elle était plus lourde, elle resterait sûrement au milieu, parce qu'elle est lourde. Ici, elle a une grande force pour descendre, mais si on ne la plaçait pas trop haut, elle s'arrêterait au milieu, parce qu'elle n'aurait pas beaucoup de force et que, pour remonter, ça lui prendrait une grande force.

I : Parce qu'elle est plus lourde. Tu dis que la balle se comporte comme cela dans cette situation parce qu'elle est légère.

C : Oui.

I : Si tu pouvais choisir la masse, tu prendrais la plus petite masse pour que la balle continue indéfiniment?

[p. 37]

C : Peut-être pas. Il faudrait que la balle soit entre lourde... mais pas lourde. Si elle est trop lourde, il faut qu'elle ait une grande force. Si elle est trop légère, elle ne va pas continuer tout le temps, parce que, au lieu de rouler comme cela, elle va sauter et faire des acrobaties aériennes.

I : Rebondir, tu veux dire?

C : Comme les balles de ping-pong. C'est léger et ça rebondit.

I : Et ça fait des acrobaties.

C : Oui.

I : Y a-t-il quelque chose que tu veux tester par rapport à cela?

C : Non.

I : Si je te repose un peu la même question que tantôt... Tantôt, je t'avais demandé que la balle arrête le plus rapidement. Si je te demande maintenant qu'elle s'arrête, que vas-tu faire?

C : Quelle s'arrête si on la fait partir d'en haut?

I : D'où tu veux. L'important, c'est qu'elle arrête.

C : Est-ce qu'elle doit bouger au début?

I : Oui, tu l'avais fait tantôt. Tu la faisais tomber directement et elle s'arrêtait au centre. Et, quand tu as essayé de la faire arrêter... Est-ce que la balle était en train de s'arrêter tantôt?

C : Peut-être, mais ça ne paraissait pas. Elle n'avait pas l'air de ralentir

I : Toi, qu'en penses-tu? Est-ce cela vaut la peine d'attendre? Est-ce la balle va arrêter ou pas?

C : La balle va arrêter mais après assez longtemps.

I : Mais tu penses que la balle va arrêter?

C : Oui.

[...]

Situation 4c

I : Encore une fois, je vais me répéter : peux-tu décrire ce que tu vois?

[p. 38]

C : Je vois juste une branche d'arc. Puis, il y a encore une balle. Mais, on ne voit pas l'autre. Il y a peut-être un creux, mais on ne le voit pas. On voit juste une partie plane. C'est peut-être cela le creux, mais on ne voit pas l'autre partie.

I : OK, tu veux dire que la deuxième partie de la rampe est tellement loin que... C'est effectivement comme une côte, un demi-arc, mais je peux te dire qu'il n'y a pas de creux. Je peux te dire que le sol continue tout le temps, même si on ne le voit pas. La balle est positionnée. C'est la même chose, il y a les lignes de couleurs qui sont des points de repère. Si on débute la situation, qu'arrivera-t-il?

C : La balle va descendre.

I : Peux-tu pointer avec la souris?

C : Elle va descendre et continuer.

I : Qu'est-ce qui arrivera à la vitesse? Peux-tu me décrire la vitesse de la balle au cours de son parcours?

C : Au début, elle ira vite. Dans la côte, elle ira plus vite et elle ralentira tranquillement lorsqu'elle sera sur la [?], mais elle ira quand même loin, parce qu'elle a pris de la vitesse.

I : OK, la balle prendra de la vitesse en descendant. Elle continue, puis arrête. Comment as-tu dit cela? Que ce sera long ou qu'elle ira loin?

C : Ça sera long avant que la balle arrête. Puisque la côté est à pic, elle aura une grande vitesse. Avant que la balle perde sa vitesse, ce sera long. Veux-tu l'essayer?

[...]

[p. 39]

I : Quand nous sommes à l'endroit horizontal, c'est un peu comme la situation 1, n'est-ce pas?

C : Oui.

I : Comment se fait-il que la balle ne ralentisse pas?

C : Parce qu'on ne peut pas faire varier la masse et la vitesse.

I : La vitesse, nous pouvons la faire varier d'une certaine manière, c'est-à-dire en faisant varier la hauteur.

[p. 40]

C : On ne peut pas vraiment jouer avec la masse. Si elle est sur la plane, on ne peut pas la faire bouger avec une masse et une vitesse, parce que, si elle est sur la face plane, elle ne peut pas bouger, puisqu'il n'y a pas de pente pour qu'elle bouge. Mais, si elle est dans la pente, puisque la balle sera haute, plus elle ira vite. Plus elle est basse, moins elle ira vite.

I : Mais, si on oublie cette partie de la pente... La pente sert juste à faire prendre de la vitesse à la balle comme tu l'as bien expliqué : plus la balle est haute plus elle prend de la vitesse. À partir d'ici, quand c'était le bloc de la situation 1 et qu'on lui donnait une certaine force, il partait, ralentissait et arrêtait. La boule, si je me souviens bien, continue. Elle continue plus longtemps en tout cas.

C : Peut-être parce qu'elle roule. Puisqu'elle roule, elle n'a pas besoin de force ou de masse. Parce que, si on fait rouler une bille sur une face plane, elle va s'arrêter... elle va peut-être s'arrêter, mais après un long bout de temps, sauf si elle frotte quelque chose. Puisqu'elle est ronde, elle va toujours rouler. C'est pour cela qu'elle s'arrête après très longtemps ou qu'elle ne s'arrête pas.

I : Si on suppose que c'est elle qu'on lance, est-ce qu'elle s'arrêtera ou pas? C'est ce que tu as fait, à la fin, c'est la question que tu te posais.

C : Elle arrêtera, mais après très, très, très longtemps. Très, très...

I : Qu'est-ce qui fera arrêter la balle?

C : La poussée que nous avons donnée à la balle au début, il n'y en aura plus et la balle va ralentir.

I : Que ce soit une boîte ou un cercle, sphère comme une balle, la force qu'on donne au début s'en va quand même et l'objet finit par arrêter.

C : Oui.

I : Quelle est la différence entre les deux dans ce cas?

C : Puisque la balle est ronde, elle a besoin d'une plus petite poussée pour aller plus vite parce qu'elle roule sur elle-même. Mais le bloc est toujours sur une même face et il ne peut pas rouler sur lui-même, alors il a besoin d'une grande poussée pour aller plus loin.

I : Tu es en train de me dire que la force influencera comment l'objet se comportera. D'où provient cette différence? En quoi la forme vient jouer? Ce ne sera pas facile à expliquer. Je pense que je

comprends assez bien ce que tu veux dire. Tu dis que l'objet va partir et, dans les deux cas, la force va diminuer et l'objet va finir par ralentir. Tu remarques une différence entre la boîte et la sphère, alors tu te dis qu'il y a une différence de forme entre la sphère et la boîte, mais comment expliques-tu le fait que la boîte arrête plus rapidement à cause de cette forme?

C : Sûrement, parce que... C'est comme les voitures, ça roule sur eux-mêmes... Les roues tournent sur elles-mêmes. C'est cela qui la fait avancer. Il y a toujours le moteur qui fait tourner les roues. Le moteur, c'est comme un peu la poussée qu'on donne au début. On ne peut pas faire rouler un bloc, parce qu'il a des faces planes. Euh... c'est ça.

I : Le fait de ne pas faire rouler, c'est cela qui fait une différence?

C : Oui.

[...]

[p. 41]

I : On ne voyait pas la balle arrêter, mais si on pouvait continuer l'écran, est-ce que la balle arrêterait ou elle n'arrêterait pas?

C : Elle arrêterait, mais après longtemps. Il faudrait que l'écran soit très, très grand.

[...]

Entrevue 4

Situation 5

[...]

[p. 42]

I : En faisant varier tout ce que tu veux, j'aimerais que la balle tombe entre la ligne noire et la ligne orange [à gauche par rapport au mât]. Je te rappelle que la balle ne peut pas entrer en contact avec le mât du bateau. La balle pourra donc tomber entre les deux sans

[p. 43]

accrocher le mât, mais je la veux entre la ligne noire et la ligne orange. Tu m'expliques ce que tu fais.

C : Je vais baisser le coup sur la balle et je vais augmenter la vitesse du bateau. Je vais essayer à 10. Si le bateau se déplace plus vite, la balle entrera en contact avec le vent et la balle ira dans un autre sens, par en arrière, puisque le bateau se déplace par en avant.

I : Je veux que tu m'expliques cela comme il faut; c'est intéressant.

C : Si le coup sur la balle n'est pas trop grand, elle tombera sûrement vers la droite ou en dessous du mât. Si la vitesse du bateau est grande, le bateau ira plus vite et il y aura du vent, alors la balle va entrer en contact avec le vent. Ça fera aller la balle dans l'autre sens. Au lieu d'aller vers la droite, elle ira vers la gauche. Elle tombera peut-être entre les lignes noire et orange.

I : Pourrais-tu m'expliquer plus en détail l'action du vent sur la balle.

C : Le vent frappera la balle. Elle est supposée tomber vers la droite, mais, comme il y a du vent, elle tombera vers la gauche parce que le vent ira vers la gauche. Si le vent la frappe, elle ira dans l'autre sens et elle tombera peut-être entre la ligne noire et la ligne orange.

I : S'il n'y a pas de vent? Qu'arriverait-il à la balle?

C : Elle tomberait plus à droite.

I : Plus à droite... Si le coup sur la balle est 0 et si la vitesse du bateau est à 10 ou à ce que tu voudras mais le bateau bouge, que va-t-il arriver au mouvement de la balle? Est-ce que la balle ira par en avant quand même?

C : Peut-être mais je crois qu'il y a plus de chance qu'elle se déplace plus vers la gauche.

I : Peux-tu me pointer pour m'expliquer ce que tu veux dire par « plus vers la gauche »?

C : Elle est supposée tomber plus vers la droite, sauf si le coup sur la balle est 0, alors elle tombera dans le milieu [en dessous du mât]. Si la vitesse du bateau est élevée... Quand on va vite, il y a du vent, elle descendra peut être en ligne droite mais plus vers la gauche.

I : Je vais te demander de l'imaginer. Tu as dit « s'il y a du vent ». S'il n'y a pas de vent... Ça ne se peut pas, c'est ça l'affaire! Mais, si nous avons enlevé tout l'air et le vent, le bateau se déplace à une certaine vitesse et, au cours de sa croisière, la balle est lâchée. Il n'y a pas de vent pour pousser comme tu l'expliquais tantôt.

C : Si la balle ne se déplace vraiment pas vite et que le bateau bouge, quand la balle tombera, au lieu de tomber ici [en dessous du mât], elle tombera plus ici [à gauche par rapport au mât]. Parce que [?].

[...]

[p. 47]

I : Je pense que nous allons laisser faire cela. Que penses-tu de cela, c'est-à-dire de ne pas avoir été capable de placer la boule entre la ligne noire et la ligne orange?

C : Je ne sais pas. Je ne sais pas trop. Je pense... Peut-être que si la balle tombait plus lentement, elle pourrait tomber entre la ligne noire et la ligne orange, mais elle tombe toujours entre la ligne grise et la ligne orange. C'est peut-être parce qu'elle allait toujours à la même vitesse, sauf si le coup sur la balle était plus grand.

I : Tu as parlé d'une balle lourde. Si c'était possible de modifier la masse de la balle, serait-il possible de le faire, entre la ligne noire et la ligne orange?

C : Peut-être si on plaçait la balle très légère?

I : Qu'est-ce que ça changerait que la balle soit plus légère.

C : Elle irait moins vite au sol.

I : Elle descendrait moins vite.

C : Le bateau aurait plus le temps de bouger et la balle, lorsqu'elle descendrait, elle irait entre la ligne noire et orange. Soit que la balle est trop lourde ou qu'elle prend trop de temps pour descendre.

I : Que fait la vitesse du bateau? Quelle influence elle a sur la chute de la balle?

C : Je ne sais pas. Je ne crois pas qu'il y en ait vraiment, à part si le coup sur la balle est très grand. La vitesse du bateau aussi la balle ira loin. Mais, si le coup sur la balle est à 0, la balle tombera en ligne droite, même si la vitesse du bateau est très [élevée?]. Parce que ça tombe en ligne droite.

I : Est-ce possible de faire tomber la boule bleue entre la ligne grise pâle et la ligne bleue en faisant varier juste la vitesse du bateau? Nous avons essayé par en arrière tantôt et ça ne fonctionnait pas, mais, par en avant, est-ce que ça fonctionne?

C : Peut-être, peut-être, seulement peut-être, peut-être, je ne suis pas trop sûr. Je pense que non, mais peut-être que oui, mais peut-être que non. Parce que, si le coup sur la balle est à 0, elle tombe entre la ligne orange et la ligne grise, parce qu'elle tombe souvent là aussi.

I : Selon toi, elle tombe... Je veux être certain d'avoir compris. La raison pour laquelle elle tombe entre la ligne orange et la ligne grise plutôt qu'en arrière lorsqu'il y a une bonne vitesse du bateau, c'est parce qu'elle est trop lourde et qu'elle n'a pas le temps de dévier vers la gauche, c'est ça?

C : Un peu.

I : Si on prenait une balle plus légère, elle pourrait dévier vers la gauche?

C : Oui.

I : Je voulais être sûr que j'avais bien compris. Je vais te demander beaucoup d'imagination, encore une fois. Je crois que tu es capable de faire cela. Je t'avais peut-être demandé pour la flèche : s'il n'y a pas de gravité... Que va-t-il arriver à cette flèche s'il n'y a pas de gravité, que va-t-il arriver à cette balle si on la laisse tomber mais il n'y a pas de gravité?

C : Elle va flotter.

[p. 48]

I : Parfait, je crois cela. Si le coup sur la balle est à 0, mais si le bateau se déplace à une certaine vitesse, disons 5 mais peu importe, qu'arrivera-t-il à la balle qu'on lâche du haut du mât du bateau?

C : Il n'y a pas de gravité?

I : Il n'y a pas de gravité. Nous allons essayer d'imaginer cela.

C : Elle va flotter dans les airs et ne tombera pas.
 I : Où elle ne sera pas rapport au bateau?
 C : Je ne comprends pas.
 I : C'est difficile à formuler; je vais essayer d'être clair. Le bateau se déplace. On relâche la balle. Qu'arrive-t-il à cette boîte? Est-ce plus clair?
 C : Oui.
 I : Parfait.
 C : La balle va peut-être tomber un peu ou ne pas du tout tomber; elle restera là ou elle va flotter dans les airs.
 I : Quand tu dis qu'elle restera là, elle restera où au juste?
 C : Sur le mât.
 I : Sur le mât du bateau.
 C : À part si elle tombe un petit peu et que, rendu à la moitié du chemin, elle peut rester là et flotter. Ou, lorsqu'on la lâche, elle peut monter dans les airs... Mai je pense que si...
 I : Je veux juste être certain que j'ai compris ce que tu as dit. Le bateau se déplace. On relâche la balle. Tu dis que si on lâche la balle dans le vide, elle suivra le bateau en continuant, est-ce cela?
 C : Oui.
 I : Elle ne restera pas là pendant que le bateau avancera. C'est ce que tu as dit?
 C : Oui. Ou peut-être qu'elle va rester là pendant que le bateau va avancer. Si elle reste dans les airs, quand le bateau va avancer, alors elle va rester là.
 I : Si elle flotte dans les airs et qu'on lâche la balle, le bateau continue et la balle reste là. C'est ce que tu as dit?
 C : Oui.
 I : Tu hésites entre les deux ou tu es certaine de l'un ou de l'autre.
 C : J'hésite, mais je pense plus qu'elle restera là. C'est plus possible.
 I : Je ne sais pas si tu seras capable de répondre, mais je te pose la question quand même : qu'est-ce qui te dit que peut-être elle allait continuer avec le bateau?
 C : Puisqu'elle est accotée sur le mât du bateau, si elle flotte... Là elle ne flotte pas dans les airs : elle est accotée dessus, alors moi je pensais qu'elle allait rester là.
 I : Comme je te disais, le petit bonhomme. C'est comme s'il y a un bonhomme sur le mât du bateau et la personne tient la balle dans le vide. Nous ce qu'on voit c'est de ce côté. La balle n'est pas en dessous du mât, la balle est dans le vide.
 C : Dans ce cas, ce que j'ai dit n'a pas rapport.
 I : Tu pensais que peut-être elle allait continuer puisqu'elle était accotée sur le mât du bateau.
 C : Oui.
 I : J'ai perdu. J'ai plein de questions à te poser, mais j'en ai perdu. Ça, je te l'ai demandé... Ah oui, je sais. Dans la réalité, lorsqu'on est en mouvement dans un bateau, un train, n'importe quoi, et qu'on lâche un objet – un peu comme dans cette situation – qu'arrive-t-il aux objets?
 C : Il tombe par terre.
 I : Il tombe par terre de quelle façon? Ou quand on les lance dans les airs ou quand on fait n'importe quoi? Je ne sais pas. Si je suis dans un bateau ou un train qui se déplace et que je

[p. 49]

lance une balle dans les airs. Cette balle va tomber. Quel sera le chemin de cette balle? Pour que ce soit plus clair... Le bateau est en mouvement; nous sommes sur le bateau. Je suis sur le sol du bateau et je lâche la balle dans les airs. Que va-t-il arriver?

C : Elle va retomber. Si on est sur ce bateau, elle va retomber soit sur la tête ou soit entre les lignes, puisque le bateau va avoir bougé, sauf si le bateau va très lentement.

I : Pour que ça devienne plus clair, supposons que la balle est lancée dans les airs à la verticale où il y a la ligne bleue foncée et le bateau se déplace à une bonne vitesse. Que va-t-il arriver à la balle? Comment elle va tomber? Tu peux même si tu veux... Place la vitesse du bateau à 2. Démarre la situation pour qu'on puisse voir; nous allons laisser faire la balle. Réinitialise. Place la vitesse à 1 pour que tu aies le temps de faire un certain mouvement. Quand tu partiras la situation, avec la souris, pointe le chemin que fera la balle qu'on lance dans les airs. Je ne sais pas si c'est possible. Je n'ai jamais essayé; nous verrons ce que ça donne.

C : La balle est comme cela et la balle va tomber ici [C montre que la balle tombe à gauche du point de lancement de la balle].

I : Je voulais être certain que je comprenais. Toi, tu penses que la balle ne continuera pas avec le bateau.

C : C'est ça.

I : Je ne sais pas si je te l'avais dit : on peut enlever la gravité. Nous allons l'essayer [I enlève la gravité]. Nous avons enlevé la gravité. Qu'arrivera-t-il à la balle dans cette situation où la vitesse est à 1 et le coup est à 0? Toi, tu disais..

C : Lorsqu'on lâchera la balle, soit qu'elle continuera toujours, comme avec la flèche, soit elle restera là. Comme il n'y a pas de coup sur la balle, elle ne va pas à droite. Elle tombe tout droit. Soit elle restera là, mais elle va flotter. Soit, lorsqu'elle va descendre, elle...

I : Elle ne descendra pas puisqu'il n'y a pas de gravité.

C : Oui, c'est ça. Au lieu de descendre, elle va comme rester là, mais, comme en descendant, mais restant là. La balle va descendre un petit peu, juste vraiment un petit peu, puis elle va rester là.

I : Rester là? Tu veux dire : près du mât du bateau? Elle va rester à l'endroit où elle est, puis le bateau va continuer. Parce que c'est comme les deux options que tu avais et dont tu parles souvent.

C : Elle descendra un peu, un tout petit peu, puis elle restera là et le bateau va avancer.

I : Le bateau va avancer et la balle va rester sur place. Tu peux l'essayer.

Vitesse du bateau : 1

Coup sur la balle : 0

<Démarrer>

[La balle suit le bateau.]

C : Elle reste sur le mât.

I : C'est trompeur, mais elle n'est pas accotée sur le mât. Elle peut tomber dans le vide. J'aurais peut-être dû la placer ailleurs, en avant ou quelque chose. Tu es capable d'imaginer que, si on enlève le bout brun, ça ne change rien. Tu as dit que la balle allait rester sur place, mais elle a continué avec le bateau. Est-ce que ce sera vrai pour toutes les vitesses du bateau?

C : Oui, sûrement.

[p. 50]

I : Trouves-tu normal que la balle fasse cela? Tu as hésité encore les deux. Je ne sais pas si je me trompe, tu me le diras, tu croyais davantage que la balle allait rester sur place. Trouves-tu normal que ça continue avec le bateau?

C : Non, pas vraiment, parce que je ne vois pas pourquoi la balle bouge si elle n'a pas eu de coup. Elle devrait juste tomber et elle a continué. C'est bizarre.

I : Dans la situation, c'est peut-être un peu trompeur, mais, avant qu'on démarre la situation, le bateau est déjà en mouvement.

C : Oui.

I : Il bouge. Il continue à avancer, avancer tout le temps. Au moment où on appuie sur démarrer – le bateau est en mouvement avant – on lâche le bateau. Alors, la balle se déplaçait avec le bateau. Là, on a lâché la balle. Toi, tu dis que la balle devrait rester là, puisqu'elle flotte dans les airs lorsqu'on la lâche. Ce que nous avons vu, c'est qu'elle continue avec le bateau. Et toi, tu ne trouves pas cela normal.

C : Non. Non, parce que, s'il n'y a pas de gravité, elle devrait... Ça se peut qu'elle bouge, parce que... Comme avec la flèche, on donnait un élan et elle continuait tout le temps tout droit. Là, elle n'a pas d'élan et pas de coup, alors je ne vois pas pourquoi elle bouge.

I : Mais, la balle se déplaçait avant qu'on la lâche.

C : Oui.

I : Elle bougeait. Elle se déplaçait comme cela et on la lâche.

C : Ah, OK...

I : Le bateau était déjà en mouvement avant. Il aurait fallu que je modifie la situation pour que le bateau soit en mouvement et, lorsqu'on appuie sur un bouton, à ce moment la balle est lâchée.

C : OK, je comprends. Il n'y a pas de gravité et la balle irait avec le bateau. OK... Depuis le début, elle est avec le bateau.

I : Que veux-tu dire « avec le bateau »? Qu'est-ce que tu n'avais pas compris?

C : Je pensais que le bateau n'était pas en mouvement.

I : Qu'on lâchait et qu'après le bateau se déplaçait?

C : Oui, ce n'est pas [?].

I : Merci, je vais essayer de l'expliquer mieux aux autres dès le départ. Y a-t-il autre chose que tu veux essayer?

C : Non, c'est correct.

I : Compte tenu de ce que nous avons dit, si je te repose la question : si nous sommes dans la réalité et que nous sommes dans un bateau en mouvement et qu'on lance la balle dans les air à partir du même poteau bleu foncé, que va-t-il arriver?

C : Y a-t-il de la gravité?

I : Oui.

C : La balle va redescendre.

I : Peux-tu me pointer avec la souris ce que la balle fera?

C : Elle va monter et ensuite elle va descendre.

I : Si on la lance du sol du bateau?

C : Si le bateau est en mouvement, elle restera quand même rester là... Si le bateau est en mouvement, s'il va vite, la barre grise, avant que la balle redescende, prendra la place de la bleue, alors la balle tombera sur la barre grise. La balle restera toujours à la même place; elle ne va pas bouger.

I : Ça va tomber, par rapport aux poteaux de couleurs, plus à gauche.

C : Oui.

[p. 51]

I : S'il n'y a pas de gravité, que nous sommes sur le sol du bateau et que nous lâchons la boule dans les airs. Le bateau est en mouvement et nous lâchons la balle dans les airs, dans le vide. Le bateau continue tout le temps à avancer. La seule différence est qu'il n'y a pas de gravité. Qu'est-ce qui va arriver? On ne la lance pas dans les airs : on la lâche.

C : Ça fera comme quand il n'y a pas de gravité. La balle continuera avec le bateau, parce que le bateau, s'il n'a pas de gravité, c'est un peu le sens, le courant dans le sens où les objets vont.

I : Dis-moi si je comprends. Quand il n'y a pas de gravité, la balle suit le bateau. Quand il y a de la gravité, la balle ne suit pas le bateau. Est-ce cela que tu as dit?

C : Oui.

I : C'est pour cette raison que, lorsqu'on lâche une balle dans les airs et qu'il y a de la gravité, tu dis que la balle va tomber plus à gauche par rapport aux poteaux de couleurs. S'il n'y a pas de gravité, la balle va continuer.

C : Oui.

I : Je crois que j'ai assez bien compris ce que tu voulais dire. C'est beau?

C : Oui.

I : Il reste encore 10 minutes. Comme tout s'est passé assez vite. Je propose que l'on repasse rapidement les situations. La une, la deux, la trois... Et je vais peut-être te poser des questions un peu différentes ou nous essayerons des nouvelles choses pour voir les différences que ça fait. Seulement si tu veux.

C : Oui.

Retour sur les situations 1 à 5

Retour sur la situation 1

I : Nous allons commencer aujourd'hui et la prochaine fois nous continuerons. Nous aurons peut-être le temps de repasser rapidement la situation 1. Et nous verrons ce que ça donne. Il y a certaines choses que je veux voir. Je veux être certain que j'ai bien compris et nous allons essayer de modifier certaines choses. Rappelle-moi rapidement ce que faisait la vitesse.

C : C'est la vitesse à laquelle la boîte se déplaçait. C'est la vitesse qui disait si c'est vite ou pas vite.

I : Qu'est-ce qui arrivait à la vitesse de la boîte qui glisse sur le sol?

C : Elle bougeait tout le temps, mais la vitesse faisait que ça arrêtait.

I : Qu'est-ce qui faisait arrêter le bloc?

C : Il n'avait plus de vitesse.

I : Qu'est-ce qui faisait perdre de la vitesse au bloc?

C : On le pousse, mais il y a toujours comme quelque chose en avant de lui qui le pousse dans l'autre sens un peu, alors...

I : Répète cela.

C : Au début, on le pousse avec la vitesse, mais il y a toujours quelque chose en avant qui le pousse dans l'autre sens. Si la vitesse est haute, le bloc bleu ira assez loin, mais il s'arrêtera, parce que la force qui va le pousser gagnera sur la vitesse.

I : Il y a quelque chose qui pousse dans l'autre sens... Qu'est-ce que c'est?

C : C'est comme le vent, mais pas vraiment le vent. C'est comme l'air qui pousse. Puisque c'est une surface plane, c'est comme si on mettait un grand carton et qu'on poussait contre le vent. Parfois, c'est dur, parce que le vent est fort. C'est la même chose, mais avec l'air.

[p. 52]

I : D'accord, je crois que j'ai bien compris ce que tu voulais dire. Tu ne m'avais pas parlé de cela la dernière fois?

C : Non.

I : Alors, dans ce cas, je te pose la question : si on peut enlever l'air, alors il n'y a plus la force qui pousse dans l'autre sens comme tu disais, qu'est-ce qui va arriver? Je ne sais pas si tu le sais, mais nous l'essayerons après, on peut même enlever l'air. L'air est à standard; je vais enlever l'air. Nous ne l'essayerons pas tout de suite. Qu'allais-tu dire?

C : S'il n'y a pas d'air, peut-être que le bloc va tout le temps continuer.

I : Tout le temps?

C : Tout le temps, mais ça va quand même s'arrêter, mais je ne sais pas pourquoi ça va s'arrêter. C'est ça le problème.

I : On enlève l'air. Tu dis qu'il n'y aura pas d'autres forces qui vont pousser, mais tu penses quand même que le bloc va s'arrêter, mais tu ne sais pas trop pourquoi.

C : Oui.

[...]

I : Qu'est-ce qui l'a fait ralentir? Est-ce que le bloc a besoin de quelque chose pour le faire ralentir ou est-ce qu'il ralentit tout seul par lui-même?

C : Il peut ralentir par lui-même, parce que, rendu à une certaine place... Nous l'avons poussé au début, mais rendu à une certaine place, il n'y a plus rien pour le pousser ou lui donner de la vitesse, alors il arrête, il arrête un peu par lui-même.

[p. 53]

I : Je ne sais pas. Si la surface était une patinoire, est-ce cela changerait quelque chose?

C : C'est sûr que la boîte glisserait plus longtemps, parce qu'une patinoire, ça glisse. Puisque la boîte glisserait plus longtemps... La boîte glisserait plus longtemps, mais elle arrêterait quand même.

I : Quand même, mais plus loin. Si la patinoire était parfaite, vraiment, vraiment glissante?

C : Elle arrêterait quand même, mais beaucoup, beaucoup plus loin. Même si c'est une bille qui roule tout le temps, sauf si quelque chose l'arrête. Le bloc, c'est la même chose. Le bloc avec la patinoire, c'est la même chose. Il glisse tout le temps, sauf si quelque chose l'arrête ou s'il n'a plus de vitesse.

I : Si le bloc... Encore de l'imagination... S'il n'y avait pas de gravité? Est-ce que ça changerait quelque chose ou est-ce que ça ne changerait rien?

C : Ça ne bougerait plus... Bien... Ça bougerait tout le temps.

I : Tout le temps?

C : Ça n'arrêterait pas. Tout le temps. Ça bougerait tout le temps.

I : Tout le temps : tu veux dire infiniment?

C : Oui.

I : Tant qu'il n'y aura pas de mur pour rentrer dedans.

C : Oui.

I : Nous avons le bloc qui se déplace et qui ralentit. Au début, tu disais que c'était l'air. Nous avons enlevé l'air. Je te demande : si on enlève la gravité, que va-t-il se passer? Tu dis que la boîte va continuer tout le temps?

C : Oui.

I : Ça n'arrêtera pas?

C : Oui.

I : Donc, c'est la gravité qui fait ralentir le bloc?

C : Ça se peut.

I : Je vais essayer d'enlever la gravité... As-tu vu? Il y a gravité. Si je l'enlève... Tu penses que la boîte n'arrêtera pas?

C : Oui.

I : C'est moi qui déplace la souris présentement. Je place la vitesse à 1. D'après toi, ça n'arrêtera pas? Même si c'est une petite vitesse comme cela?

C : Oui.

[...]

[p. 54]

I : Qu'est-ce qui fait, d'après toi, que la gravité fait ralentir le bloc?

C : C'est parce que la gravité pèse sur le bloc. Puisqu'elle pèse sur le bloc, rendu à une certaine place... C'est comme si on faisait rouler quelque chose... Exemple : si on fait rouler une bille et qu'on met son doigt dessus. Ça fera arrêter la bille. La gravité, c'est la même chose avec le bloc. Si la gravité pèse sur le bloc, à un moment donné, le bloc va s'arrêter.

I : Même si on est sur une patinoire qui glisse vraiment beaucoup?

C : Oui, sauf si on glisse avec le bloc.

I : Vas-y. Que veux-tu dire?

C : Si on glisse avec le bloc. Si on glisse avec le bloc...

I : Si on est en mouvement de cette manière... D'accord, je comprends. C'est intéressant. Dernière chose que je veux te montrer. Il est possible de transformer le sol en patinoire parfaite où le bloc glissera parfaitement. Je ne me souviens plus exactement. Je vais le chercher. Je pense que je dois... Il y a tellement longtemps que je ne l'ai pas fait. Il est écrit 0,3. Si je le mets à 0... Tu n'as pas besoin de tout comprendre. J'enlève le frottement pour rendre la glace parfaite. Je vais faire la même chose avec le sol... 0. Je vais remettre la gravité. Tu comprends ce que je fais. Je me suis arrangé pour que ça glisse parfaitement et, maintenant, je vais remettre la gravité comme sur la Terre. Que va-t-il arriver? Il y a la gravité.

C : Le bloc ira loin, mais il va s'arrêter. Puisque la vitesse est petite, il s'arrêtera moins loin que si la vitesse est grande, c'est sûr. Si la vitesse est à 1, le bloc s'arrêtera... Il ne bougera peut-être pas. Mais, puisqu'il n'y a pas de frottement, peut-être qu'il ira quand même loin au lieu de ne pas bouger.

I : Quand même loin, mais il va s'arrêter?

C : Oui.

I : Tu peux l'essayer.

Vitesse : 1

Force : 0

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte n'arrête pas.]

C : Le bloc ne semble pas s'arrêter.

I : Oh non. On dirait qu'il reste à 1,0.

C : Peut-être qu'il ne va pas s'arrêter ou peut-être qu'il arrête très loin, vraiment très, très, très loin. Presque jamais.

I : Tu peux démarrer et nous allons suivre la vitesse pour voir si le bloc est en mouvement. Même si on ne voit plus le bloc, on sait s'il bouge. Si ça indique 1, ça veut dire que le bloc bouge. Si la vitesse tombe à 0,9, cela voudra dire que le bloc ralentit.

Vitesse : 1
Force : 0
Masse : 1
<Démarrer>

[p. 55]

I : [Sifflements.]

C : Il se peut qu'il ne s'arrête pas.

I : S'il ne s'arrête pas, peux-tu expliquer pourquoi? Ou trouves-tu cela bien bizarre?

C : C'est bizarre, mais ce n'est pas bizarre. C'est sûr que, s'il glisse, il va tout le temps glisser, parce qu'il n'y a pas de frottement. C'est comme si le bloc était une bille et que le sol était comme une patinoire parfaite, alors elle va toujours rouler.

I : Même s'il y a de la gravité?

C : Même s'il y a de la gravité.

I : Pourtant, comme tu le disais bien tantôt, la gravité va pousser sur le bloc.

C : Oui, sauf que maintenant... Elle bougera quand même parce que ça va glisser. C'est un peu bizarre finalement pourquoi ça continue...

I : Répète juste la dernière phrase que tu as dite. Je ne suis pas sûr d'avoir bien compris.

C : Qu'est-ce que j'ai dit?

I : Tu expliquais pourquoi c'était bizarre et que tu ne comprenais pas trop.

C : Je croyais que s'il y avait de la gravité, ça allait peser sur le bloc même si le sol était lisse. Mais finalement, c'est lisse, mais le bloc n'arrête pas. Sûrement parce que, puisque c'est infini, une patinoire infinie, la gravité sur quelque chose de lisse n'a peut-être pas de force parce que ça glisse trop ou quelque chose dans le genre...

I : Quelque chose dans le genre. Si, juste avant de terminer, je te demande de me résumer comment fonctionne cette situation. Y a-t-il des choses que tu as comprises ou apprises de nouveau.

C : La vitesse ne fait pas beaucoup avancer le bloc. C'est juste peut-être un peu. La force, c'est la force à laquelle on frappait le bloc. Si la force est très grande, au début, le bloc ira plus vite, parce qu'on aura frappé fort. La masse : si c'est très lourd, ça ira moins vite que si c'est à 1, par exemple.

I : Peux-tu me décrire ce que fait la vitesse? Tu me l'as dit, mais tu me l'as dit vite.

C : La vitesse, c'est... Si la masse est, par exemple à 5 et que la vitesse est à 1, le bloc va avancer un petit peu, mais vraiment pas vite parce que la vitesse sera très basse et la masse sera très lourde. C'est pour cela que ça va lentement.

I : Je t'avais posé cette question, mais je te la repose maintenant. Es-tu capable d'imaginer une situation dans la réalité où on lance un objet et qu'il continue tout le temps? Tu peux dire qu'il n'y a pas de gravité. Tu peux dire tout ce que tu voudras. Admettons que nous sommes dans l'espace.

C : Je ne sais pas... Eum...

I : Supposons que tu as l'objet de ton choix, une balle ou une feuille de papier ou ce que tu voudras, nous sommes dans l'espace et il n'y a pas de gravité. Et tout ce que tu voudras. Est-ce possible de lancer un objet, au départ, qui continue tout le temps.

C : C'est certain que c'est possible. Puisqu'il n'y a pas de gravité, l'objet ne va pas s'arrêter. Il sera tout le temps en mouvement.

I : Il ne ralentira pas?

C : Il va ralentir... Il va peut-être ralentir, parce que parfois il y aura comme du courant. Il ira toujours dans un sens. Et quand... Parfois, il va ralentir parce que le courant ira moins vite.

I : Le quoi?

C : Le courant.

I : Quel courant?

[p. 56]

C : Le courant qu'il y a dans l'espace. Autour de la Lune, il y a un peu... C'est un peu... Ça flotte dans les airs, mais les objets... C'est un peu comme s'il allait toujours un peu dans le même sens, alors c'est un peu comme cela le courant : les objets se déplacent dans un certain sens. Si je lance une balle, elle va suivre le courant, mais elle ralentira peut-être, parce que le courant va baisser ou quelque chose comme cela, sauf si c'est tout le temps pareil.

I : Ce courant, c'est quoi? C'est peut-être difficile à expliquer.

C : Je ne sais pas trop, quelque chose...

I : Quelque chose... Nous avons déjà dépassé le temps, alors nous allons arrêter. Merci beaucoup.

Entrevue 5

Retour sur la situation 2

[...]

[p. 59]

I : J'aimerais que tu me dises, si on enlève la gravité, nous l'avons fait, qu'est-ce qui arrivait? La flèche ne tombait pas. C'était quoi le parcours de la flèche?

C : Elle restait toujours en ligne droite.

I : Et sa vitesse?

C : Quand même assez vite.

I : Est-ce que la flèche continuait tout le temps ou est-ce qu'elle arrêtait?

C : Elle arrêtait après longtemps.

I : Est-ce normal que ça arrête?

C : Oui.

I : Si on enlève le frottement de l'air, que va-t-il arriver à la flèche propulsée sans gravité?

C : Elle va continuer, mais peut-être qu'elle va arrêter plus loin ou ne pas arrêter.

I : Je sais bien que nous ne l'avons pas essayé, mais, selon toi, est-ce que la flèche a plus de chance de continuer tout le temps ou d'arrêter?

C : De continuer tout le temps.

I : Es-tu sûre?

C : Oui.

[...]

Retour sur la situation 4b

[...]

Retour sur la situation 4c

[...]

Retour sur la situation 5

[p. 65]

[...]

I : Si le bateau est en mouvement et que... Non, je recommence. Le bateau est immobile et le petit bonhomme est sur le mât avec la balle. Il n'y a pas de gravité et il n'y pas d'air (admettons qu'il est

dans l'espace) et il lance la balle. Il la lance pas trop fort, mais il la lance pas trop fort dans la direction droite.

C : Elle va arrêter ou elle ne va pas arrêter, mais je pense plus qu'elle ne s'arrêtera pas, parce que, s'il n'y a pas de résistance de l'air et pas de gravité, alors la balle va comme flotter, mais elle va continuer à bouger.

[...]

[p. 66]

I : Tu dis longtemps. Est-ce que ça veut dire que tu es sûre qu'elle va finir par s'arrêter, mais que ça peut être longtemps ou pas longtemps ou penses-tu que la balle peut continuer éternellement, tant qu'il n'y a pas d'obstacle?

C : Je pense plus que la balle va continuer éternellement. S'il n'y a pas d'air, pas de gravité, alors il n'y aura rien qui pourrait la faire arrêter.

I : Tu es en train de dire que s'il n'y avait pas d'air et pas de gravité et qu'on lance un objet, il va continuer... tout le temps.

C : Oui.

I : C'est ce que tu es en train de dire?

C : Oui.

I : As-tu autre chose à ajouter?

C : Non.

[...]

Annexe 2 : Extraits des entretiens avec Vincent

[p. 1]

Entrevue 1

Situation 1

[...]

[p. 5]

V : Bien, j'ai remarqué que au début quand j'essayais de la faire passer entre la ligne noire et la ligne orange, au début j'avais donné une vitesse de 20, si je me rappelle bien, et c'était allé sur la ligne noire. Après ça, j'ai donné 25, un petit peu plus haut, et c'est allé sur la ligne orange. Donc, c'est là que j'ai constaté que plus on donnait de la vitesse, plus ça allait loin.

I : Est-ce que tu trouves que ça a du sens ?

V : Bien oui, parce que si on fait rouler une balle, déjà c'est plus rond, donc ça va plus loin. Mais si disons on la frappe avec un bâton d'hockey, elle risque d'aller assez loin, mais si on la pousse avec notre doigt ou qu'on lui fait une pichenotte, elle risque de pas aller loin parce que la vitesse est beaucoup différente.

[p. 6]

I : Ok, tu dis que quand c'est rond ça va aller plus loin ?

V : Non, ce n'est pas ça que je veux dire. Mais quand c'est rond ça roule; donc il y a moins de friction. Et quand c'est carré, comme ça, il y a plus de friction.

I : Ok, si dans ce cas-là, je te demande : j'aimerais ça que la boîte sorte de l'écran, qu'elle se rende tellement loin, qu'elle sorte de l'écran.

V : Je vais essayer en la mettant [la vitesse] à 50,99. Je pense que c'est le maximum que je peux avoir.

I : Non tu ne peux pas aller plus haut que 50.

V : Je peux pas avoir 50,99 ?

I : Non essaie-le, tu vas voir.

Vitesse : 50,99

Force : 0

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte sort à la moitié de l'écran.]

I : Quand tu as fait démarrer, c'est revenu à 50.

V : Ah! Mais la masse est à 1, donc c'est plus lourd. Alors si j'avais le droit de la baisser, peut-être qu'à 50 elle pourrait aller plus loin.

[...]

I : On va essayer la force. Je te demande la même chose. Fais arrêter la boîte bleue entre la ligne noire et orange.

V : Je vais essayer de lui donner beaucoup de force, pas mal. On va commencer par 6.

Vitesse : 0

[p. 7]

Force : 6
 Masse : 1
 <Démarrer>
 [La boîte ne s'arrête pas et sort de l'écran.]

V : Hein? Ça ne s'arrête pas! Ça ne s'arrête pas! Est-ce que c'est normal?

I : Ce n'est pas moi qui décide, c'est le logiciel, là. Ça te surprend?

V : Oui. Je pensais que la force, c'est comme une force qui pousserait. Mais là, c'est toujours la même vitesse. Ce n'est pas un petit peu plus bas parce que ça prend de la force. Mais là, ça continuait et c'est sorti : je comprends pas là.

I : Là tu dis que quand on met la force, ça continue tout le temps. Puis toi tu pensais que ça allait faire quoi au juste?

V : Reprenons l'exemple de la balle. Quand tu la frappes avec un bâton d'hockey, ça lui donne beaucoup de force. Puis là, elle va rouler, elle va rouler, elle va rouler. Comme la force, il va y en avoir de moins en moins, ça va ralentir. Mais là, ce que j'ai vu, ça a toujours continué avec la même vitesse.

I : Si je comprends bien, on donne une certaine force à la balle. C'est ça que tu disais?

V : Oui.

I : Puis cette force là elle diminue au fur et à mesure et là ça arrête.

V : Oui.

I : Puis, là, c'est pas ça qu'on observe?

V : Non. Alors, ce n'est peut-être pas nécessairement ce que je croyais.

[...]

[p. 8]

I : Est-ce que c'est conforme à ce que l'on peut observer dans la réalité, ça ?

V : Euh, non. Pas du tout. Avec un objet comme ça, ce n'est vraiment pas conforme.

I : Qu'est-ce qui devrait se passer ?

V : Bien, comme j'ai dit: il devrait perdre de la vitesse et arrêter à un moment. Là, il a pas l'air d'en gagner ni d'en perdre. Il a l'air de rester stable

[p. 9]

[...]

I : Je te donne la permission... Disons place la force à 0. Tu peux faire ce que tu veux; ce que je veux c'est que la boîte bleue se déplace le plus rapidement possible sur le sol.

V : Ok, donc c'est 1 la masse; 10 la force; 50 la vitesse.

Vitesse : 50

Force : 10

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte ne s'arrête pas et sort de l'écran à toute vitesse.]

V : Ah! Je l'ai vue perdre de la vitesse. Donc quand on rajoute de la vitesse à la force, ça en perd. Attends, je vais regarder.

Vitesse : 50

Force : 0

[p. 10]

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte ne s'arrête pas et sort de l'écran à moitié.]

V : Si on ajuste la vitesse, ça en perd là aussi. Donc la vitesse fait perdre... [silence] fait perdre... [silence] de la vitesse. La force, elle c'est une force continue. Donc en mélangeant la vitesse et la force on pourrait la faire arrêter.

I : Essaie-le.

V : Mais où ? Je la fais arrêter n'importe où ?

I : Oui.

V : Force à 2, non à 2 on voyait que ça marchait pas bien. Donc 4. Et une vitesse de 15. Et on va regarder ce que ça va faire.

Vitesse : 15

Force : 4

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte ne s'arrête pas et sort de l'écran.]

V : Ah, ça s'est arrêté sur la ligne noire... Bien ça a commencé à s'arrêter. Mais là la vitesse s'est arrêtée, mais la force continue, continue. Donc en fin de compte, la force a toujours le dessus. La masse on ne peut pas avoir plus bas. Ah ! Bien je l'ai. Je viens d'avoir une idée. La masse, je peux toucher à la masse. Si je mets une masse assez lourde, ça va peut-être la faire... comme la force est continue, mais que la masse est plus forte, ça va peut-être la faire ralentir.

I : Répète ça.

V : Comme la masse est plus forte, même si la force est continue, bien ça va sûrement la faire ralentir. Comme c'est plus lourd.

I : Parce que c'est plus lourd, ça va ralentir ?

V : Oui. Disons, quand on pousse une balle avec notre main, on peut aller assez vite merci parce que c'est vraiment très léger, mais si on pousse un tracteur disons que c'est plus compliqué parce que c'est plus lourd. Donc si je fais ça...

Vitesse : 15

Force : 4

Masse : [presque le maximum]

<Démarrer>

[La boîte s'arrête entre les 5^e et 6^e lignes.]

V : Avec la force, quand même, ça s'est arrêté en mettant une masse plus forte. Je vais réinitialiser. Je vais réessayer en mettant 0 à la vitesse; 3 à la masse, avec le 6 de tantôt si ça peut s'arrêter.

Vitesse : 0

Force : 6

Masse : 3

<Démarrer>

[p. 11]

[La boîte ne bouge pas. Vincent le refait une deuxième fois pour être sûr]

V : Donc 3 c'est trop gros. On va mettre 2,75.

Vitesse : 0

Force : 6

Masse : 2,75

<Démarrer>

[La boîte ne bouge pas.]

V : Ok, donc la force est insuffisante face au poids de la vitesse.

[...]

[p. 12]

I : Réinitialise. Juste avant de passer à l'autre situation, j'aimerais ça que tu me dises ce que tu as appris, ce que tu as compris par rapport à cette situation là.

V : Bien j'ai compris pas mal à quoi servait vitesse, force, masse. J'ai surtout compris que la vitesse... Quand je disais la force qu'on donne à une balle quand on la frappe, c'est une force, mais comme ce n'est pas une force continue, mettons que quand on pousse la balle avec notre bâton – disons qu'on fait un slapshot – bien on y touche, mais avec la force du bâton elle s'en va. Mais si disons – moi j'ai inventé un lancer qui s'appelle le Happy Gilmore – qu'on court avec la balle en la gardant sur la bâton, elle va garder toujours sa force parce qu'en fait c'est pas la sienne c'est la nôtre qui la pousse. Donc la force est une force continue, la vitesse c'est une grande vitesse au départ qui ralentit à la fin, puis la masse...

I : Est-ce que dans toutes ces situations là, cette vitesse de départ là est perdue, dans tous les cas la boîte ralentit ou il y a des cas où ça ne ralentit pas.

V : Bien il y a des cas quand on mettait la force et la vitesse, ça ralentissait mais ça avançait quand même toujours puisque la force était continue.

I : Mais si il n'y a pas de force continue ?

V : Bien la vitesse – comme disons là je mets à 50, je démarre – elle s'arrête à un moment donné.

Vitesse : 50

Force : 0

Masse : 1

<Démarrer>

[La boîte s'arrête à moitié hors de l'écran.]

I : Pour toi c'est normal.

V : Oui, parce que la vitesse... comme je t'ai dit avec la balle, ça va rouler puis après ça, ça va s'arrêter parce que tu vas perdre de la vitesse.

I : Y a-t-il autre chose que tu as appris ? Tu as parlé de la vitesse, de la force. As-tu parlé de la masse ?

V : Bien la masse, c'est pas vraiment ce que j'ai appris, c'est surtout ce que j'ai retenu. Parce que c'est un peu simple, c'est implicite comme je pourrais dire parce que c'est comme dans la vraie vie, quand tu pousses un tracteur c'est difficile, comme pour la force. Tantôt, on avait mis la masse à 1,75, la force à 6, ça avançait à 0,3 m/sec.; puis quand on avait mis la masse à 1, puis la force à 4 – donc 2 de plus bas pour la force – ça avançait à 0,4 m/sec.. Donc plus c'est lourd, plus c'est difficile à pousser.

I : Ok, je veux juste prendre en note que l'on a fait la situation 1.

V : Parfait.

Situation 2

[...]

[p. 13]

[...]

I : Si on démarre la situation sans toucher aux paramètres, qu'est-ce qui va se passer ? Fais-le pas tout de suite, mais dis-moi ce qui va se passer.

V : D'après moi la boule bleue est plus grosse, je ne sais pas si ça a rapport avec le poids, comme elle est plus grosse mais ce n'est peut-être pas nécessairement comme ça... mais disons si la grosse boule bleue est remplie d'air et la rouge c'est une boule de métal, bien c'est sûr que la boule rouge va aller plus vite que la bleue, mais disons que la bleue est du métal et que la rouge est de l'air ça va être le même principe, mais si les deux sont du métal, bien c'est sûr que la bleue va aller plus vite parce qu'elle est plus grosse et si c'est de l'air, même chose. Donc si c'est du rebond, d'après moi la plus grosse, comme elle va avoir plus de poids quand elle va tomber, ça va donner une plus grande force et va rebondir plus; mais dans l'autre cas, la rouge, comme elle est moins lourde, ça va être plus facile de rebondir, donc ça risque d'être à force égale des deux bords si c'est les rebonds.

I : Donc toi tu dis que si c'est fait du même matériel, métal métal, la plus grosse va toucher le sol en premier.

V : Exactement, parce que le poids va être plus grand. Mais dépendamment si, comme tu dis métal, mais un peu être de l'aluminium et l'autre du fer, mais si c'est vraiment la même chose...

[...]

[p. 17]

I : La dernière chose que j'aimerais te demander – parce que j'avais oublié – j'aimerais que la vitesse augmente en tombant du cercle bleu, disons.

V : Je vais essayer au plus gros. Peut-être que ça va marcher.

Contrôleur A (masse de la balle bleue) : 1,50

Contrôleur B (masse de la balle rouge) : 0,20

<Démarrer>

V : Ah! Ça augmente. Ça a augmenté jusqu'à 2,3 m/sec puis après ça, ça a arrêté.

I : Ok, mais j'aimerais ça que ça continue tout le temps – mais c'est sûr que quand ça va toucher le sol, ça va arrêter – mais que ça descende tout le long de la chute.

V : Est-ce que c'est possible de mettre le poids là là ? [Ajouter le contrôle rouge au contrôle bleu]

I : Qu'est-ce que tu veux dire ?

V : Disons mettre ça à 150, 150, mais transférer la grosseur là à là. Peut-être que ça réussirait.

I : Toi ce que tu dis...

V : Mettre les deux à 1,50, mais le transférer du rouge au bleu pour que le bleu soit encore plus immense et peut-être que ça fonctionnerait.

I : Ok... Que le contrôle A et B contribuent à faire grossir le bleu. Non ce n'est pas possible.

V : Donc si ça ne marche pas à 1,50, je crois que c'est impossible. Parce que si 1,50 c'est le plus gros, donc ça devrait aller plus vite, mais si ça tombe, donc ça devrait être – par les lois de la gravité – plus ça descend, plus ça va vite, mais ça a pas vraiment l'air de ça. Donc personnellement je crois que c'est impossible.

I : Tu as dit par la loi de la gravité, plus ça descend, plus ça devrait aller vite.

V : Oui, parce que si on se met en haut de l'école et qu'on lance une balle de pâte à modeler, elle va prendre de la vitesse en descendant; elle va prendre de la vitesse beaucoup, beaucoup. Si on se met juste debout sur l'asphalte puis qu'on la lâche, c'est sûr que celle qu'on va avoir lâché en haut va être beaucoup plus écrabouillée que l'autre parce qu'elle va avoir pris de l'accélération en descendant.

[p. 18]

I : Mais comment tu expliques le fait que la vitesse n'augmente pas dans cette situation-là ?

V : D'après moi, c'est que la loi de la gravité a été beaucoup moins forte qu'ici et sûrement que...

I : Mais si je te dis que c'est la même chose ?

V : Je ne comprends pas du tout. Si tu me dis que c'est la même chose, je ne comprends pas du tout.

I : Tu ne comprends pas le fait que ça descende à vitesse constante ?

V : Oui, c'est ça. Normalement, ça devrait accélérer.

I : Ça devrait accélérer. Pour tous les objets ?

V : Dépendamment c'est quel objet. Parce que si mettons que c'est une montgolfière... une montgolfière, c'est fait pour flotter : là ça descend, donc ça ne fonctionnerait pas non plus. Si mettons c'est... C'est pas mal difficile à dire.

I : Si je te dis une feuille de papier...

V : Une feuille de papier. Si disons je lâche une feuille de papier [il le fait en même temps] ici. Si tu regardes, ça prend toujours un peu plus de vitesse en descendant. Donc tant que ça descendait, ça prenait de la vitesse. Donc ça devrait être la même chose ici.

I : Donc même avec une feuille de papier qu'on fait tomber comme tu viens de le faire présentement à l'horizontale... On se met sur le toit de l'école et on la fait tomber, alors ça va toujours prendre de la vitesse en descendant.

V : Ça va sûrement être beaucoup moindre que si on prend une balle de tennis, mais je suis sûr que ça en prendrait constamment. Sûrement un nombre très moindre.

I : Tu es sûr.

V : Je suis sûr.

I : As-tu d'autres choses à rajouter ?

V : Non. Je pense que c'est bien.

I : Excellent. Fin de l'entrevue 1.

Entrevue 2

Résumé – Situation 1

[...]

[p. 19]

[...]

Résumé – Situation 2

[...]

Situation 3

[...]

[p. 22]

I : J'aimerais ça que la flèche ne descende pas, qu'elle continue en ligne droite.

V : On va réessayer à la vitesse la plus rapide, comme ça, peut-être que ça va rester stable.

[p. 23]

Vitesse : 50

Masse : 3

<Démarrer>

[La flèche sort de l'écran, mais en descendant un peu de niveau]

V : Non, même là, ça descend quand même. Peut-être que si on mettait une masse beaucoup plus légère...

Vitesse : 50

Masse : 0,10

<Démarrer>

[La flèche tombe entre la ligne orange et la ligne grise]

V : C'est ça regarde. Plus la masse est petite, moins ça va loin. Donc je pense que c'est impossible, toujours sur le plan de la gravité.

I : Su le plan de la gravité ?

V : Sur le principe de la gravité, parce que quelque chose qui est dans l'air doit toujours retomber. Donc c'est impossible en voyant ça.

I : Je comprends. Tu sais, dans la première situation, la boîte qui glissait sur le sol, elle arrêta tout le temps...

V : À un moment donné, sauf lorsqu'elle sortait de l'écran.

I : La situation est un petit peu pareille comme tu l'as dit tantôt au début. La flèche va s'en aller pareille comme la boîte, mais en plus va descendre et ça, tu l'as quand même bien expliqué. J'aimerais ça savoir, si on était capable d'enlever la gravité, qu'est-ce qui arriverait ?

V : Si on enlevait la gravité, la flèche flotterait. Comme nous, on flotterait s'il n'y avait pas la gravité. Et pour avancer, c'est un peu comme si on devait nager. C'est un bon exemple la nage. Parce que quand on est dans l'eau, on est un peu attiré vers le bas, à cause de la gravité justement, mais on est déjà plus « lousse ». Et pour avancer, si tu marches dans l'eau et que tu as rien en dessous de tes pieds, ça ne marchera pas du tout : il faut que tu te donnes des élans avec tes bras et tes jambes. Donc s'il n'y avait pas de gravité, ça serait un peu la même chose : c'est comme si on nageait dans le vide.

I : Et qu'est-ce qui arriverait à la flèche ?

V : Bien, la flèche on la pousserai, elle monterai, elle descendrai, elle irai loin, elle reculerai, n'importe comment dépendamment.

I : Si ça lui tente d'aller en haut elle va aller en haut ?

V : Parce que comme il n'y a plus de gravité, ce n'est plus attiré vers le point. Il va où est-ce qu'il veut.

I : Toi, tu dis que si un archer décoche sa flèche, s'il n'y a pas de gravité, la flèche, une fois lâchée, va monter descendre, tourner...

V : Mais comme on lui a donné de l'élan, c'est sûr qu'elle va avancer, mais elle peut monter, peut descendre, parce que comme elle n'est pas attirée vers le sol – parce qu'une flèche, quoi que tu fasses, quand tu vas la tirer elle va toujours être attirée vers le sol comme n'importe quoi – donc si elle n'est pas attirée vers le sol, elle avancerai, monterai, descendrai, elle irai sur les côtés.

I : C'est vrai qu'elle n'est pas attirée vers le sol, mais si elle n'est pas attirée vers le sol, pourquoi elle descendrai, monterai, descendrai, monterai ?

V : Pour le fun.

[p. 24]

I : Pour le fun ?

V : Je ne pense pas vraiment que c'est plus le fun, mais le principe...

I : Qui déciderai ?

V : Mais dépendamment de l'angle de l'arc. Je pense que quand elle va ralentir, elle va être comme ça dans les airs, elle va arrêter d'avancer et elle va flotter dans les airs.

I : Avancer, flotter dans les airs.

V : C'est comme n'importe quoi, elle va ralentir à un moment donné. Mais comme ça ne sera plus attiré vers le sol, ça va flotter un peu dans l'air parce qu'il n'y aura plus de vitesse et elle va rester là.

[...]

I : L'archer décoche, ça va à 80 km/h, ça finit par arrêter et là ça flotte dans les airs. Qu'est-ce qui fait ralentir la flèche ?

V : C'est comme n'importe quoi. Si on lance une balle, au fur et à mesure elle va perdre de la vitesse. Quand elle aura plus de vitesse...

I : Ma question c'est qu'est-ce qui fait perdre de la vitesse ?

V : Le temps un peu. Si on la tire, évidemment, ça va avancer, mais c'est sûr qu'elle fera pas le tour de la terre à 80 km/h; c'est sûr qu'elle va *stopper* à un moment donné. Si on tirait une flèche dans

l'espace... Ou quand il y a un peu de gravité, si tu la tires, elle va stopper avant d'avoir même pas fait l'Amérique.

I : Dans la situation, s'il n'y avait pas de gravité, toi tu dis que la flèche irait en ligne droite et qu'elle ralentirait, ralentirait et elle ne tomberait pas.

[p. 25]

V : Oui. Comme n'importe quoi. Comme là, elle avance, elle avance et elle ralentit après.

[Vincent appuie sur démarrer pour montrer un exemple]

I : Et si on revient à la situation 1, si on prend la même idée : c'est quelqu'un qui donne une poussée, comme s'il décochait la flèche... Qu'est-ce qui arrive à la boîte ?

V : Bien, c'est comme la flèche, il va perdre la vitesse, mais c'est pas juste avec le temps : c'est aussi avec la friction qui va faire qu'il va perdre de la vitesse. Bien il y a une différence face à ça.

I : Donc là tu es en train de dire que quand on pousse un objet, on décoche une flèche, ça avance, ça ralentit, ça ralentit.

V : Ça finit par arrêter.

I : Toi, tu dis le bloc, ça ralentit et en plus il y a la friction, donc ça va ralentir encore plus vite. Mais s'il n'y a pas de friction admettons, qu'est-ce qui arrive ?

V : S'il n'y a pas de friction, ça va arriver la même chose qu'à la flèche : au fur et à mesure, il va perdre un petit peu de vitesse puis après ça, il n'y en aura plus.

I : Donc tout objet, toi ce que tu dis, c'est que ça va finir par arrêter.

V : Oui.

[...]

[p. 26]

I : Si je clique sur démarrer, il n'y a plus de frottement, il n'y a plus rien, qu'est-ce qui va arriver ?

V : Comme il n'y a plus de frottement, ça ne perdra plus de vitesse et ça va rester à une vitesse constante.

I : Je vais essayer voir ce qui arrive...

[Il semble y avoir un bogue... et I tente de réparer le tout]

I : On a enlevé le frottement. Toi, tu dis que ça va avancer et arrêter comme tantôt.

V : Non. Moi je dis que ça va garder une vitesse constante, parce qu'il n'y aura plus de résistance. Elle va avancer, elle va avancer. Comme s'il n'y a pas de résistance, je pourrais donner une pichenotte à une chose, ça n'avancerait pas beaucoup, mais ça ferait le tour de la terre parce qu'il n'y aurait pas de résistance du tout. Donc ça va garder une vitesse constante.

Vitesse : 10

Masse : 0,10

<Démarrer>

[La flèche avance à vitesse constante et sort de l'écran]

V : Regarde : j'ai une vitesse de 5 m/sec.

I : Tantôt, quand j'ai appuyé sur démarrer, est-ce que tu as vu la vitesse ?

V : Oui.

I : Qu'est-ce qui est arrivé ?

V : Bien, la vitesse est de 10 et elle est allée à 5.

I : Je n'ai pas eu le temps de voir tantôt la vitesse.

V : Moi non plus.

I : Tu m'as dit à plusieurs reprises...

V : Comme n'importe quoi. [Rires]

I : C'est en plein ça : quand on lance la flèche, comme n'importe quoi, c'est le temps qui va faire que ça arrête. Je t'ai posé la question sur la boîte tantôt, je ne sais pas si tu te souviens. Tu m'as dit : la boîte, elle va arrêter et, en plus, le frottement va faire en sorte qu'elle va arrêter plus vite. Mais tu semblais dire que s'il n'y a pas de frottement, la boîte elle va arrêter quand même.

V : Bien, s'il n'y a pas de frottement oui, elle va arrêter à un moment donné à cause du temps. Ah, mais non ! Même ça, non ! On l'a essayé tantôt ! Le temps...

I : On ne l'a pas essayé avec la boîte.

[...]

[p. 30]

Entrevue 3

Résumé – Situation 3

I : Avant de passer à la suivante, j'aimerais ça que tu me rappelles ce que tu te souviens par rapport à ça.

V : Je me souviens que l'on avait fait des petites expériences...

I : Ah oui, oui ! C'était avec toi que j'avais fait ça.

V : Je me rappelle aussi que c'était bizarre, parce que moins on donnait de masse – comme ici je suis à 0,10 à la masse et 10 à la vitesse [et la flèche tombe entre les lignes verte et brune] – moins on donnait de masse... Plus on donnait de masse, plus ça allait loin [il place la vitesse au minimum et la masse au maximum et la flèche tombe entre les lignes brune et noire].

I : Tu as qualifié ça de bizarre hein ?

V : Oui, parce que quand on fait des avions, on essaie de prendre des matériaux légers pour que ça puisse mieux voler. D'habitude, quand c'est lourd ça tombe plus; donc c'est ça que je trouve vraiment bizarre.

[...]

I : Et s'il n'y a pas de gravité, qu'est-ce qui arrive ?

[p. 31]

V : Ça flotte.

I : Qu'est-ce qui arrive à la vitesse ?

V : Bien, ça continue à ralentir, mais s'il n'y a pas la résistance de l'air non plus, bien là, ça a une vitesse stable et ça reste droit.

I : Tu ne trouves pas ça bizarre que ça garde tout le temps, tout le temps, tout le temps, la même vitesse ?

V : Bien quand il n'y a pas de résistance d'air, c'est un peu normal là

I : Ok. Tu es peut-être mieux de t'asseoir plus droit, parce que tu vas avoir mal au dos.

Situation 4a)

[...]

I : Est-ce que tu peux me décrire ce que la balle va faire ? Qu'est-ce qui va arriver si on part la situation dans ce cas-là ?

V : Bien d'après moi, ce que ça va faire, c'est que ça va glisser sur le truc et que ça va rouler comme un *skate* sur une demi-lune, comme je disais tantôt. Bien on pourrait l'essayer.

I : Jusqu'où ça va monter ?

V : Bien, comme ça va prendre de la vitesse en descendant et que ça va en perdre en montant... D'après moi, ça va aller jusqu'à la barre orange.

I : Ça va arrêter à la barre orange ?

V : D'après moi, ça va faire la barre orange et ça va repartir puis après ça, ça va prendre la rouge, et après, ça va rester en bas.

[p. 32]

[...]

Position : Modification des paramètres horizontal et vertical pour faire positionner la balle sur la ligne orange.

<Démarrer>

[La balle va de l'autre côté de la rampe jusqu'à la ligne orange.]

V : C'est réussi.

I : Ok. Tantôt, tu m'as expliqué que ça allait ralentir, que ça allait monter moins haut.

V : Oui. Mais j'avais tort. En regardant ce que ça fait maintenant, j'avais tort.

[...]

[p. 33]

I : Place la boule bleue comme au début, c'est-à-dire à la ligne verte. Peut-être un petit peu plus à droite. Au tout début, tu as dit que ça irait continuer jusqu'à la ligne orange, mais tu t'es rendu compte que non, ça allait jusqu'à la ligne verte. Si on laisse fonctionner la situation longtemps, qu'est-ce qui va arriver ?

V : Bien, c'est sûr que ça va ralentir à force de monter. Parce que regarde...

[p. 34]

[...]

Position : Le plus haut niveau à l'extérieur de la rampe

<Démarrer>

[La balle part du plus haut niveau possible (à l'extérieur de la rampe) et va et vient entre les lignes vertes]

V : Ça continue. Elle l'a fait deux fois; là c'est la troisième; la quatrième; la cinquième; sixième; septième; huitième... Ah, je viens de comprendre un peu parce que quand je l'ai fait partir, elle a pris de la vitesse et elle a remonté et d'où c'est pris, elle a repris de la vitesse. Donc, en fait, je pense que ça peut vraiment fonctionner indéfiniment. Donc, pas vraiment de temps pour...

I : Tu as changé d'idée.

V : Oui.

[...]

[p. 35]

I : Ça va prendre combien de temps avant que ça s'arrête ?

V : Bien, je calcule là. Ça ne s'arrête pas.

I : Je suis allé remplir ma bouteille d'eau et ça n'a pas arrêté ! Est-ce que ça va arrêter ?

V : Je commence à penser que non. Je commence à penser que non.

[Et le temps passe]

I : Comment trouves-tu ça que ça n'arrête pas tout de suite ?

V : Je trouve ça vraiment spécial.

I : Si on était dans la réalité et qu'il y avait une rampe de *skate* ou n'importe quelle rampe...
 V : D'après moi, après 3 ou 4 coup comme ça, ça aurait arrêté.
 I : Donc là, il y a quelque chose de bizarre, c'est ça ?
 V : Oui. Tu n'aurais pas enlevé la résistance de l'air, toi-là ?
 I : Heu, je ne le sais pas. On peut regarder... Il n'y a pas de résistance de l'air.
 V : Ah! C'est pour ça que ça n'arrête pas ! [Rires]
 I : Tu penses que c'est pour ça que ça n'arrête pas ?
 V : Sûr.
 I : Sûr? C'est l'air qui fait toute la différence ?
 V : Sûr.
 I : Est-ce qu'on ajoute l'air pour voir, un coup parti ?
 V : Oui. On est tout en train de transformer ça.
 I : Résistance standard, mettons. On va voir ce que ça va donner. À toi l'honneur. Qu'est-ce qui va arriver selon toi ?

Position : La balle est sur la ligne rouge à gauche.

<Démarrer>

[La balle part d'un côté de la ligne rouge et arrête à mi-chemin, avant même de se rendre de l'autre côté complètement de la ligne rouge]

V : Elle est repartie et a arrêté.

I : Ok. Es-tu capable d'imaginer une situation dans la réalité où ça continuerait vraiment longtemps ?

V : Bien, dans la réalité oui. Tu la lancerais de l'ancienne hauteur du World Trade Center et là ça fonctionnerait.

I : Qu'est-ce que tu veux dire par fonctionnerait ? Qu'est-ce qui arriverait ?

V : Ça tomberait le plus longtemps possible, parce qu'en fait plus ça descend, plus ça peut prendre de la vitesse, donc plus il peut aller plus haut. Donc là il va encore pouvoir prendre beaucoup de vitesse.

I : Parfait. Peux-tu me résumer ce que tu retiens de cette situation là ?

[p. 36]

[...]

V : Plus ça prend de vitesse, plus ça peut continuer longtemps.

I : Dans la réalité, tu as dit que plus on part de très haut, plus ça va continuer très longtemps à osciller.

V : C'est ça, parce que plus on est haut plus, ça prend de la vitesse et plus ça peut continuer.

I : Si on enlève l'air. Si on prend un gros aspirateur...

V : En fait, l'aspirateur ça fonctionne avec la friction de l'air. Ce n'est pas de la friction, mais c'est de l'air qui est aspiré. Donc un aspirateur, c'est quasiment fait pour ça là.

I : Si admettons on met la rampe sous un dôme de verre tout bien fermé, tout isolé. Et on met l'aspirateur. L'aspirateur, ce qu'il fait c'est qu'il prend l'air à l'intérieur du dôme et la pousse à l'extérieur du dôme et on peut enlever l'air à partir de l'aspirateur. Admettons qu'il n'y a plus beaucoup d'air, juste un peu. Qu'est-ce qui va arriver ?

V : Bien, d'après moi, ça va continuer indéfiniment, il n'y aura pas de résistance. Ça dépend, dépendamment avec quoi tu le fais. Si tu le fais avec un ballon hyper lisse sur du prélat, ça risque d'aller assez bien, mais si tu le fais admettons avec une balle de tennis sur l'asphalte, ça risque de fonctionner un peu moins parce que le frottement sur l'asphalte...

I : C'est quoi le rapport avec l'air ?

V : Ça n'a pas de rapport avec l'air, mais ça dépend comment ta planche est faite.

I : Ok. Tu n'en as pas parlé avant.

V : Non.

I : Là, tu dis que ça dépend en quoi elle est faite.

V : Si c'est fait en petit plastique lisse, il va y avoir beaucoup moins de friction que si tu le mets avec de l'asphalte avec des bosses un peu partout. Ça risque d'être un peu différent. Pas beaucoup, mais...

I : C'est beau ?

V : Oui.

Situation 4b)

[...]

[p. 40]

I : Ça montait à la même hauteur. Si on laisse fonctionner longtemps, qu'est-ce qui arriverait ?

V : Ça restait au même endroit, parce que la résistance de l'air n'était pas là.

I : Oui, si on le laisse longtemps...

V : Ça va le faire indéfiniment.

I : Ok. Toujours à la même hauteur ou ça va descendre un petit peu ?

V : Bien, pas toujours à la même hauteur. Ça va peut-être descendre un peu.

I : Ça va finir par arrêter dans ce cas-là.

V : Oui, mais...

I : Est-ce que ça va arrêter ou pas, c'est ça la question.

V : C'est ça. Est-ce que tu voudrais essayer... genre tu serais là...

I : Toi, qu'est-ce que tu en penses ?

V : Je ne sais pas.

I : Est-ce que ça va...

V : Moi, je pense que ça pourrait vraiment, mais...

I : Pourrait vraiment quoi : continuer ou arrêter ?

V : Arrêter. Mais ça serait tellement long de le faire arrêter : il faudrait qu'on reste là pendant une journée à le regarder. Ça prendrait une caméra branchée là-dessus 24h sur 24.

I : C'est tout ?

V : Oui. On a avancé vite hein ?

I : Ceux-là se ressemblent, donc on passe moins de temps dessus c'est sûr.

Situation 4c)

[...]

I : Ok. Bien si admettons c'est comme la réalité : on a une demie rampe de *skate* et qu'on a le sol qui est plat.

[p. 41]

V : Bien, ça va arrêter, ça va continuer.

I : Ça va arrêter ou ça va continuer ?

V : Ça va continuer.

I : Tu as dit ça va arrêter, au début.

V : Oui, mais je voulais dire ça va continuer.

I : Continuer comment ?

V : Continuer de rouler.

I : Heu, quelle vitesse...

V : Mais dépendamment. Si tu le mets là [ligne rose], ça risque d'aller pas très très loin, mais si tu le mets ici [en haut de la ligne verte], ça risque d'aller pas mal plus loin.

I : Quand tu dis « pas très très loin », ça veut dire que ça va s'arrêter.

V : Non !

I : C'est tu ça que tu as dit.

V : Non !

I : Non ?

V : Non, non. Ce que je veux dire, c'est que je crois que tu as encore enlevé la résistance de l'air là-dessus parce que dans toutes les [situations] 4, il n'y avait pas de résistance de l'air. Donc, c'est sûr que ça va continuer, mais ça va aller avec une vitesse beaucoup plus moindre.

I : Mais jusqu'où ça va se rendre ?
 V : Ça va sortir de l'écran parce qu'il n'y a pas de résistance.
 I : Et si on avait deux mille écrans et si on pouvait suivre le parcours...
 V : Bien ça continuerait dans l'éternité à une vitesse très minime.

[...]

[p. 43]

I : Là, tu dis que tu vas atteindre l'objectif de l'arrêter en dessous de la vitesse.
 V : J'espère.
 I : Exactement en dessous ? Ou à coté ?
 V : Bien, peut-être un petit peu à coté.
 I : Mais ça va arrêter, c'est ça que tu dis ?
 V : Oui pas mal.
 I : Ça va arrêter.

Position : la balle est positionnée sur la ligne rose, un tout petit peu dans la pente
 <Démarrer>
 [La balle part et sors de l'écran]

V : Ah, bien coudonc ! Ah, c'est toujours une vitesse moindre, mais ça continue.
 I : Dans la réalité, est-ce que ça se peut cette affaire là ?
 V : Non, parce que tu as encore enlevé la résistance de l'air, donc...
 I : Oui ok.
 V : C'est ça.
 I : Mais si, admettons...
 V : Encore l'affaire du globe...
 I : Oui, ou il n'y a juste pas de frottement d'air...
 V : Bien, comme je te dis, ça dépend aussi si c'est sur une surface plane ou une surface à bosse.
 I : Parfait. C'est une surface très plane.
 V : Ok.
 I : Plane, plane.
 V : Tu mets des piques sur la boule.
 I : La boule est lisse, lisse. Tout est parfait : il y a pas vraiment de... Comment tu as dit tantôt ?
 V : Friction.
 I : Friction. Il n'y en a pas.
 V : [Inaudible]

[Message d'erreur de l'ordinateur]

I : Qu'est-ce qu'on disait là ?
 V : On parlait dans la réalité...
 I : Si on enlève l'air de frottement par terre...
 V : D'après moi, ça ferait ça : ça continuerait indéfiniment.
 I : Si admettons je prends... Il n'y a pas d'air, il n'y a pas de frottement. Au lieu de prendre une petite boule, je prends une grosse boule massive. Quelque chose de lisse par exemple, pour pas qu'il y ait de frottement.
 V : Toujours sans friction, mais plus gros...
 I : Oui. Je la place sur la rampe et je la lâche.

[p. 44]

V : Ça dépend. Parce que si tu la mets très très haute, bien la boule – vu qu'elle est plus grosse – elle va prendre plus de vitesse parce qu'elle est plus lourde. Toujours comme n'importe quoi. Donc c'est ça. Donc, d'après moi, ce que ça va faire, ça va aller beaucoup plus vite, dépendamment d'où tu la

mets. Parce que si tu la mets genre ici [en bas], d'après moi, ça va aller beaucoup moins lentement parce que comme c'est plus gros, ça va être plus gravitationnel. Donc ça va pouvoir prendre beaucoup moins de vitesse. Mais si tu le mets de plus haut, ça va pouvoir profiter de son poids pour prendre beaucoup plus de vitesse. Et si tu mets plus bas, ça dépend.

I : Donc si j'ai bien compris, quand c'est plus lourd, ça va aller plus vite.

V : Dépendamment, parce que la petite en haut va prendre une vitesse très grande; la petite en bas va prendre quand même de la vitesse. La grosse en haut va profiter de son poids pour aller vers la gravité et aller beaucoup plus vite que la petite d'où elle était, mais comme elle est déjà pas mal plus bas [?] elle va moins bouger que la petite. Donc la grosse a un avantage en haut et un désavantage en bas et la petite a un avantage en bas et un désavantage en haut.

I : Ok. C'est clair. Donc, quand tu es en bas la grosse va aller moins vite que la petite...

V : Je pense. C'est mon hypothèse.

I : Est-ce que la grosse arrête ? Est-ce que la petite arrête ? Est-ce qu'elle continue ?

V : La grosse va aller sûrement hyper lentement, mais va sûrement quand même continuer car comme il n'y a aucune résistance, bien ça va continuer toujours.

[...]

[p. 46]

[...]

Entrevue 4

I : C'est la quatrième fois que nous nous rencontrons. Tu m'as fait remarqué tantôt que nous sommes à la situation 5. Juste avant, peux-tu me rappeler, question de se remettre dedans, ce qui arrivait à la balle dans la situation 4c.

V : C'était vraiment spécial, parce qu'elle partait, prenait de la vitesse et, ensuite, on ne la voyait.

I : Tu as dit que la balle sortait de l'écran et continuait.

V : Et elle ne revenait plus.

I : Était-on capable d'imaginer ce qui allait arriver à la balle après.

V : Puisque nous avons enlevé la résistance et tout... C'était déjà comme cela. Si on avait mis de la résistance, la balle aurait pris de la vitesse et arrêterait à un moment donné.

I : Sans résistance ?

V : La balle aurait continué à la même vitesse.

[p. 47]

I : C'est quoi au juste la résistance ?

V : Il y a deux sortes de résistances. Quand tu glisses, il y a la friction. Et il y a la résistance de l'air. La résistance de l'air, c'est... Lorsqu'on pousse une balle, c'est sûr qu'elle va arrêter à un moment donné à cause de la friction. À cause de la friction... Comment je pourrais bien t'expliquer cela ? Ça va la faire ralentir, frotter un peu par terre. Et la résistance de l'air, c'est comme quand tu joues au football et que tu es un joueur de ligne, quand tu pousses l'autre joueur... S'il n'y a aucun joueur devant toi, tu partirais à courir et il n'y aurait rien devant toi. S'il y a les autres joueurs, c'est comme si c'était la résistance. Il faut que tu donnes plus de force pour les pousser. C'est comme l'air. Ça avance et ça avance et ça fait boum, boum, boum, boum. C'est comme si c'était des murs de styromousse et que ça faisait paf, paf, paf, paf, paf, paf. À forcer de tout briser les murs de styromousse, la balle prend de la vitesse.

[...]

Situation 5

[...]

[p. 51]

I : Ok. Si... En faisant varier ce que tu veux, j'aimerais ça que la balle tombe entre la ligne noire et la ligne orange. Comme je te disais tantôt, la balle ne pourra pas toucher au mât brun, hein. Alors fais semblant que c'est invisible.

V : Ok. Je vais mettre le coup sur la balle à 0 et la vitesse du bateau à 1.

I : Explique-moi ce que tu fais. Pourquoi tu as augmenté la vitesse à 1 ?

V : Pour que ça aille un peu plus vite, pour que je puisse lâcher la balle, parce que quand je vais la lâcher, bien là, le temps que ça avance, d'après moi ça va aller là-dedans [lignes noire et orange].

I : Donc là, ce que tu dis...

V : Moi, je pense que ça va avancer là, la balle va avancer avec le mât évidemment et là, quand je vais appuyer sur démarrer et que ça va lâcher, là ça va continuer à avancer et que la balle va continuer à être dans les airs, bien là, ça va être rendu ici et là, ça va tomber dedans.

I : Juste être sur que j'ai bien compris ce que tu m'as dit. Tu me le dis si je me trompe. Le bateau avance, le bateau avance. On lâche la balle. Le bateau avance et pendant ce temps-là, la balle tombe en ligne droite, indépendamment du bateau qui continue à avancer.

V : Oui. Mais pourquoi ça n'avance pas ? Tu as dit que lorsqu'on appuie sur démarrer...

I : Non, mais regarde c'est ça l'affaire. C'est comme une faiblesse de la situation. Il faudrait avant même qu'on appuie sur lâcher la balle que le bateau soit en mouvement.

V : Faudrait qu'il y ait un démarrer et un lâcher la balle.

I : C'est en plein ça, mais il n'y en a pas. Donc toi, dans ta tête, il faut que tu t'imagines que le bateau se déplace à 1 m/sec et qu'il est en mouvement avant que tu appuies sur démarrer et après, et que dans le fond, lorsque tu appuies sur démarrer, ça veut dire qu'on lâche la balle.

Vitesse du bateau : 1

Coup sur la balle : 0

<Démarrer>

[La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Ah ! Quasiment. Je vais réinitialiser et je vais mettre cette fois-ci la vitesse du bateau à 1,50.

Vitesse du bateau : 1,50

Coup sur la balle : 0

<Démarrer>

[La balle tombe entre les lignes orange et grise]

[p. 52]

V : Ah ! Quasiment encore une fois. Maintenant la vitesse du bateau à 2,50.

Vitesse du bateau : 2,50

Coup sur la balle : 0

<Démarrer>

[La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Même pas. C'est vraiment spécial. À 3,50 ?

Vitesse du bateau : 3,50

Coup sur la balle : 0

<Démarrer>

[La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Même pas. Tabarn... À 4,50 ?

Vitesse du bateau : 4,50
 Coup sur la balle : 0
 <Démarrer>
 [La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Même pas. Bien 5, 6 tiens.

Vitesse du bateau : 6
 Coup sur la balle : 0
 <Démarrer>
 [La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Hey ! C'est vraiment spécial tiens. Quand je démarre, la balle avance comme ça... Tu as vu ? C'est spécial. Pourtant j'ai mis 0 sur la balle. Peut-être que si je mettais à 7,50 la vitesse.

Vitesse du bateau : 7,50
 Coup sur la balle : 0
 <Démarrer>
 [La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Quasiment. Bon je vais mettre à 10 là.

Vitesse du bateau : 10
 Coup sur la balle : 0
 <Démarrer>
 [La balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : C'est impossible... C'est vrai, tu l'as dit toi-même : ça ne peut pas toucher ici.
 I : Ce que j'ai dit, c'est que ça ne peut pas frapper le poteau.

[p. 53]

V : Ah. Bien, c'est impossible, parce que j'ai mis à 10 et ça va avant, ça s'en va entre le orange et gris. Donc à 10 c'est impossible parce que c'est le plus vite. Et le coup sur la balle, tu as dit que c'est vers la droite et moi je veux l'envoyer vers la gauche. Donc... impossible.

I : Toi, au départ, tu avais dit que le bateau allait avancer et que la balle allait tomber en ligne droite.

V : Oui, je trouve ça vraiment spécial. Je ne comprends pas parce que normalement quand tu lâches une balle... Admettons que le bateau est de même, la balle ne va pas suivre le bateau comme ça. Normalement, elle va faire comme ça et dépendamment du bateau parce qu'elle, elle veut juste tomber. C'est pour ça que je ne comprends pas.

I : Si... Je vois que tu regardes dans mon cahier, parce qu'il y a d'autres personnes et je prends des petites notes après coup. Ça, c'est des questions pour la situation 5 que je veux absolument poser.

V : En fait c'est pas vraiment ça que je regardais, mais c'est pas grave.

I : Pour toi, je n'ai pas écrit grand-chose, mais quand tu vas partir, je vais écrire quelques mots clés pour que je me souviene comment ça c'est passé, pour que je me souviene : ça m'aide pour l'autre entrevue. Donc toi, tu disais que c'était impossible. Tu m'avais expliqué que toi, ça devrait faire telle chose. Tu m'avais expliqué la balle. Comment tu expliques la différence entre tu dis que ça devrait faire ça, mais que c'est pas ça qui arrive ?

V : Bien, c'est ça, je trouve ça vraiment spécial. Il devrait y avoir un bouton, une affaire que tu as fait pour que la balle suive dans la situation, pour que la balle suive un peu le bateau.

I : Qu'est-ce que je devrais avoir fait ?

V : Bien je ne le sais pas.

[...]

[p. 54]

I : Si on sort de la situation un peu... Il me semble que quand on a fait ça, tu sortais toutes sortes de trucs. Admettons qu'on est sur un bateau. N'importe quoi en fait. On est sur quelque chose qui se déplace: un bateau, un train, un avion, ce que tu voudras, et on lance...

V : Un jet privé.

I : Ah oui ça serait bien, un jet privé. On lance une balle à la verticale dans les airs comme ça. Qu'est-ce qui va arriver à cette balle-là ? Sers toi de la souris pour pointer ce qui va arriver à cette balle-là.

V : Il faudrait quasiment que j'aie deux souris là. Attends, je vais te le faire comme ça à toi et après avec la souris. Admettons que ça, c'est le jet et que c'est toi et que tu *pitche* la balle.

I : Regarde ce qu'on pourrait faire...

[p. 55]

V : Non attends. Je viens de comprendre, je viens de comprendre. Je viens de penser à quelque chose... Vu que l'avion a de la vitesse... Quand tu la lâches, ta main est comme ça, lui donne un petit peu de vitesse et donc ça va aller croche.

I : Croche ?

V : Donc admettons, regarde, n'importe quoi, une petite affaire là...

I : Regarde : tu peux écrire si tu veux.

V : Une petite affaire. Regarde : si je fais ça, ça va avancer un peu.

I : Ok. Là tu te mets à marcher et pendant que tu marches tu lances un objet vers les airs – pour que je m'en souviene, c'est pour ça que je le dis – ok.

V : Et là ça continue avec ma direction que je vais. Tu as vu ? Je le lance complètement droit, là, et ça continue à avancer. Parce qu'il y a tellement de vitesse que lorsque je fais ça, il doit y avoir un principe qui fait que ça continue, mais je ne sais pas c'est quoi.

[...]

[p. 56]

I : Est-ce que c'est normal pour toi que la balle se comporte comme ça ?

V : Bien là, à ce que je pense... Je viens d'y penser au truc-là. Quand on l'a lancé... C'est... Il y a un bout de normal et il y a un bout d'anormal aussi. C'est sûr que si tu le laisses tomber, c'est sûr que ça n'ira pas à la même vitesse du bateau. Ici, c'est notre bout, ça va faire comme ça, mais ça ne va pas faire... Si le bateau va comme ça, ça va faire ça, mais ça ne fera pas ça, admettons.

I : Ça ne suit pas parfaitement le bateau, mais ça le suit un peu.

V : C'est ça, un peu. Comme ici, c'est en dessous du orange et du gris. Là, on l'avait mis à la plus haute vitesse. Là je fais démarrer.

Vitesse: 10

Coup sur la balle: 0

<Démarrer>

[Le bateau part et la balle ne fait rien...]

I : Il n'y a pas de gravité : il faudrait que tu remettes la gravité.

[Vincent remet la gravité]

Vitesse: 1

Coup sur la balle: 0

<Démarrer>

[Le bateau part comme tantôt et la balle tombe entre les lignes orange et grise]

V : Là, si je fais démarrer... Regarde : ça tombe exactement dans le même... Ça veut dire que ça reste au même endroit.

I : Oui.

V : C'est ça que je trouve spécial.

I : Toi, tu penses que ça devrait suivre à peu près, mais pas parfaitement.

[p. 57]

V : Comme mettons ça devrait tomber au minimum entre le noir et le brun là.

I : Dis-moi si je me trompe, parce que je veux être sûr que je te comprends bien. Euh, donc là, quand on lance un objet ou qu'on le laisse tomber à partir d'un bateau en mouvement ou peut importe quoi, un train ou quelqu'un qui marche comme un malade dans une salle de classe...

V : [Rires]

I : Ok. Quand on lâche cet objet-là, en partie il suit le mouvement du bateau et en partie il ne le suit pas. Donc toi, tu penses que la balle qui tombe devrait aller vers la gauche quand même.

V : Oui. Non. Elle devrait aller vers la droite, mais c'est juste que comme le bateau va... Parce que là c'est à 10, c'est comme si ça suivait toujours ça... Là, c'est comme si ça suivait toujours l'orange et le gris : normalement ça devrait faire comme ça. Mais si le bateau a de la vitesse... Mettons qu'on le lâche comme ça... Là, c'est le bout. Ça c'est environ l'endroit entre le orange et le gris, bien là, ça devrait faire comme ça : ça devrait aller un peu vers l'arrière parce que le bateau va aller comme on pourrait dire plus vite que la balle et la balle va tomber un petit plus en arrière. C'est pas qu'elle va vers la gauche : elle va vers la droite, mais comme le bateau s'avance, donc elle va à gauche de l'endroit d'où elle est partie, mais elle va quand même à droite. C'est spécial, hein ?

I : C'est bien, parce que j'ai fini par bien comprendre ce que tu veux dire à force de répéter des fois, là. Vu que c'est comme des choses que tu vois dans ta tête, moi il faut que j'arrive à les voir dans la mienne. C'est pour ça que je te demande plein de précisions.

[...]

[p. 58]

I : Et tu te souviens quand on enlevait la gravité : la balle suivait le bateau, hein ?

V : Oui.

I : Est-ce que tu te souviens de ça ? Est-ce que tu veux le refaire ?

V : Non, c'est beau : je m'en souviens.

I : Heu, tu me disais que toi... Tu me disais tantôt que la balle allait tomber un petit peu en arrière, parce que le bateau allait plus vite : c'est ça ?

V : Oui. Un peu plus vite. C'est comme mon exemple, mettons le bateau, ça lui prend une seconde pour faire 10 mètres, tandis que la balle, ça va lui prendre une seconde 25 centièmes ou une seconde 50 centièmes. Ce n'est pas gros comme différence, mais ça va faire que la balle va toujours être un petit peu en arrière.

I : Quand on enlevait la gravité, la balle se déplaçait à la même vitesse que le bateau.

V : Mais elle ne descendait pas non plus.

I : Elle ne descendait pas, mais elle se déplaçait à la même vitesse. Toi, tu vois ça comme deux situations différentes.

V : Oui.

I : Peux-tu m'expliquer c'est quoi la différence entre les deux cas ?

V : Bien la balle... Déjà la différence, c'est qu'elle tombe et que l'autre reste là.

I : Oui, ok c'est bon.

V : Donc ça, c'est une première différence. À part ça, c'est qu'elle reste toujours à la même vitesse que le bateau comme tu as dit. Tant qu'à ça, c'est quasiment la même chose pour elle. Si je fais 0.50 et que je fais démarrer...

Vitesse : 0,50

Coup de la balle : 0

<Démarrer>

[La balle tombe entre la ligne orange et la ligne grise]

V : Elle va avancer toujours à la même vitesse que le bateau, va descendre beaucoup plus vite, mais va aller toujours comme ça, à la même vitesse. Ah, mais c'est vrai ça, ça veut dire que ça fausse toutes mes données de tantôt...

I : Qu'est-ce que tu veux dire ?

V : J'ai dit ça machinalement, j'ai dit que si je la mets comme ça, elle va toujours à la même vitesse que le bateau en allant vers la droite, mais en descendant beaucoup plus vite. Donc là, ça vient tout fausser mes données de tantôt-là.

I : En quoi ça vient tout fausser ?

V : Parce que tantôt je disais que la balle prend de la vitesse en descendant, mais pour aller sur le côté c'est-à-dire que c'est quand même la même vitesse que le bateau : donc toutes mes données sont toutes par terre.

[...]

[p. 59]

I : Est-ce que tu te souviens que... Peut-être qu'il n'y avait pas de raison, mais sur quoi tu basais le fait que tu pensais qu'il y allait avoir ce décalage là ? Est-ce qu'il y avait une raison ou c'était juste une impression ?

V : Oui, c'est à cause que ç'a tout commencé au début quand je pensais que la balle allait descendre droite et que le bateau allait faire comme ça [avancer], mais qu'en fait ç'a suivi et on est tous partie là-dessus.

I : Répète ça. Pourquoi ? Je ne suis pas sûr d'avoir compris.

V : C'est qu'au départ, j'avais dit que le bateau va avancer et que la balle va tomber toujours au même endroit. Et là, quand on a essayé, elle allait toujours à la même vitesse que le bateau et donc, on est parti à parler à propos de ça et là on est rendu là, puis on ne se souvient même plus pourquoi on a commencé.

I : Au début tu pensais que ça allait aller par en arrière et donc cette idée là t'es restée.

V : Non. Je pensais que ça allait aller... allait juste descendre droit.

I : Par en arrière je veux dire, par rapport au bateau.

V : Oui c'est ça.

I : Ok, ça t'est resté et tu essayais de garder ça.

V : C'est ça.

[...]

[p. 62]

V : Non, je ne vois pas... Mais c'est encore la même chose : parce que j'ai beau mettre la vitesse du bateau à 5,50...

Vitesse du bateau : 5,50

Coup sur la balle : 7,50

<Démarrer>

[La balle semble tomber en avant du bateau, mais les deux sortent de l'écran avant que ça se produise.]

V : Ça ne l'aura jamais, parce que on l'a vu tantôt la balle suit... Donc si je donne le coup, ça va toujours aller à la même place, mais plus loin, dépendamment d'où est rendu le bateau quand il va. Donc dans le fond c'est impossible.

I : Donc peu importe la vitesse du bateau, ça ne change rien.

V : Il faudrait que je change le coup sur la balle.

I : Admettons que l'on peut mettre la vitesse du bateau à 100 m/sec, est-ce que ça changerait quelque chose ?

V : Non : la balle irait à 100 m/sec par là, plus à 7,50 pour le coup sur la balle.

I : S'il y avait du vent; s'il y avait du frottement de l'air ?

V : Ça irait sûrement moins loin. On va essayer.

I : Non. Admettons le coup sur la balle à 7,50, mais cette fois il y a du frottement d'air. Est-ce que la vitesse du bateau va te permettre à ce moment-là d'amener la balle sur le bateau ?

V : Non. C'est sûrement que si je mets à 7,50 ça va frapper le mur de styromousse. Comme je le disais au début avec mon image : ça va perdre de la vitesse et ça va [inaudible] sur le bateau

[...]

[p. 64]

I : Comment tu expliques le fait que la balle dévie par en arrière, par la gauche ?

V : Ce n'est pas qu'elle dévie, mais c'est par rapport au bateau. Avant, quand il n'y avait pas de résistance, le bateau continuait toujours, mais là, le bateau arrête un peu, arrête à un certain moment. Donc la résistance est telle que ça le bloque et ça fait la même chose pour la balle. La balle suivait un peu le bateau, mais là, comme elle se fait bloquer, là elle descend droit, ce qui fait qu'elle va un peu vers la gauche par rapport au bateau.

[p. 65]

I : Ok, la résistance de l'air, pourquoi est-ce qu'elle va freiner davantage la balle que le bateau, ou l'inverse ?

V : D'après moi, elle va plus freiner le bateau parce que le bateau est beaucoup plus gros et la balle est plus petite. Si je lance une petite roche de toutes mes forces, en espérant qu'elle reste dans ma main, je pense qu'elle va aller beaucoup plus loin que si je lance – mettons que ça a le même poids : une petite roche assez lourde que je lance et une autre beaucoup plus grosse roche avec même densité, même lourdeur, même poids comme on pourrait dire – je la lance [petite roche] je pense que la plus petite va aller plus loin vu que la résistance de l'air... Plus c'est gros, plus il va y avoir de résistance parce que... Il me semble que j'avais imaginé la résistance de l'air comme des murs de styrofoam, tu t'en souviens ? C'est-à-dire que quand la grosse va arriver, ça va freiner plus, parce que ça va être beaucoup plus gros ce qui va bloquer, tandis que la petite, sa grosseur, ça va être plus petit.

[...]

[p. 66]

[...]

Retour sur la situation 1

[...]

I : Je t'avais posé la question aussi : est-ce que c'est normal que le bloc s'arrête ?

V : Bien oui, à cause du frottement.

I : À cause du frottement. Duquel tu parles ?

V : Celui de l'air et de la friction.

I : Est-ce que tu es capable de faire aller le bloc indéfiniment ?

[p. 67]

V : Avec la force.

I : Avec la force. Ok, sans toucher à la force, avec une force de 0.

V : Le plus loin que je peux faire, c'est de mettre la vitesse à 50, la masse à 3... Mais sans toucher à la force...

I : Qu'est-ce qui va arriver si tu enlèves le frottement ?

V : Si tu enlèves la friction et tout ?

I : Oui.

V : Bien, ça va continuer indéfiniment.

I : Si je comprends bien – dis-moi si je me trompe – la seule chose qui te surprends là-dedans, ce n'est pas que le bloc arrête, ce n'est pas qu'il pourrait continuer s'il n'y a pas de frottement : ce qui te surprend, c'est le fait que lorsqu'on donne une certaine vitesse au bloc, une certaine vitesse de départ, que le fait que sa masse soit plus haute il continue plus longtemps. Ça, ça te surprend. Peux-tu me parler de ça ?

V : Bien, parce que genre quand on faisait ça... Disons que je prends une enclume et que je lui donne une vitesse de départ, ça ne risque pas d'aller très loin. Mais si je prends une enclume de la grosseur d'une boîte de chaussure et que je lui donne une vitesse de départ, ça n'ira pas loin merci. Tandis que si je prends une vraie boîte de chaussure et que je la pousse, ça va aller beaucoup plus loin. Tu comprends, c'est beaucoup plus léger. C'est ça que je ne comprends pas.

[...]

[p. 69]

I : Quand on lance deux objets, qu'est-ce qui arrive finalement ? Est-ce qu'il tombent en même temps comme on vient de voir, ou est-ce qu'ils tombent le plus lourd avant ?

V : Sans résistance de l'air ?

I : Comme tu veux.

V : Avec, c'est le plus lourd. Sans, c'est égal. Mais dépendamment du plus gros. Parce que si admettons je lâche la boule de métal et la balle de tennis, bien c'est sûr que la balle de métal va arriver avant. Si je lâche un ballon de plage rempli d'air et une balle de tennis, c'est sûr que la balle de tennis va arriver avant. Si je lâche deux balles de tennis, elles vont arriver en même temps si je les lance vraiment égal. Le ballon de plage, la même affaire; les balles de métal, la même affaire. Mais sans résistance de l'air, disons une boule de papier chiffonnée et une balle de tennis de la même taille – c'est sûr que la balle de tennis est beaucoup plus lourde – et une balle de métal, si tu les lances les 3 en même temps, elles vont arriver au même moment.

I : S'il n'y a pas d'air.

V : S'il n'y a pas d'air...

I : S'il n'y a pas d'air.

V : Mais qu'il y a de la gravité.

I : Au début quand tu as décrit la situation 2, tu as dit que la boule bleue, qui était beaucoup plus lourde, allait tomber toute seule en premier. Tu n'as pas parlé du frottement de l'air. Au début, tu n'en as pas fait allusion. Est-ce que tu croyais que le plus lourd allait tomber plus rapidement avec ou sans frottement d'air ?

V : Non. Bien je n'y avais pas vraiment pensé. Peut-être que si j'y avais pensé, j'aurais fait des déductions...

I : Ok, c'est beau excellent. Situation 3.

Retour sur la situation 3

[...]

[p. 70]

I : Qu'est-ce qui arrive... C'est quoi le rôle de la masse dans le mouvement de la flèche ?

V : Si je me rappelle bien : il me semble que là aussi, plus la masse était petite, moins ça allait loin il me semble. Si je mets la vitesse genre à 20 et la masse à 0,10...

Vitesse : 20

Masse : 0,10

<Démarrer>

[La flèche tombe entre les poteaux vert et brun]

V : Ça va entre le vert et le brun. Tandis que si je mets à 3 la masse et hop !

Vitesse : 20

Masse : 3

<Démarrer>

[La flèche tombe entre les poteaux noir et orange]

V : Soudainement ça va entre le noir et el orange. Un peu comme la situation 1.

I : Un peu comme la situation 1, hein, où ça se rendait plus loin [inaudible].

V : Je ne comprends pas encore la relation.

I : On peut essayer de réfléchir à ça si tu veux.

V : Oui.

I : Là, tu as fait des tests et tu te rends compte que plus la masse est haute et plus ça va loin. Es-tu capable d'imaginer... Imagine en termes concrets que c'est quelqu'un qui décoche la flèche. La vitesse, il faut que tu te souviennes que c'est la vitesse de départ de la flèche. Après ça, elle va ralentir s'il y a du frottement, mais va toujours rester à 20 s'il n'y a pas de frottement. Essaie d'imaginer la différence entre projeter une flèche très, très légère vs une flèche plus lourde – parce que c'est ça qu'on fait dans la situation.

V : Hey, c'est vrai ça. L'arc a une force. Si c'est moins lourd, l'air va pouvoir mieux pousser. Si c'est plus lourd, elle va avoir plus de difficulté à pousser la flèche. Même quand c'est la même la vitesse de départ, il va être plus facile de pousser la flèche légère que de pousser la flèche lourde. Alors il y a des avantages et des désavantages. Moi je pense à ça : quand on y pense c'est logique.

I : Tu as parlé de force de l'air. J'aimerais ça que tu me dises ce que tu veux dire.

V : Bien tu connais le football ? Tu as une ligne offensive et une ligne défensive. Bien si le gars de la ligne défensive est plus petit – il pèse deux livres admettons – le joueur de la ligne offensive va pouvoir le pousser sans problème. Tandis que si le joueur de la ligne offensive a un gros tas de 3000 livres devant lui, il va avoir pas mal plus de difficulté mettons. Bien c'est comme si la ligne offensive était l'air et que la ligne défensive était l'objet.

[p. 71]

I : Quand l'objet est en mouvement – que ça soit une balle, une auto, n'importe quoi – lequel objet est le plus facile ou difficile à arrêter : est-ce que c'est un objet léger ou lourd ?

V : Léger, toujours avec la même conclusion.

I : Qu'est-ce qu'il a l'objet plus léger ?

V L'air va avoir plus de facilité à le pousser parce qu'il est plus léger, alors que le lourd... C'est comme si tu te mettais devant moi et que j'essayais de te pousser – moi, c'est comme si j'étais la résistance de l'air et toi tu es l'objet – j'aurais de la difficulté quand même. Mais si toi, tu me pousses – toi, tu es la résistance de l'air et moi, l'objet – tu vas avoir plus de facilité que si c'était moi. Parce qu'avec de l'air... Tu connais l'affaire avec les balles de ping pong et tu mets avec le séchoir et ils restent en l'air ? C'est parce que l'air a assez de force pour le soulever, mais si c'est admettons une balle... Tu sais les espèces de... Il y a un cochon...

I : Ah : pétanque !

V : Si c'est une balle de pétanque, ça va être plus difficile parce que c'est plus lourd.

I : Comment l'air fait pour pousser sur l'objet ou la flèche en mouvement ?

V : En fait ce n'est pas vraiment qu'elle pousse... Bon je suis dans le football pas mal...

I : Non. Vas-y.

V : La ligne offensive – admettons que c'est un jeu de passe – ils ne vont pas avancer pour laisser passer le coureur : ils vont rester là, ils ne vont pas bouger, ils vont attendre le gars et ils vont le bloquer. C'est un peu comme l'air. L'air, elle va rester là. Elle va être prête à bloquer et quand ça va arriver, ça va faire « quick » et si elle arrive à passer, là il va y avoir une autre – c'est comme plein de petites couches – et là ça va faire « quick », mais ça va passer peut-être. Il va y en avoir des milliers d'autres qui vont essayer de le bloquer. Et à un moment donné, la flèche, l'objet en question n'aura plus de force et au bout peut-être d'une petite couche, ou de miles, elle va arrêter à un moment donné si on donne juste une poussée de départ. Évidemment, si c'est une force continue – comme dans la situation 1 – quand tu es dans une auto et que tu appuies sur l'accélérateur, ce n'est pas comme si tu descendais une côte et que tu te laissais aller : c'est sûr que tu arrêterais. Mais là, tu continues et le

moteur te fournit une force continue et donc tu n'arrêtes pas, sauf quand tu freines, ah, ah. Alors, c'est un peu ça.

I : Donc, est-ce que tu trouves encore surprenant que lorsqu'on augmente la masse, la flèche se rende plus loin ?

V : Là, je comprends oui que ça fonctionne mieux.

I : Ok Veux-tu essayer autre chose dans cette situation ?

V : C'est beau.

I : C'est beau ? Passe à la 4a).

Retour sur la situation 4a)

V : Oups, j'ai fait 4b). On fera 4a) après.

I : Bien, regarde, oui. C'est ça, on peut faire les deux en même temps. Fais juste me rappeler ce que c'était 4a).

V : Bien 4a), ça ressemblait beaucoup à 4b), sauf que les deux côtés étaient égaux tandis que 4b), un côté est beaucoup plus à pic que l'autre.

I : Pour 4a), qu'est-ce qui arrivait au mouvement de la balle ?

V : Au mouvement de la balle. Bien, la plupart du temps, c'était continu. Parce qu'on se rappelle de ça : au départ, j'avais dit que quand ça va descendre, ça va perdre de la vitesse pour monter et que ça va perdre de la hauteur. Mais après conclusion, on en avait déduit que comme

[...]

[p. 73]

[...]

Retour sur la situation 4c)

[...]

I : Je t'avais posé la question : est-ce que c'est possible d'arrêter la balle en dessous de l'indicateur de vitesse ?

V : On avait essayé si je me... Attends une minute. Il me semble qu'on avait vu qu'il n'y avait pas de résistance de l'air là-dedans non plus, ni friction j'en suis sûr. Donc, ça serait impossible parce que... regarde. Mettons que je vais changer ça, je vais tout changer ça. 0,10 ici [position verticale] et 6,00 en position horizontale, ok. Là si je le démarre, il n'y a aucun élan du tout. Donc, il va rester là, mais il n'est pas en dessous de l'indicateur de vitesse. Là, si je le bouge et que je mets ça à 5,00 [position horizontale] et je vais le monter un peu pour qu'il soit dans la pente – là, c'est à 0,20 ici [position verticale] – et que je le démarre, il y a eu un peu d'élan, mais la vitesse reste quand même constante. Donc, c'est impossible.

I : Est-ce que c'est normal pour toi que la vitesse reste constante ?

V : Oui, parce qu'il y a ni... Regarde : si je vais dans « Edit - Mode – World - Air Resistance », il n'y a rien... Es-tu d'accord avec moi ?

I : Parfait.

V : Là, si je [inaudible] « Property », il n'y a toujours aucune friction. Donc, c'est bien normal, parce que c'est comme s'il était dans le vide, avec le fait qu'il y a de la gravité, et que ça va rester au sol. À part ça, il n'y a aucune différence. Même si je prends le sol [« Property »], il y a de la friction au sol, mais la balle, elle, n'en a pas.

[...]

[p. 74]

[...]

Retour sur la situation 5

[...]

[p. 75]

I : Est-ce que tu as appris quelque chose au cours des situations ?

V : Bien oui. Ce que j'ai appris, c'est Interactive Physics : c'est des principes physiques – c'est la gravité, la résistance de l'air, la friction – c'est des principes de physique. Donc c'est sûr que j'ai appris... La gravité, je connaissais déjà ça, mais je l'ai poussée en faisant ça. La résistance de l'air : j'avais pas vraiment pensé que l'air nous bloquait, à part quand il y avait du vent, mais pas de là à penser que c'était un principe physique. Donc j'ai appris ça. Et c'est pas mal ça.

I : Qu'est-ce que ça change au niveau des objets, le fait que l'air bloque ?

V : Bien c'est sûr que ça les ralentit et que ça leur fait perdre plus de force plus rapidement.

I : Donc selon toi, quand on lance une balle, s'il n'y a pas de frottement, qu'est-ce qui arrive avec cette balle-là, s'il n'y a pas de résistance de l'air ?

V : Est-ce qu'il y a de la gravité ?

I : Admettons s'il y en a et s'il n'y en a pas.

V : Sans résistance de l'air, sans friction et avec gravité : on va commencer avec ça. Donc je vais lancer ma balle et elle va redescendre et elle va rouler indéfiniment parce qu'il n'y aura aucune...

I : Aucun frottement, mais il va y avoir de la gravité. Ok, c'est ça...

V : Donc ça va rester au sol, et il va n'y avoir aucun frottement.

I : Et là, ça va rouler et ça va continuer ?

V : Dépendamment, si c'est une surface plane, plane, plane, plane, plane – ce qui n'est pas le cas de la terre – bien ça va sûrement continuer indéfiniment. Mais là, vu qu'il y a des bosses et des cratères et des affaires comme ça : c'est sûr que ça va arrêter à un moment donné.

I : Ok. Et là, s'il n'y a pas de gravité.

V : Je vais le *pitcher* et ça va revoler et là ça va se péter contre un arbre.

I : Et si il n'y a pas d'arbre ?

V : Mettons que c'est désert et que je vais la *pitcher*... si la planète est petite, ça va nous revoler dans le dos.

[...]

