

Université de Montréal

**Regard épistémique
sur une évolution conceptuelle
en physique au secondaire**

par
Patrice Potvin

Département de didactique
Faculté des sciences de l'éducation

Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en sciences de l'éducation
option didactique

mars 2002

© Patrice Potvin, 2002



LB
5
U57
2002
v. 023

Faculté des sciences de l'éducation
Département de psychologie

Faculté des sciences de l'éducation
Département de psychologie

Centre de recherche en éducation, formation et apprentissage
1105, avenue de l'Université, Québec, Québec G1S 4A1



104 500 0000 0000

Identification du jury

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

**Regard épistémique sur une évolution
conceptuelle en physique au secondaire**

présentée par
Patrice Potvin

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Vazquez-Abad, Jesus	Président-rapporteur
Thouin, Marcel	Directeur de recherche
Legendre, Marie-Françoise	Membre du jury
Legendre, Renald Dép. de l'éducation, UQAM	Examineur externe
Vazquez-Abad, Jesus, président du jury, représente le doyen de la FÉS à la soutenance	Représentant du doyen de la FÉS

Thèse acceptée le 9 octobre 2002

RÉSUMÉ (français)

La thèse, qui s'inscrit dans la continuité des travaux de Legendre (1993), porte sur la compréhension qualitative de notions de physique-mécanique au secondaire. Elle tente d'identifier et de caractériser, dans les discours de sujets de 12 à 16 ans, les tendances qui guident leurs itinéraires cognitifs à travers l'exploration de situations-problèmes. Les hypothèses de travail portent sur les initiatives de modélisation, sur les conceptions et sur les p-prim. Ces derniers objets sont perçus, dans la perspective épistémologique de DiSessa, comme les habitudes qui agissent sur l'établissement de liens entre les paramètres d'un problème. En d'autres termes, ils les coordonnent logiquement et mathématiquement.

La méthodologie repose sur l'entretien d'explicitation. Ce type d'entretien permet d'obtenir des verbalisations qui sollicitent un « sens intuitif » de la mécanique. Une vingtaine de sujets sont donc invités à partager leurs évocations alors qu'ils explorent la logique physico-mathématique d'un micromonde informatisé. Ce micromonde a été programmé sur le logiciel « Interactive Physics^{MD} » et se compose de cinq situations qui font intervenir les notions de vitesse, de temps, d'accélération, de masse, de force et d'inertie. Ces situations sont présentées aux sujets en ordre croissant de complexité. Une analyse plus approfondie des verbalisations de cinq sujets permet de dégager les éléments qui jouent un rôle dans la modélisation et la construction qualitative de la compréhension ainsi que dans son articulation qualitative/quantitative.

Les résultats indiquent une présence généralisée d'habitudes coordinatives aisément identifiables. Ainsi, les p-prim semblent jouer un rôle de premier plan dans la construction des modèles et dans la détermination des liens qu'il est possible d'établir entre les paramètres d'une situation-problème. L'analyse des résultats permet notamment d'attribuer aux « conceptions » un rôle secondaire, phénotypique, dans la compréhension. De plus, l'analyse permet de reconnaître la difficulté généralisée des sujets à établir correctement une compréhension de la raison inverse ($1/x$) et son caractère asymptotique. L'analyse à l'aide de la perspective « p-prim » établit également la possibilité d'examiner non seulement les intuitions efficaces et inefficaces, mais également l'ensemble des itinéraires cognitifs de sujets en projet de construire la logique du déplacement d'une « balle ».

Les implications de la thèse se situent notamment au niveau praxique; il devient possible d'imaginer des séquences d'apprentissage et d'enseignement qui soient fondées sur la prise en compte de la p-prim dans l'apprentissage de la physique malgré le caractère implicite de ces objets méconnus. C'est-à-dire une pratique véritablement constructiviste qui établit des ponts entre le savoir novice et le savoir expert étant donnée la présence des p-prim dans les deux cas. La thèse s'engage donc dans une perspective de l'apprentissage inscrite dans la continuité. Elle propose également des perspectives théoriques intéressantes et révèle, d'une certaine manière, un riche terrain théorique (des objets plus fondamentaux que les objets explicites comme les conceptions) pour appréhender la compréhension de la physique.

Mots-clés : physique-mécanique, micromonde, situation-problème, modélisation, coordination, p-prim, conception, changement conceptuel, entretien d'explicitation.

ABSTRACT

The thesis, which is in continuity with Legendre's (1993) work, deals with qualitative understanding of physics notions at the secondary level. It attempts to identify and to label, in the verbalizations of 12 to 16 year-old students, the tendencies that guide their cognitive itineraries through the exploration of problem-situations. The hypotheses of work are about modelisations, conceptions and p-prims. These last objects are seen, in DiSessa's epistemological perspective, as a type of habit that influences the determination of links between the parameters of a problem. In other words, they coordinate logically and mathematically.

Methodology is based on explicitation interviews. This type of interview authorizes verbalizations that involve an "intuitive sense" of mechanics. Twenty students are invited to share their evocations as they explore the logics of a computerized microworld. This microworld has been programmed on the "Interactive PhysicsTM" software and is made of five different situations that involve speed, acceleration, mass, force and inertia. The situations are presented to the students from the least to the most complex. An analysis of the verbalizations of the five students shows the existence of elements that play a role in modelisation and qualitative construction of comprehension as well as in its qualitative/quantitative articulation.

Results indicate the presence of coordinative habits easily discernible. P-prims appear to play an important part in the construction of models and in the determination of links between the variables of a problem. The analysis of the results allows to see that conceptions are not so important pieces in comprehension. As such, they seem phenotypic. Also, analysis allows to recognize the difficulty to understand properly the inverse relation ($1/x$) and its asymptotic nature. The "p-prim" analysis also establishes the possibility to analyze not only efficient and inefficient intuitions, but also the cognitive itineraries of students working to construct the logic of the movement of a "ball" as a whole.

Implications of the thesis are, among others, at the praxic level; it becomes possible to imagine sequences of learning and teaching physics that are based on the consideration of p-prims despite the implicit nature of these objects. This is a truly constructivist practice which establishes bridges between novice and expert knowledge because there are p-prims in both of them. As so, the thesis acknowledges a perspective of learning inscribed in "continuity". It also proposes a fertile theoretical ground for the comprehension of physics.

Keywords: physics, mechanics, microworld, problem-situation, modelisation, coordination, p-prim, conception, conceptual change, explicitation interview.

TABLE DES MATIÈRES

PAGES LIMINAIRES

Page titre.....	p.ii
Page d'identification du jury.....	p.iii
Résumé français.....	p.iv
Abstract (résumé anglais).....	p.v
Table des matières.....	p.vi
Liste des tableaux.....	p.x
Liste des figures.....	p.xi
Remerciements.....	p.xii

CHAPITRE 1. PROBLÉMATIQUE

1.1 L'apprentissage des sciences.....	p.3
1.2 L'apprentissage et l'enseignement de la physique et de la mécanique.....	p.5
1.3 La présente étude.....	p.7

CHAPITRE 2. CADRE THÉORIQUE

2.1 Introduction.....	p.11
-----------------------	------

Première partie

2.2 Les modèles du changement conceptuel.....	p.12
2.2.1 Le cadre constructiviste.....	p.12
2.2.2 Du constructivisme aux modèles de changement conceptuel.....	p.15
2.2.3 Le modèle de Nussbaum et Novick.....	p.17
2.2.4 Le modèle de Strike et Posner.....	p.21
2.2.5 Le modèle de Hewson.....	p.26
2.2.6 Le modèle allostérique.....	p.27
2.2.7 Le modèle de Larochelle et Désautels.....	p.29
2.2.8 La perspective du conflit socio-cognitif.....	p.34
2.2.9 Synthèse des modèles de changement conceptuel.....	p.37

Deuxième partie

2.3 La perspective de DiSessa.....	p.47
2.3.1 Les classes de coordination.....	p.48
2.3.2 Les p-prims.....	p.49

2.3.3 Le comportement des p-prim.....	p.54
2.3.4 Conceptions ou p-prim?.....	p.57
2.3.5 Apprentissage et p-prim.....	p.58
Troisième partie	
2.4 Le choix de l'approche de DiSessa comme cadre théorique.....	p.60
2.4.1 La place de l'intuition.....	p.61
2.4.2 L'élémentarité.....	p.62
2.4.3 Qu'est-ce qui change dans le changement conceptuel?.....	p.67
2.4.4 Rupture, continuité et constructivisme.....	p.70
2.4.5 P-prim et interventions pratiques.....	p.72
<hr/>	
CHAPITRE 3. QUESTIONS DE RECHERCHE	
3 Formulation des questions de recherche.....	p.75
<hr/>	
CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE	
4.1 Introduction.....	p.80
4.2 Les sujets.....	p.80
4.3 Les situations.....	p.82
4.3.1 La situation 01.....	p.86
4.3.2 La situation 02.....	p.87
4.3.3 La situation 03.....	p.89
4.3.4 La situation 04.....	p.92
4.3.5 La situation 05.....	p.94
4.3.6 Aspect ludique des situations.....	p.96
4.4 Les procédés d'entrevue et de collecte de données.....	p.97
4.4.1 Le type d'entrevue privilégié.....	p.97
4.4.2 Le guidage vers la position de parole incarnée et l'aspect procédural.....	p.98
4.4.3 Le déroulement des entrevues.....	p.102
4.5 Méthodologie de l'analyse.....	p.104
<hr/>	
CHAPITRE 5. ANALYSE ET INTERPRÉTATION	
5.1 Introduction.....	p.110

Première partie	
5.2 Les procédés et les modèles employés à travers les situations.....	p.111
5.2.1 Les sujets et la situation 01.....	p.111
5.2.2 Les sujets et la situation 02.....	p.114
5.2.3 Les sujets et la situation 03.....	p.117
5.2.3.1 Les variables proportionnelles à D.....	p.118
5.2.3.2 La variable inversement proportionnelle à D.....	p.119
5.2.4 Les sujets et la situation 04.....	p.123
5.2.4.1 Prise en compte du momentum de la balle.....	p.124
5.2.4.2 Le modèle additif simple.....	p.126
5.2.4.3 Le modèle se basant sur les singularités.....	p.127
5.2.4.4 Le modèle « équilibre + écart ».....	p.127
5.2.4.5 Le modèle « $(F-m)/m$ ».....	p.128
5.2.4.6 Le modèle « effet du coup +1-1 ».....	p.129
5.2.5 Les sujets et la situation 05.....	p.131
5.2.5.1 Le modèle soustractif.....	p.132
5.2.5.2 Le modèle « direction/? ».....	p.132
5.2.6 Résumé des analyses de la première partie.....	p.135
Deuxième partie	
5.3 Les conceptions rencontrées lors de l'exploration des situations.....	p.138
5.3.1 Analyse des conceptions rencontrées.....	p.139
5.3.2 Résumé des analyses de la deuxième partie.....	p.144
Troisième partie	
5.4 Analyse des p-prim rencontrés lors de l'exploration des situations.....	p.146
5.4.1 P-prim « violence ».....	p.146
5.4.2 P-prim « symétrie ».....	p.148
5.4.3 P-prim « canceling ».....	p.151
5.4.4 P-prim « force as a mover ».....	p.155
5.4.5 P-prim d'Ohm.....	p.161
5.4.5.1 La raison proportionnelle entre l'AGENT et le RÉSULTAT.....	p.162
5.4.5.2 La raison inversement proportionnelle entre la RÉSISTANCE et le RÉSULTAT.....	p.165
5.4.5.2.1 La non-linéarité.....	p.167
5.4.5.2.2 L'étude des asymptotes.....	p.173
5.4.5.3 La nature de la relation inverse dans la p-prim d'Ohm.....	p.176
5.4.6 Résumé des analyses de la troisième partie.....	p.177
5.5 Résumé de l'ensemble des analyses.....	p.178

CHAPITRE 6. CONCLUSION

6 Conclusion..... p.182

RÉFÉRENCES

7. Liste des références..... p.188

ANNEXES

Annexe 1. Quelques épisodes de transcriptions..... p.II

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I)	Correspondances entre conceptions et p-prims.....	page 64-67
Tableau II)	Liste des codes et sous-codes employés lors de l'analyse des données.....	page 105
Tableau III)	Liste des codes et sous-codes employés lors de l'analyse des textes-synthèse.....	page 107
Tableau IV)	Moyens employés par les sujets pour résoudre les problèmes liés aux paramètres « force du coup » et « photo ».....	page 119
Tableau V)	Moyens employés par les sujets pour résoudre les problèmes liés au paramètre « masse ».....	page 123
Tableau VI)	Adhésion de certains élèves à des énoncés qui négligent le momentum initial de la balle.....	page 125
Tableau VII)	Modèles employés par les sujets pour résoudre les problèmes de la situation 04.....	page 130
Tableau VIII)	Comportement des sujets dans la situation 05.....	page 134

LISTE DES FIGURES

Figure 1)	Un exemple de situation : la situation 03.....	page 84
Figure 2)	La situation 01 en trois temps.....	page 87
Figure 3)	La situation 02 en trois temps.....	page 89
Figure 4)	La situation 03 en trois temps.....	page 91
Figure 5)	La situation 04 en trois temps.....	page 93
Figure 6)	La situation 05 en trois temps.....	page 95
Figure 7)	Le poste de travail.....	page 103
Figure 8)	Un exemple de conception : la balle se déplace dans le sens où elle est frappée.....	page 143
Figure 9)	La logique de la raison inverse.....	page 165
Figure 10)	Variations de masses quand la force du coup et la photo sont fixées.....	page 166
Figure 11)	Hypothèse du fonctionnement de la raison inverse.....	page 167
Figure 12)	Hypothèse du « milieu ».....	page 169
Figure 13)	Approximation de la raison inverse en raison proportionnelle négative pour un intervalle expérientiel borné.....	page 176

REMERCIEMENTS

Un tel travail, dont la matérialisation finale, n'est, en définitive, que la pointe de l'iceberg, ne saurait être possible sans l'aide de nombreuses personnes.

Je souhaite tout d'abord remercier Marcel Thouin, mon directeur de thèse, dont l'appui a été inconditionnel tout au long du développement de ce projet. Depuis le moment où il a accepté la direction de ce travail jusqu'au moment du dépôt, ses encouragements, ses conseils et son soutien moral et intellectuel se sont avérés être pour moi des sources de motivation inépuisables. Il me semble difficile de trouver les mots pour reconnaître et décrire la valeur de l'appui dont j'ai bénéficié. Chaleureusement, merci.

Il serait également impossible de passer sous silence la contribution de Marie-Françoise Legendre. Les innombrables heures, généreusement et inconditionnellement offertes au service de la bonification de la thèse, ont produit de savants conseils, toujours pertinents et prodigués avec cœur malgré des horaires impossibles. Ces conseils ont considérablement contribué à solidifier les bases de ce travail. Merci.

Merci également à Jesus Vázquez-Abad, dont l'implication, notamment lors du dépôt du projet de recherche et lors de l'examen de synthèse, a permis de jeter un regard souvent inédit sur l'objet de recherche. Les réflexions de M. Vázquez m'ont, à chaque fois, appelé au dépassement.

Merci également à tous les enseignants de l'École secondaire Jeanne-Mance de l'année scolaire 1999-2000 ainsi qu'à son directeur, M. Pierre Paquette, qui ont accepté de libérer pour moi les élèves interviewés et ont considérablement facilité tous les aspects de ma présence à Jeanne-Mance.

Merci également à tous les sujets qui ont patiemment accepté de se prêter aux longues et exigeantes entrevues en ces chaudes journées des mois d'avril, mai et juin 2000.

Je souhaite également reconnaître le travail de messieurs Steve Masson et Yannick Dupont, qui ont participé activement à quelques-unes des étapes cruciales de l'élaboration théorique ainsi qu'aux entrevues et aux transcriptions.

Ce projet a également été facilité par la participation financière, sous forme de bourse d'excellence, du FCAR.

Finalement, Merci à mes proches, dont le soutien moral, inconditionnel, est le filet qui, régulièrement, m'a empêché de sombrer dans le « vague à l'âme » et m'a fait « rebondir » le moral... Un gros merci à Valérie ainsi qu'à ma famille; Vicky, Guillaume, Marcel et Marie-Paule pour leur soutien et leur foi en moi.

REMERCIEMENTS (suite)

Cette recherche a été réalisée dans le cadre d'un projet mené sous la direction de Marie-Françoise Legendre, chercheure principale ainsi que Marcel Thouin, co-chercheur.

Ce projet, qui se situe dans le prolongement des travaux de Legendre (1993, 1994, 1995, 1997), et qui s'intéresse principalement au raisonnement qualitatif en sciences, vise à concevoir une séquence d'interventions permettant d'exploiter, avec les élèves du secondaire, une série de micromondes hiérarchisés faisant appel à des niveaux de conceptualisation variés ainsi qu'à analyser l'impact de ces interventions sur la compréhension de concepts physiques et logico-mathématiques reliés aux lois du mouvement.

Le projet, intitulé : « Élaboration et analyse d'une séquence d'apprentissage de concepts physiques et logico-mathématiques reliés aux lois du mouvement à l'aide de l'ordinateur », a été subventionné par le CRSH, dont nous souhaitons ici souligner la participation.

Chapitre 1
Problématique

« Tout ce qui appartient à l'univers, particule ou galaxie, caillou ou animal, est, par convention doté d'existence; tout objet est. Mais, quel qu'il soit, sa définition est arbitraire. Tel caillou ou telle galaxie n'est considéré comme un être individualisé que grâce à l'observateur; celui-ci, en traçant les limites de ce qui appartient à l'objet, lui assigne une singularité. Pour être objet de l'univers, il faut être objet du discours d'un observateur. Certes, l'homme n'est pas le seul observateur; les animaux dotés d'une vue voient, tout comme lui, la tache brillante qui, chaque matin, monte dans le ciel; mais seul l'homme est capable d'aller au-delà de cette constatation et de faire de cette tache un objet, le Soleil. Cette étoile, comme toutes les étoiles, est une création du discours humain. Sans l'Homme, l'univers n'est qu'un continuum sans structure. »

Albert Jacquart

« We often try to cram our complex world into the confines of what human reason can grasp, by collapsing the hyperspace of true conceptual complexity into a single line, and then labeling the ends of the line with names construed as polar opposites ... »

Gould, S.J. (1987)

« Rien ne nuit plus à une vérité qu'une erreur ancienne! »

Goethe (1794-1832)

« Toutes choses étant semblables, l'explication la plus simple doit être la bonne¹ ».
Principe du « rasoir d'Ockham »

« ...et si cette machine te donnait tout de suite la vérité, tu ne la reconnaîtrais pas car ton cœur n'aurait pas été purifié par une longue interrogation. »

Diotavelli à Belbo dans
Le pendule de Foucault de Umberto Eco

« ... ce n'est pas pour autant que la nature suggère directement ce qu'il faut regarder dans ces phénomènes pour y comprendre quelque chose »

Laurence Viennot (1996)

« C'est au moment où un concept change de sens qu'il a le plus de sens, c'est alors qu'il est, en toute vérité, un événement de la conceptualisation »

Gaston Bachelard

¹ Trad. de l'anglais « All things being equal, the simplest explanation must be the right one ». Du latin : « pluritas non est ponenda sine necessitate »

Chapitre 1 : Problématique

1.1 L'apprentissage des sciences

La nature des phénomènes naturels exige que ceux qui les étudient se conforment à une discipline fort rigoureuse. À ce chapitre, les activités dites « scientifiques » impliquent paradoxalement des attitudes bien peu naturelles, contrairement aux objets qu'elles cherchent à étudier. Elles exigent, par exemple, l'emploi d'un jargon dont les définitions sortent les mots de leurs contextes usuels. C'est tout un univers terminologique où les mots *force*, *puissance*, *neutre*, *potentiel*, *travail*, *moteur*, *absolu*, *dérivée*, *matière* et *mécanique* ne peuvent plus être employés comme auparavant. En physique plus particulièrement, ces mots prennent un nouveau sens, plus précis, plus restreint, dont l'emploi exige une rigueur certaine. L'intuition de ces mots n'est ici pratiquement d'aucun secours. Les mots balisent parfois la pensée, mais l'entraînent parfois à la dérive.

Ces activités exigent également l'emploi de méthodes d'investigation et de résolution tout à fait étrangères à celles du quotidien, où les estimations approximatives et les impressions laissent la place aux mesures exactes (autant que faire se peut) et à la systématisation. Sans qu'il ne soit question d'exclure l'imagination, les croyances toutes nues n'y trouvent pas leur place.

Finalement, elles plongent l'individu qui s'y livre dans des mondes étranges; univers idéaux sans friction et sans gravité où les lignes droites se tracent au besoin et constituent les seules balises fiables. On doit atteindre un niveau de rigueur et d'abstraction tel, qu'il faudra parfois y considérer la planète Terre comme un horizon droit, alors que dans d'autres problèmes, elle ne sera qu'un point. L'existence d'un être vivant peut tantôt occuper toute la place (en médecine) tantôt être considérée comme pratiquement négligeable (en génétique des populations). Le temps, quant à lui, constitue tantôt une balise fiable, tantôt un matériau compressible. L'absolu se brise en petits absolus circonstanciels.

Les problèmes qu'on y retrouve sont de telles abstractions, qu'on doit parfois dénaturer leur réalité pour mieux les comprendre... C'est un lieu où des modèles

qui ne ressemblent en rien à la réalité permettent paradoxalement d'expliquer la réalité.

« (...) après tout, ce sont bien les schèmes qui lui sont liés qui permettent à tout un chacun de se mouvoir et d'agir sur les objets dans la vie quotidienne. Alors que d'un autre côté, les problèmes scientifiques sont des problèmes rares, au sens qu'il est rare de les trouver sous une forme adéquate dans la vie quotidienne. »

Johsua et Dupin (1993, p.133)

En un mot comme en cent, faire des sciences n'est tout simplement ni facile ni confortable. Non seulement y a-t-il toute une mécanique, toute une gymnastique intellectuelle, toute une discipline à apprendre et à mettre en oeuvre, mais aussi faut-il effectuer des « sauts épistémologiques ». Et c'est peut-être le manque de cette attitude ouverte qui consiste à pouvoir douter de ses propres intuitions qui est une des plus importantes difficultés dans l'apprentissage des sciences.

En effet, la science, dont le souci est la compréhension des phénomènes naturels, ne peut se contenter de « découvrir la nature » telle qu'on suppose qu'elle puisse se laisser dévoiler, ou même telle qu'on présume qu'elle puisse ontologiquement exister. L'activité scientifique exige plutôt de transcender ses propres modèles, personnels ou institutionnalisés et de rompre avec ses croyances antérieures. C'est-à-dire qu'il est nécessaire d'adopter ou de construire de nouvelles perspectives et de nouveaux points de vue à propos de problèmes anciens; non seulement faut-il résoudre les problèmes normaux² (ceux qui impliquent des circonstances variées à l'intérieur d'un même paradigme), mais il faut également solutionner les problèmes de rupture épistémologique (c'est-à-dire les problèmes qui exigent une modification ou un échange de paradigme). C'est un pas vers l'avant qui éloigne du quotidien, de l'usuel, du particulier et du confort intellectuel. C'est vraisemblablement le pas le plus difficile à faire. (Bachelard, 1967, 1973) Comme le disait Denis Guedj (2000) : « L'école n'est pas la rue, ni la télé, ni le

² « Selon ces références épistémologiques, les savoirs opérants que nous tentons de définir ne peuvent pas correspondre à la maîtrise de problèmes scientifiques quels qu'ils soient, mais uniquement à celle des problèmes normaux, dans un paradigme donné. Kuhn note que ces problèmes de science normale ont les caractéristiques de véritables puzzles (énigmes). Comme ces énigmes ludiques, les problèmes de science normale permettent à chacun de prouver son habileté, correspondent à des problèmes dont on suppose qu'ils ont une solution (dans le paradigme) et obéissent à des règles, explicites ou non. Lorsque nous parlons de savoir opérant, c'est donc de la maîtrise de telles énigmes qu'il s'agit. » (Orange, 1997, p.16)

supermarché... C'est un lieu de prise de distance par rapport à la dictature du présent ».

1.2 L'apprentissage et l'enseignement de la physique et de la mécanique

En physique, cet éloignement peut être si profond qu'il entraîne les individus, élèves comme professeurs, à souvent réduire leur compréhension des phénomènes physiques à leur seule expression mathématique. La compréhension qualitative, même si on présume qu'elle puisse exister, n'occupe vraisemblablement que peu de place dans le discours du professeur. De même, les problèmes « ouverts » ou ceux qui exigent un raisonnement qualitatif sont trop souvent absents des cours de physique. Il est vrai que les réponses à de tels problèmes ne sont pas faciles à évaluer. Leur examen est laborieux. Cependant, cette évacuation n'en est pas moins déplorable. On observe qu'à force de se cantonner dans les descriptions mathématiques et les algorithmes, les élèves en viennent à réduire leur compréhension de la physique à ces considérations. Or, on ne saurait admettre que l'expression mathématique des problèmes puisse en constituer l'explication. Il apparaît donc qu'au lieu d'étudier la physique et les phénomènes qui l'intéressent, les élèves « appliquent les mathématiques » à des problèmes dont l'habillage peut ressembler à la réalité (Baruk, 1973). Il en résulte que chaque problème est pour l'élève un problème nouveau, puisque la réalité que l'équation cherche à représenter lui échappe, ce qui est déplorable si on considère que l'un des objectifs de la physique est la recherche de moyens universels pour expliquer les phénomènes.

Bien sûr, de nombreux professeurs et didacticiens se sont penchés sur le problème que cause la centration sur les formalismes mathématiques. Ils se sont alors intéressés à la compréhension qualitative des élèves et se sont rendu compte que ces derniers, lorsqu'ils étaient confrontés à des problèmes ouverts, proposaient sans réserve toutes sortes d'explications pour rendre compte des phénomènes de leur environnement (Novak, 1994; Potvin, 1998). Or, ces explications, appelées « conceptions », peuvent exister librement, sans même que leurs détenteurs aient jamais suivi de cours à leur propos. Parfois appelées « conceptions erronées » ou « conceptions naïves » (Dreyfus et al, 1990; Hynd et al, 1994; Nussbaum et al,

1982; Villani 1992; Wu, 1997-98), elles sont, le plus souvent, fort différentes des explications proposés par la science. Elles leurs sont donc opposées.

En physique-mécanique, on a ainsi répertorié de nombreuses conceptions qui existent chez les individus bien avant leurs premiers jours de formation (Andre, 1999; Thouin, 1997). Ces conceptions sont réputées pouvoir interférer sérieusement avec l'apprentissage de la mécanique et on observe que bien souvent, elles semblent résister à tout enseignement.

Certains designs didactiques ont choisi de prendre en compte l'existence même de ces conceptions. Plusieurs d'entre eux ont ainsi proposé de mettre les conceptions des élèves en conflit, c'est-à-dire qu'ils cherchent à montrer aux élèves les limites de leurs idées. L'espoir que du conflit résulte l'adoption de conceptions plus scientifiques présentées par l'enseignant est au cœur de tels designs. Or, le succès mitigé de ces entreprises laisse perplexe. La prise en compte des conceptions ne semble pas suffire à induire un changement durable.

Laurence Viennot (1979 et 1996), qui fût la première didacticienne des sciences, avait constaté que ce sont souvent dans les problèmes qui sont formulés le plus simplement que pouvaient se révéler le mieux les conceptions entretenues par les élèves (1979). C'est dans de tels problèmes qu'Andrea DiSessa a proposé qu'il soit possible de trouver des éléments de compréhension qui sont encore plus fondamentaux que les conceptions. Ses recherches concernent principalement les problèmes qui traitent du mouvement des corps. Dans sa perspective, la considération des conceptions comme objets élémentaires de compréhension de la cinématique-mécanique est une erreur. Pour lui, il faut s'intéresser à des habitudes interprétatives plus fondamentales encore que les conceptions : les p-prim. On peut dire pour synthétiser, qu'une p-prim est comprise comme l'explication élémentaire qu'un sujet va apporter pour coordonner entre eux les différents paramètres d'un problème.

Malheureusement, on ne connaît pas encore très bien les conditions d'existence et d'application ces p-prim. Bien que la littérature de recherche s'enrichisse graduellement de jour en jour de certaines études qui font intervenir les p-prim

dans leur analyse et bien que leur prise en compte semble prometteuse, cette dernière reste aujourd'hui marginale.

1.3 La présente étude

Une part importante du problème de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique-mécanique réside en ce que la préoccupation d'examiner la compréhension qualitative des phénomènes est généralement absente. Il en résulte que les enseignements vont alors inévitablement et essentiellement se concentrer sur des méthodes mathématiques ou des algorithmes permettant la découverte de la « bonne réponse ». Il est clair que cela est fait au détriment d'authentiques compréhensions des phénomènes naturels (Novak, 1994). Dans un tel contexte, un élève peut fort bien réussir un cours de physique sans jamais avoir développé de véritable « sens de la mécanique » (DiSessa, 1993). Il se comporte avec efficacité pour résoudre les problèmes scolaires, mais échoue lamentablement lorsqu'on lui pose des problèmes qualitatifs « ouverts » qui exigent un « sens de la mécanique » minimal (Viennot, 1979, 1993). Il semble alors clair que l'enseignement actuel de la physique, au lieu d'initier les élèves aux phénomènes naturels, rate sa mission et contribue plutôt à les en éloigner.

Il résulte également de cette négligence une pauvreté certaine des outils analytiques de la compréhension qualitative, que ce soit pour le diagnostic de l'erreur comme celui de la compréhension, que ce soit pour l'intervention pédagogique ou alors pour l'évaluation de compétences.

En recherche, un certain nombre d'initiatives pour dégager la compréhension qualitative à l'aide de situations informatisées (*Envisionning Machine*, *Thinker tools*, *Interactive Physics*, *Boxer*, *Dynaturtle*, *Graphs and tracks*) ont été mises de l'avant. Parmi de telles études, on compte les travaux de Hammer (1996), Sherin & DiSessa (1993), Roschelle & Mason (1995), White (1984) et Roth (1995), dont les méthodes de collecte des données ont principalement été des entretiens dirigés en petits groupes. On peut également évoquer les études menées par Thomas Andre (1999) sur l'effet d'un traitement pédagogique sur la compréhension en mécanique. On peut également mentionner la thèse de doctorat de Jeremy Roschelle (1991)

dont le type d'entrevue (entrevues avec un seul sujet à la fois, impliquant des relances à la manière d'entretiens cliniques piagétiens) a partiellement inspiré la présente thèse.

Bien que ces initiatives, ainsi que plusieurs autres, existent dans le monde de la recherche, la considération des compréhensions qualitatives dans le milieu de la pratique reste marginale. Or, non seulement le professeur de mécanique, par la négligence de la compréhension qualitative, risque de faire obstacle au développement d'un « sens de la mécanique », mais il est aussi prisonnier de cette habitude. En effet, il peut lui sembler fort téméraire, incertain et laborieux de s'engager dans la voie d'une prise en compte systématique des considérations qualitatives alors qu'il ne possède aucun outil analytique pour le faire. Bien qu'il puisse bénéficier de la notion de *conception*, nous argumenterons que celle-ci ne lui est pratiquement d'aucun secours.

La poursuite du développement d'outils analytiques des compréhensions qualitatives, qu'elles soient spontanées ou qu'elles soient le produit d'un enseignement, nous semble ici absolument nécessaire. Nous proposons donc une étude descriptive des modèles que les sujets seront en mesure d'élaborer pour expliquer les phénomènes de mécanique newtonienne avec lesquels nous les mettrons en contact. Ce contact, que nous souhaitons intime, sera facilité à l'aide d'un laboratoire virtuel informatisé (*Interactive Physics^{MD}*), celui-là même que Roth (1995) avait choisi d'employer. Il s'agit d'un environnement synthétique très riche, un micromonde informatisé, qui reproduit parfaitement les phénomènes de mouvement, de forces, de collisions, et dont l'accès est particulièrement convivial. Un certain nombre de situations ont été programmées de sorte à pouvoir laisser les sujets explorer librement les relations qui existent entre les variables.

La présente recherche s'inscrit en continuité des travaux de Roschelle (1991) mais surtout de ceux de Legendre (1993, 1995 et 1997). Dans le thèse de cette dernière, il était question d'examiner le développement de compréhensions qualitatives en physique mécanique et d'en représenter les « schèmes ». Basée sur le modèle de l'« équilibration » de Piaget, il y était question de « coups » donnés à une balle et des changements de vitesse et de trajectoire qui en résultent. Cela s'est avéré être

un terrain fertile pour voir se produire des déséquilibres et des rééquilibrations, bref, des apprentissages en mécanique. La thèse de Legendre constitue un apport important dans la perspective d'un développement conceptuel inscrit dans la continuité. Notre micromonde s'inscrit d'ailleurs dans le prolongement de celui de Legendre.

Dans le présent exercice de recherche, nous nous intéresserons nous aussi aux raisonnements qualitatifs que les sujets mettront en branle pour s'approprier la logique des situations et construire des modèles. Nous avons choisi de surveiller non seulement l'émergence et le développement de modèles et de conceptions, mais aussi, comme l'avaient fait DiSessa (1993, 1998) et Hammer (1996), la présence et l'emploi de p-prims dans les verbalisations. Les modèles, les conceptions et les p-prims doivent ici être compris comme les *outils d'analyse* des compréhensions qualitatives que les élèves développeront dans leurs explorations. La question générale qui orientera les différentes initiatives qui constituent la présente étude pourrait donc se formuler ainsi :

« Quelles sont les stratégies déployées intuitivement par les sujets du secondaire pour construire des modèles permettant d'appréhender certains phénomènes de la mécanique? »

Cette question de recherche sera davantage développée et découpée au troisième chapitre. Néanmoins, elle sera omniprésente tout au long de la thèse telle qu'elle est formulée ici. Il est à espérer que l'examen attentif des verbalisations à l'aide de cadre théoriques pertinents pour la physique-mécanique permettra de dégager les habitudes interprétatives d'élèves face à une véritable compréhension qualitative de ces phénomènes scientifiques. On peut aussi espérer que la connaissance de ces habitudes puisse renseigner l'enseignant et le didacticien sur les processus réflexifs qu'on est en droit d'attendre des élèves ainsi que ceux qui posent problème dans l'apprentissage des concepts scientifiques canoniques.

Chapitre 2
Cadre théorique

Chapitre 2 : Cadre théorique

2.1 Introduction

Le cadre théorique de la thèse se divise en trois parties principales. La première tient davantage d'une « revue de la littérature » et propose un état de la question des modèles de changement conceptuel. On y met notamment en évidence les apports et frontières de ces différents modèles. Étant donné que tous ceux-ci tentent de s'inscrire au sein du paradigme constructiviste, il nous semble indispensable de faire précéder leur examen d'une présentation de ce paradigme. Dans une synthèse, nous insisterons finalement sur les caractéristiques novatrices de l'ensemble ces modèles ainsi que sur celles qui posent problème dans la compréhension de l'intelligence scientifique.

La seconde partie, quant à elle, porte sur la perspective de DiSessa. Étant donné le choix de ce modèle d'analyse comme cadre interprétatif du matériau de recherche, nous nous attarderons davantage sur son explicitation. Un examen exhaustif de ses caractéristiques et avantages pour la thèse s'avère nécessaire. Des comparaisons avec les modèles précédemment présentés et une justification de son choix seront effectuées, notamment en ce qui concerne sa conformité avec le constructivisme.

Finalement, dans la troisième et dernière partie, nous justifierons en détails le choix du cadre interprétatif décrit dans la deuxième partie. Plus argumentative, elle mettra en relief les avantages marqués de cette approche sur les autres perspectives du changement conceptuel pour le cadre particulier qui nous intéresse, c'est-à-dire celui de la mécanique au secondaire.

Première partie :

2.2 Les modèles de changement conceptuel

2.2.1 Le cadre constructiviste

La plupart des modèles de changement conceptuel sont inspirés du paradigme constructiviste. On peut dire que ce dernier a pris nom et visage avec Jean Piaget. On peut d'ailleurs considérer que l'œuvre de ce dernier a été, en fait, une continuelle vérification de la thèse constructiviste. Elle a vu le jour en réaction à la traditionnelle vision de l'enseignement qui consistait à « faire découvrir » les phénomènes et à inscrire sur la « cire vierge » des élèves les connaissances qu'on voulait leur faire apprendre. Pour les enseignants souscrivant à ce positivisme, il suffisait alors de s'assurer que l'enseignement soit dispensé « selon les règles » et que l'élève produise un « effort honnête » pour que l'acquisition des connaissances soit garantie. L'apprentissage pouvait alors être compris comme une accumulation de connaissances. Cependant, les initiatives scolaires qui souscrivaient à ce « principe accumulatif » firent très tôt montre d'une inefficacité évidente.

« Il faut en finir une bonne fois avec cette instruction de catalogue qui effleure tout et n'approfondit rien, avec cette éducation encyclopédique qui surcharge la mémoire sans développer l'intelligence et qui ne laisse après elle qu'une fatigue souvent irréparable et un dégoût insurmontable pour le travail intellectuel (...). »

M.J. Brochand, juin 1881
cité par Giordan & de Vecchi (1987)

La régularité et la cohérence des erreurs que les élèves commettent laissent supposer que quelque chose de « coordonné et de logique » interfère avec l'apprentissage. Ainsi, certaines de ces erreurs paraissent-elles aujourd'hui moins contingentes, plus liées aux rapports profonds entretenus avec un savoir dans des conditions données. (Johsua et Dupin, 1993)

On a alors vu, ces dernières années, se multiplier les recherches sur ce type d'erreurs :

« Studies have found that students begin formal physics education with a system of physical conceptions that differ in deeply systematic ways from those of the physicist and present a significant obstacle to learning physics. (Viennot, 1979; DiSessa, 1983; McDermott, 1984; Haooloun & Hestenes, 1987) »

Dewey et al. (1992)

Malgré l'idée encore aujourd'hui fort répandue du rôle des élèves comme accumulateurs du savoir à partir de la « table rase¹ » (Nussbaum & Novick, 1982), les nombreuses recherches et réflexions didactiques indiquent qu'il ne peut plus en être ainsi. (Eckstein et al., 1993) En effet, il en ressort qu'on ne peut plus considérer les élèves comme des réservoirs inertes.

Conformément aux travaux de Piaget, au lieu de considérer les élèves comme les récepteurs passifs de connaissances, on leur accorde plutôt un statut d'*acteur* qui va bien au-delà de l'écoute attentive. L'élève est vu comme celui qui va construire activement ses propres savoirs en interagissant avec son environnement. Il a même une tendance toute naturelle à « faire du sens » des informations qui sont soumises à sa conscience. Il cherchera ainsi à résoudre par tous les moyens possibles les inconsistances, les déséquilibres et les conflits cognitifs. C'est-à-dire qu'il s'appliquera constamment et tout naturellement à rendre sa conduite (en mécanique comme dans tout autre secteur de l'activité humaine) plus intelligente; l'intelligence étant comprise ici comme l'état d'équilibre vers lequel tendent toutes les adaptations successives d'ordre sensori-moteur et cognitif, ainsi que tous les échanges assimilateurs et accommodateurs² entre l'organisme et le milieu. (Piaget, 1967)

Cette façon de voir l'apprenant oblige à présumer de l'existence de représentations initiales avant même que l'élève ne se mette en projet d'apprendre. En effet, s'il est vrai que l'élève procède par déséquilibres et rééquilibrations pour construire son savoir, on considère également qu'il emploie déjà de telles représentations qui sont elles-mêmes les produits d'accommodations antérieures.

¹ « Iran-Nejad (1990), reviewing research on students' approaches to learning, concluded: "The majority -more than two thirds- view learning as knowing more, memorizing for later reproduction, or acquiring and using facts. » (Wright, 1995).

Le champ de la didactique des sciences s'est aussi enrichi substantiellement par la contribution de Gaston Bachelard. Cet apport, quant à lui, se situe au niveau des obstacles épistémologiques qui peuvent être rencontrés lors de la communication des connaissances scientifiques. Non seulement apprendre n'est plus « empiler les connaissances », mais c'est aussi neutraliser ses subjectivités.

« L'ignorance est une forme de connaissance! Le savant ne voit pas, dit-il, que l'ignorance est un tissu d'erreurs positives, tenaces, solidaires. Il ne se rend pas compte que les ténèbres spirituelles ont une structure et que, dans ces conditions, toute expérience objective correcte doit toujours déterminer la correction d'une erreur subjective. Mais on ne détruit pas les erreurs une à une facilement. Elles sont coordonnées. L'esprit scientifique ne peut se constituer qu'en détruisant l'esprit non scientifique. Trop souvent le savant se confie à une pédagogie fractionnée alors que l'esprit scientifique devrait viser à une réforme subjective totale. Tout réel progrès dans la pensée scientifique nécessite une conversion. »

Bachelard (1967)

Dans les idées constructivistes modernes, cette forme d'ignorance a pris le nom de « conception erronée » (et synonymes). Quant au mot « obstacle », Jean-Pierre Astolfi (1997) nous met en garde contre le sens commun qu'on lui attribue. Il ne cherche pas tant à désigner des entraves à « faire sauter » qu'à caractériser le fonctionnement « naturel » du cerveau, avec ses lenteurs, régressions, analogies, souvent indispensables à tout apprentissage.

Les subjectivités décrites par Bachelard nous encouragent donc à « penser contre le cerveau ». Elles sont à l'origine de nombreuses conceptions dont le pouvoir descriptif, explicatif et prédictif suffit amplement dans le quotidien usuel. Le mot obstacle vient alors du fait que les mécanismes naturels d'acquisition des conceptions interfèrent quand vient le temps d'identifier les concepts plus scientifiques, plus universels.

Les contributions de Bachelard et de Piaget nous forcent à penser que, si les difficultés d'apprentissage originent de la complexité inhérente à un contenu, elles viennent alors assurément de l'intérieur de l'individu et appartiennent au fonctionnement naturel d'une pensée en route vers une conduite intelligente. Il faut dès lors opérer une introspection, s'intéresser aux structures cognitives déjà

² Accommodation : Dans le système de connaissances qui est accepté (...) par le système cognitif, s'introduisent des relations nouvelles qui généralisent ou élargissent les structures propres au système cognitif. (Johnsua et Dupin, 1989).

présentes dans les têtes des individus, ainsi qu'aux mécanismes fondamentaux qui gèrent leurs métamorphoses.

Piaget (1979) concluait à la fin de sa vie:

« Cinquante années d'expériences nous ont appris qu'il n'existe pas de connaissances résultant d'un simple enregistrement d'observations, sans une structuration due aux activités du sujet. Mais il n'existe pas non plus (chez l'homme) de structures cognitives a priori ou innées: seul le fonctionnement de l'intelligence est héréditaire et il n'engendre des structures que par l'organisation d'actions successives exercées sur des objets. Il en résulte qu'une épistémologie conforme aux données de la psychogenèse ne saurait être ni empiriste ni préformiste, mais ne peut consister qu'en un constructivisme, avec l'élaboration continue d'opérations et de structures nouvelles. »

in Bertrand (1998, p72-73)

Mais l'introspection proposée par le paradigme constructiviste n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes. Ceux-ci apparaîtront plus saillants dans la partie du texte qui décrit les différents modèles du changement conceptuel, qui ne sont rien d'autre, en fait, que des tentatives de rendre le constructivisme applicable à des circonstances de la « vraie vie ». Nous prendrons tout de même le temps de signaler un des paradoxes importants qu'implique le paradigme; paradoxe dont la formulation, proposée par Giordan et reprise par Bertrand, peut donner un avant-goût des difficultés : pour faire de la formation, il faut aussi faire de la déformation; en effet :

« La connaissance a pour but de se détruire pour avoir meilleure allure! Elle est à la fois processus et résultat. Voilà l'essentiel de la position de Giordan: L'auto-transformation est une forme d'auto-destruction des conceptions erronées en place. En effet, il est indispensable de prendre comme substrat les outils quotidiens de pensée que maîtrise l'étudiant. Or, les conceptions préalables correspondent aux seuls instruments à la disposition de l'étudiant et c'est à travers eux qu'il décode la réalité. En même temps, il faut constamment les remettre en cause car ils conduisent inévitablement à l'évidence. Le fait qu'une prévision, s'appuyant sur un modèle spontané se révèle fausse ne suffit pas à détrôner ce modèle; elle se réajuste par l'expérience et l'explication s'adapte selon les mêmes modalités. Certes, l'élève devra le plus souvent aller contre sa conception initiale, mais il ne pourra le faire qu'en ayant vu toutes les limites. »

Bertrand (1998, p.77)

2.2.2 Du constructivisme aux modèles de changement conceptuel

Le paradigme constructiviste était déjà une telle révolution en soi, que toutes ses implications et applications possibles n'ont pas été perçues par les épistémologues.

Piaget lui-même n'a que peu insisté sur les considérations didactiques du paradigme. Les écrits proprement pédagogiques de celui-ci sont d'ailleurs effectivement peu nombreux et peu explicites quant à la manière de transposer cette vision en contexte scolaire. On est même parfois d'avis, comme Johsua et Dupin (1993, p.98) que, si le cadre piagétien fournit un bon paradigme d'interprétation,

« ...son manque de sensibilité aux différences de situation comme aux différences de contenu en ferait un outil inadéquat, du moins si on le prend au pied de la lettre, pour penser une didactique des sciences. »

Néanmoins, l'influence de Piaget et de Bachelard sur l'évolution de la didactique des sciences et des mathématiques a été prédominante et de nombreux chercheurs se sont inspirés de la perspective constructiviste (en général) et de la notion d'accommodation (en particulier) pour chercher à produire des modèles de changement conceptuel efficaces.

Malgré une inspiration constructiviste commune, les modèles qui ont été proposés en didactique des sciences et de la physique diffèrent en de nombreux aspects. Ils tirent en effet leur origine d'ancrages théoriques différents. Cela les amène à concevoir différemment les conceptions ainsi que les façons de les faire évoluer. Par conséquent, les caractéristiques fondamentales qui en découleront permettront de les caractériser et même de les différencier. Bien entendu, aucune d'elles ne fait l'unanimité. Leur contribution à l'apprentissage dans le contexte de la classe comporte des intérêts, certes, mais aussi des limites, que nous tenterons de cerner.

Nous commençons donc ici notre bref tour d'horizon de quelques-unes de ces productions, représentatives des ancrages théoriques qui leur ont donné naissance, de leurs caractéristiques et de leur histoire et portons un certain regard critique sur leurs possibilités didactiques et pédagogiques.

On insistera particulièrement, tout au cours cette revue de la littérature sur le changement conceptuel et sur le fait que les modèles, s'inscrivant d'abord dans une perspective de rupture, verront graduellement leur position s'attendrir et admettre que s'il faut faire contre – le cerveau et les conceptions -, il faut aussi faire « avec ».

2.2.3 Le modèle de Nussbaum et Novick

À la suite des travaux de Piaget, les auteurs foisonnaient d'idées neuves pour chercher à rendre fonctionnelle l'accommodation dans les classes de sciences. Ce fut le cas, par exemple, de Nussbaum et Novick (1982) qui partirent de l'idée qu'il existe des conceptions initiales qui perturbent la compréhension des phénomènes naturels.

Ces conceptions devaient donc être remplacées par d'autres – plus scientifiques – dans un processus d'accommodation qui devait nécessairement passer par un conflit (déséquilibre). Du coup, la « communication » et/ou la « vulgarisation » des connaissances scientifiques devenaient plutôt un « échange » ou une « modification » de conceptions et chacun des enfants devenait une « structure » plutôt qu'un « vase ». Leur étude (1982) sur le développement des conceptions à propos du comportement des gaz a d'ailleurs permis de mettre en évidence l'existence de conceptions inédites et a permis de constater que, dans une certaine mesure, il devenait possible d'observer une certaine évolution de ces conceptions.

Ces auteurs s'élevèrent également contre une autre croyance admise à l'époque voulant qu'on puisse faire suivre à l'élève le même itinéraire que la communauté scientifique dans l'évolution de son savoir³. Il est cependant aisé de se rendre compte qu'ils utilisèrent, sans être explicites à ce propos, de nombreuses caractéristiques des « révolutions scientifiques » de Kuhn (1970). Ainsi peut-on émettre des réserves face à une perspective sans réellement en rejeter toutes les caractéristiques.

Il est cependant clair que le modèle de Nussbaum et Novick s'inspire fondamentalement, en plus de la notion piagétienne d'accommodation, de celle de conflit cognitif. Un conflit cognitif se produit quand un individu détenant une conception qu'il emploie activement pour comprendre son environnement voit cette

³ Cette position est nettement en rupture avec la position de Posner et al. qui prennent pour ancrages théoriques les travaux inspirés de l'histoire des sciences et de l'épistémologie.

conception en contradiction avec les concepts qui lui sont proposés (Hewson, 1984). On dit qu'il y a alors déséquilibre. C'est ce déséquilibre qui est susceptible de provoquer une évolution dans les conceptions (Driver, 1983). Nussbaum et Novick élaborèrent un modèle de changement conceptuel basé sur trois étapes : 1) la mise en évidence (et l'explicitation) des conceptions initiales des élèves par tous les moyens possibles (ou « exposing event »), 2) la démonstration d'un événement-anomalie que les conceptions mises en évidence précédemment seront incapables de cerner (ou « discrepant event ») et 3) le support à toute manifestation d'accommodation. On peut clairement voir ici l'influence piagétienne en ce qu'on cherche à produire le déséquilibre (ou conflit conceptuel, par le biais de l'événement-anomalie) nécessaire à toute accommodation.

L'approche se distingue des autres perspectives comme celle proposée par Driver (1993) où l'espoir de changement trouve essentiellement tout son moteur dans la surprise produite par le « discrepant event ». Elle se distingue aussi d'autres perspectives, où le « discrepant event » est suggéré au début de l'expérience et où on espère que les élèves vont spontanément proposer des explications alternatives.

Contrairement à ces modèles, le modèle Nussbaum-Novick propose de commencer par rendre explicites (et même publiques⁴) ses conceptions à propos d'un phénomène particulier. Cette étape préliminaire est ici jugée essentielle car si, au contraire, la conception initiale reste floue et inexplicitée, elle ne pourra être inscrite clairement en discordance avec l'événement-anomalie, le conflit risquant alors de passer complètement inaperçu. L'importance de la prise de conscience de l'existence de ces conceptions et de leur explicitation apparaissent comme des principes directeurs du modèle.

Il est intéressant de voir à ce niveau que, même s'ils n'ont discuté en rien des aspects sociaux de leurs expériences, ces dernières mettaient non seulement l'accent sur le conflit né de l' « anomalie », mais également sur celui issu du choc avec les idées des pairs (lors de l' « exposing event »). En effet, le modèle propose

⁴ Lors du « exposing event ».

des discussions de groupe et des échanges de toutes formes entre individus. On retrouvera cette composante plus spécifiquement dans les modèles de conflit socio-cognitif.

Dans leur article désormais célèbre, les auteurs demandent à leurs sujets d'expliquer la distribution de l'air qui resterait dans un ballon de verre duquel on aurait pompé la moitié du contenu initial. Les élèves sont appelés à expliquer leur conception de cette distribution par le moyen d'un dessin « comme si l'air devenait visible ». Ils sont ensuite invités à discuter (dans un débat) de leurs hypothèses avec leurs pairs. On suggère ensuite l'événement-anomalie : « que se passe-t-il si, au lieu d'enlever de l'air, on en ajoute? » [démonstration de compression de l'air, suivie d'un autre débat dans lequel les élèves font intervenir de belles idées, comme celle de la nature particulière des gaz ou des analogies intéressantes, comme celle de l'air-éponge]. Il est aussi intéressant de voir que l'issue d'une éventuelle activité qui serait inspirée de ce modèle n'est pas nécessairement la « bonne » conception. C'est plutôt le choix de la « meilleure » selon le point de vue des élèves. L'approche a donc la vertu de valoriser le travail intellectuel des élèves. Elle peut également contribuer à briser la connotation dogmatique de la science.

Désautels et Larochelle (1992, p.38), dans une sévère critique de ce travail n'y voient, quant à eux, qu'un intérêt limité :

« En somme, si on peut parler de changement conceptuel dans cette expérience, on pourrait dire que les élèves ont troqué une métaphore substantialiste, par exemple l'éponge, pour une autre métaphore substantialiste, les particules, mais qui sont épistémologiquement équivalentes puisque l'une et l'autre sont associées à la description d'une réalité indépendante du sujet connaissant. »

Ils sont également d'avis que l'utilisation des modèles dans lesquels on imagine pouvoir « voir » les entités ou objets scientifiques (dans ce cas-ci : les particules d'air) mène l'élève à croire qu'il est possible de voir les choses « telles qu'elles sont » sans l'aide de modèles :

« De manière tacite, on véhicule donc l'idée que la tâche des scientifiques réside en une description iconique ou littérale d'une réalité ontologique, ce qui est une position logiquement fort inconfortable dans la perspective constructiviste. »

On peut cependant se demander si un constructivisme si engagé est effectivement praticable. Dans le modèle de Nussbaum et Novick, ce sont tout de même les élèves qui ont proposé la conception qui a fini par être adoptée. Et même si celle-ci possède, comme sa précédente, quelque caractéristique substantialiste, la façon dont on a élaboré et choisi cette conception constitue tout de même un pas important vers un dépassement du positivisme. Même le guidage de l'enseignant n'était pas orienté vers la connaissance du phénomène tel qu'il est décrit dans le curriculum, mais plutôt vers la mise en évidence des caractéristiques des hypothèses des élèves.

De plus, si on utilise les modèles pédagogiques (représentation visuelle de l'air) sans discuter avec les élèves leur valeur épistémologique, cela ne veut pas dire que l'on soit radicalement positiviste. En sciences, il faut bien un support pour la pensée, soit-il imparfait ou temporaire; et comment parler de science sans l'aide de modèles?

D'ailleurs, si on inscrit le modèle Nussbaum-Novick dans son contexte d'apparition (i.e. qu'il s'agit d'un des premiers modèles de changement conceptuel d'aspiration constructiviste), on peut affirmer qu'il s'est alors (1981) engagé dans une voie tout de même résolument moderne.

Bien entendu, la méthodologie ici employée n'est pas sans limites. En effet, l'événement-anomalie proposé par l'enseignant ne sera pas obligatoirement perçu comme tel par les élèves qui ne sont alors pas nécessairement prêts à simplement rejeter leurs conceptions initiales. Les élèves, tout comme les scientifiques, ne changent pas d'idée uniquement pour des raisons rationnelles [Clemenson, (1990) cité par Laplante, (1997)]. De plus, il est aujourd'hui évident que la dissonance cognitive est indispensable mais insuffisante pour induire un changement conceptuel durable. Malgré tout, nous croyons que le modèle offre une option intéressante pour aborder les concepts scientifiques, puisqu'il insiste sur l'importance de rendre le conflit saillant par tous les moyens possibles, ce qui est considéré aujourd'hui comme une condition unanime à toute évolution conceptuelle et à toute accommodation.

MODÈLE DE NUSSBAUM ET NOVICK
Résumé

Nouveautés : le modèle « accumulatif » est rejeté. La compréhension devient une structure.

Origines théoriques : principe d'accommodation et notion kuhnienne de « révolution scientifique ».

Principe directeur d'induction de changement conceptuel : mise en évidence des « anomalies » dans la compréhension par des discussions, des démonstrations.

Méthode de cueillette de données privilégiée dans ces recherches : discussions de groupe.

Problème soulevé : Difficulté à se dégager de la position positiviste de la connaissance et négligence de l'épistémologie personnelle.

2.2.4 Le modèle de Strike et Posner

Dans l'élaboration de leur modèle, Posner, Strike, Hewson et Gertzog se sont appuyés non seulement sur les travaux de Piaget sur l'accommodation, mais également sur l'histoire des sciences. En fait, l'influence des études de Kuhn (et de ses travaux sur les révolutions scientifiques en histoire des sciences) est particulièrement saillante puisque Posner et al. y réfèrent sans ménagement. Ils emploient, par exemple, la notion kuhnienne d' « anomalie »⁵ et semblent la rapprocher du (voire même la confondre au) « discrepant event » proposé par Nussbaum. Quant aux conceptions, elles semblent posséder toutes les caractéristiques des « paradigmes » de Kuhn. Les changements conceptuels, n'ont-ils pas d'ailleurs de grands traits de ressemblances avec les « révolutions scientifiques »?

Ils font aussi, à maintes occasions, référence à des illustrations issues de l'histoire pour appuyer leurs propos. On peut aisément entrevoir toute l'influence de champ de connaissances à travers leur recherche quand ils tentent de caractériser et d'objectiver les conditions dans lesquelles l'accommodation d'une conception scientifique peut être facilitée. Par une étude détaillée des conceptions d'élèves portant sur la relativité d'Einstein, ils sont ainsi parvenus à identifier quatre (4) de ces conditions.

⁵ « One major source of dissatisfaction is the anomaly. Each time a person unsuccessfully attempts to assimilate an experience or a new conception into his existing network of conceptions, that person experiences an anomaly ». (Posner et al., 1982)

- 1- L'élève doit vivre une insatisfaction quant à sa propre conception
- 2- L'élève doit voir la conception scientifique proposée comme étant intelligible
- 3- L'élève doit voir la conception scientifique proposée comme étant plausible
- 4- L'élève doit voir la conception scientifique proposée comme étant féconde

Dans leur description de ces conditions, ils expriment clairement le rapprochement qu'ils cherchent à faire avec les événements historiques. Par exemple, dans leur justification de la condition de « plausibilité », ils affirment :

« A new conception must appear initially plausible. Any new concept adopted must at least appear to have the capacity to solve the problems generated by its predecessors. Otherwise, it will not appear a plausible choice. Plausibility is also a result of consistency of the concepts with other knowledge. A new idea in, say, astronomy is less likely to be accepted if it is inconsistent with current physical knowledge or if it simply has no clear physical account. Physical scientists prior to the 20th century, for example, were reluctant to accept that geologists were claiming about the age of the world since they had no theory which would allow the sun to provide energy for that period of time. »

Posner et al. (1982)

On peut aussi rappeler leur justification de l'importance de l'anomalie pour les scientifiques tout comme, selon eux, pour les élèves :

« There must be dissatisfaction with existing conceptions. Scientists and students are unlikely to make major changes in their concepts until they believe that less radical changes will not work. Thus, before an accommodation will occur, it is reasonable to suppose that an individual must have collected a store of unsolved puzzles or anomalies and lost faith in the capacity of his current concepts to solve these problems. »

Posner et al. (1982)

Ils discutent dans les mêmes termes des sous-conditions sous lesquelles les quatre conditions principales seront remplies. Dans la citation qui suit, Posner et al. mettent en parallèle l'expérience de la pensée d'Einstein et l'importance des croyances épistémologiques de l'élève pour parvenir à changer ses conceptions :

« Metaphysical beliefs about science: Beliefs concerning the extent of orderliness, symmetry, or nonrandomness of the universe are often important in scientific work and can result in epistemological views which in turn can select or reject particular kinds of explanations. Such beliefs played a large role in Einstein's thought. »

Posner et al. (1982)

Enfin, il faut tout de même insister sur la fidélité de Posner et al. aux notions piagétienne : pour eux, l'« anomalie » est une source de conflit privilégiée; un conflit qui mène à l'accommodation.

« If taken seriously by students, anomalies provide the sort of cognitive conflict (like a kuhnian state of "crisis") that prepares the student's conceptual ecology for an accommodation. The more students consider the anomaly to be serious, the more dissatisfied they will be with current concepts, and the more likely they may be ready ultimately to accommodate new ones »

Posner et al. (1982)

Il n'est cependant pas évident ici de voir si Posner et al. cherchent à forcer la « bonne » réponse ou la « conception « scientifiquement vraie » par la mise en place des quatre conditions favorables. Si tel est le cas, comme de nombreux chercheurs ont semblé le comprendre par la suite, on pourrait ainsi deviner les positions épistémologiques davantage « positivistes » ou « empiristes » auxquels souscrivent peut-être ces auteurs. On pourrait alors reprocher au modèle d'entretenir l'aspect dogmatique des sciences, ce qui est bien peu conforme aux idées récentes de la philosophie des sciences.

Mais en fait, si on examine les ancrages théoriques de leur réflexion (Kuhn, Lakatos)⁶, on pourrait présumer du contraire. On pourrait penser que la mise en place des quatre conditions favorisera le choix d'une conception dont les pouvoirs explicatif et prédictif seront supérieurs et non de celle qui est conforme à la « matière à enseigner ». C'est cette analyse que donnent Larochelle et Désautels (1992) lorsqu'ils affirment que, par une étude épistémologique approfondie du modèle, il y a rupture d'avec l'empirisme intrinsèque au modèle précédent⁷. En effet, Posner et al. accordent une place importante aux positions épistémologiques des sujets. Ils affirment, par exemple, que pour juger une explication intelligible, plausible ou fructueuse, un individu se posera des questions d'ordre épistémologique : l'explication est-elle élégante? simple? parcimonieuse? etc. Ce genre de question est particulièrement éloigné de celle qui demande si une connaissance est « vraie » ou « fausse » et peut redonner à l'élève sa place dans le processus.

Étant donné le peu de distinction entre les éléments de l'histoire des sciences et ceux du développement des connaissances de l'individu selon Posner et al., de nombreux auteurs se sont élevés contre le modèle. Ces derniers considèrent le

⁶ Confrey (1990) n'hésite pas à classer PSHG dans la tradition des chercheurs s'inspirant de l'histoire de la science.

terrain trop glissant pour s'y aventurer puisqu'il n'est pas toujours évident qu'il est possible de confondre « paradigme épistémologique » et « paradigme d'apprentissage », de confondre « révolution scientifique » et « changement conceptuel » et de confondre l'histoire d'un chercheur ou d'une communauté de chercheurs avec celle d'un élève :

« Il est clair en particulier que les différents outils construits historiquement par la science normale ne peuvent pas être tous redécouverts par les élèves, même après qu'ils aient effectué la rupture qui les conduit au paradigme en question. Cela a deux conséquences. 1) L'enseignement doit prendre en charge l'acquisition de certains outils et de certaines règles du paradigme. 2) On ne peut se donner l'objectif de rendre les élèves capables de maîtriser par eux-mêmes les problèmes d'« élaboration théorique » des paradigmes »

Orange (1997, p.17)

« Samuel Johsua a critiqué, dans un esprit comparable, ce qu'il appelle le "mythe naturaliste" lequel imagine qu'on puisse établir un parallèle terme à terme entre le processus de découverte scientifique (chez le chercheur) et le mode inductif d'acquisition de connaissances (par l'élève). Méthode scientifique et méthode pédagogique seraient ainsi calquées l'une sur l'autre, mais une telle homologie ne se vérifie guère, pas plus pour les sciences que pour les autres domaines. »

Astolfi (1997, p.10)

Une autre critique souvent formulée à l'égard de ce modèle de changement conceptuel est qu'il déprécie aux yeux même des apprenants certaines conceptions qui jusqu'alors se sont montrées utiles et viables. Ce qu'il faudrait alors plutôt faire réaliser aux apprenants, c'est que le contexte dans lequel les connaissances scientifiques s'appliquent n'est pas le même que celui du savoir commun. Comme l'expliquent Larochelle et Désautels (1992), il s'agit de deux jeux de la connaissance différents. Il ne faut pas en arriver à juger les connaissances d'un jeu à partir des règles de l'autre. Il faudrait plutôt chercher à rendre les élèves conscients des postulats épistémologiques et des croyances métaphysiques qui contrôlent l'élaboration du savoir scientifique afin qu'ils puissent jouer le jeu de la science en toute connaissance de cause. (Laplante, 1997)

De plus, non seulement le modèle Posner et al. ne reconnaît pas la connotation affective que les individus attribuent à leurs conceptions, mais ils n'y voient rien d'autre qu'un obstacle à abattre. L'objectif est essentiellement de dévaloriser leur conception au profit d'une autre. En aucun cas il n'est fait mention qu'elles pourraient servir de point d'appui, ou que certains de leurs éléments ont déjà des

⁷ Celui de Nussbaum et Novick.

propriétés scientifiques. Même si on admet que le changement conceptuel est graduel, on insiste sur son caractère de « rupture »

« That an accommodation is a radical change does not, however, entail that it is abrupt. Indeed, there are good reasons to suppose that for students accommodation will be a gradual and piecemeal affair. Students are unlikely to have at the outset a clear or well-developed grasp of any given theory and what it entails about the world. For them, accommodation may be a process of taking an initial step toward a new conception by accepting some of its claims and then gradually modifying other ideas, as they more fully realize the meaning and implication of these new commitments. Accommodation, particularly for the novice, is best thought of as a gradual adjustment in one's conception, each new adjustment laying the groundwork for further adjustments but where the end result is a substantial reorganization or change in one's central concepts. »

Posner et al. (1982)

Quelques auteurs (Smith, DiSessa & Roschelle, 1993/94) ont récemment défendu l'idée que la perspective du changement conceptuel de Posner et al. - telle qu'elle apparaît dans la littérature de recherche - allait à l'encontre des principes constructivistes! Si les conceptions des apprenants sont si profondément et fondamentalement différentes de celles des experts, alors, comment certains d'entre eux parviennent-ils à construire des savoirs corrects, complexes et complets; des savoirs d'experts? Avec quels outils, quels leviers? Quelles peuvent être les bases de telles constructions? Ainsi, un modèle qui ne s'interrogerait pas sur les processus mis en jeu dans le changement conceptuel ne s'inscrirait pas dans une perspective constructiviste.

« ... an account of useful resources that are marshaled by learners is an essential component of a constructivist theory, but the misconceptions perspective fails to provide one. »

Smith et al. (1993, p.124)

La définition tenue jusqu'alors des conceptions s'en trouve atteinte : les conceptions ne doivent plus être des entités déterminées uniquement par leur rupture (qui mène à l'emploi de l'expression « misconceptions ») d'avec les savoirs scientifiques, comme c'est le cas dans ce modèle.

MODÈLE DE STRIKE ET POSNER
Résumé

Nouveautés : donne des pistes pour opérationnaliser le changement conceptuel (quatre conditions). Tiens compte de l'épistémologie personnelle puisqu'il faut s'intéresser aux critères que les individus évoquent pour déterminer la valeur scientifique des conceptions.

Origines théoriques : principe d'accommodation et notion kuhnienne de « révolution scientifique ».

Principe directeur d'induction de changement conceptuel : remplir les quatre conditions.

Méthode de cueillette de données privilégiée dans ces recherches : étude des conceptions, questionnaires, entrevues.

Problèmes soulevés : Promotion de l'aspect dogmatique de la conception proposée. Confusion entre un paradigme épistémologique et un paradigme d'apprentissage. Dénigration des conceptions personnelles. Évite de s'intéresser aux processus du changement conceptuel.

2.2.5 Le modèle de Hewson

Les idées avancées dans le modèle de Posner et al. ont fait de nombreux petits. Dans une version plus fine, Peter Hewson⁸ prend la peine de faire la différence entre l'« échange conceptuel » et la « capture conceptuelle ». Il indique que dans le modèle précédent (Posner et al.), on présume que la conception de l'enfant est irréconciliable avec la conception scientifique. Toujours en utilisant les quatre conditions classiques, il suggère plutôt une version où on tient compte davantage de la conception de l'apprenant en vérifiant, comme on le faisait pour la conception « scientifique », si elle répond elle aussi à un besoin d'intelligibilité, de plausibilité et de fécondité (i.e. comme on le faisait pour la conception vers laquelle on voulait faire évoluer les élèves). C'est par une comparaison du degré d'adhésion de toutes les conceptions en jeu (celles de l'élève et celles de la science) à chacune des conditions de Posner et al., qu'on peut espérer renverser leurs valeurs respectives et discréditer plus efficacement la conception « naïve » au profit de la « scientifique ».

Par exemple, si le système héliocentrique devient plus plausible, intelligible et fertile que le système géocentrique, on peut espérer qu'un changement conceptuel est davantage susceptible de se produire. C'est essentiellement par une comparaison

⁸ « A conceptual change approach to teaching science » (1981).

des valeurs relatives de ces conceptions que le conflit devient saillant et exige résolution. Cette comparaison n'apparaissait pas dans le modèle précédent.

Cette version « améliorée » s'inscrit toujours dans l'idéal de faire évoluer les conceptions vers les canons scientifiques (i.e. un certain empirisme), mais elle constitue cependant un pas supplémentaire vers la prise en compte analytique de la conception initiale. Cela ramène la conception de l'enfant un peu plus près de la conception scientifique en ce qu'elles sont présentées initialement comme sur le même pied puisque comparables et, éventuellement, réconciliables.

MODÈLE DE HEWSON Résumé
<u>Nouveautés</u> : version améliorée du modèle de Posner et al.; le changement conceptuel est graduel et non abrupt
<u>Origines théoriques</u> : mêmes que Posner et al.
<u>Principe directeur d'induction de changement conceptuel</u> : comparaison relative des conceptions en présence.
<u>Problèmes soulevés</u> : mêmes que le modèle de Posner.

2.2.6 Le modèle allostérique

L'apport essentiel de l'idée du modèle allostérique (tel que proposé par Giordan et de Vecchi, 1989) se trouve dans la définition de ce que devrait être le changement conceptuel en tant qu'opération.

Jusqu'alors, les modèles du changement conceptuel impliquaient une certaine rupture entre les savoirs « savants » et les conceptions personnelles. On allait même jusqu'à définir les conceptions des élèves sur cette base. Or, si le constructivisme exige de tenir compte de ces conceptions pour l'enseignement, les modèles semblaient suggérer implicitement que ce soit essentiellement pour faire « contre »; pour les inscrire en incompatibilité et parfois en contradiction avec les connaissances présentées. L'étude des conceptions naïves apparaissait alors essentiellement comme un outil permettant de construire des stratégies de conflit plus efficaces, de conflits plus saillants.

Or, la position allostérique propose non seulement de faire contre les conceptions, mais également « avec » elles. Le système interprétatif de l'élève est le seul dont

ce dernier puisse se servir pour chercher à appréhender de nouvelles connaissances; l'élève n'a pas le choix de procéder ainsi : il n'en a pas d'autres. L'approche allostérique contient en son sein un paradoxe apparemment inévitable : Il faut (en même temps) faire contre et faire avec les conceptions initiales. Il faut absolument se servir d'un outil pour modifier ce même outil.

Le défi peut sembler de taille. On propose l'analogie protéique : On dit d'une protéine qu'elle a un comportement allostérique si elle est à même de modifier sa forme et ses propriétés par l'apport et l'échange de substances avec son environnement. Ces échanges se produisent en des régions très spécifiques de la protéine (par exemple de l'enzyme) qu'on appelle les sites actifs. Giordan propose de chercher quels peuvent être les sites actifs des systèmes cognitifs. En effet, ces dernières ne seraient plus des blocs solides et indestructibles qu'il faut échanger, mais plutôt des organisations flexibles et évolutives qu'il faut connaître et qu'il faut faire évoluer.

Une des implications du modèle, par exemple, serait une recherche des relations susceptibles d'exister entre les structures avant et après les changements conceptuels et des relations entre les différents concepts scientifiques (qui peuvent, par exemple marquer les sites actifs). Cela répond notamment à une observation de Bachelard qui disait qu'une des raisons pour lesquelles les savoirs initiaux étaient si solides était qu'ils étaient coordonnés.

La perspective allostérique nous semble plus conforme aux principes du constructivisme en ce qu'elle s'intéresse aux structures des représentations initiales, plutôt qu'à leur seule existence ou qu'à l'étude de leurs propriétés générales⁹. Il est d'ailleurs clairement spécifié que l'accommodation ne peut d'ailleurs faire l'économie de cette connaissance.

Le modèle permet également de mettre en relief les éléments de la structure cognitive de l'élève (considérée comme structure d'accueil) qui ont déjà une certaine valeur en soi, qui peuvent servir de point de départ et qui peuvent

⁹ Comme, par exemple, les propriétés d'intelligibilité, de plausibilité et de fécondité.

contribuer à convaincre l'élève qu'il a un rôle à jouer dans son apprentissage et que ses intuitions peuvent avoir un certain crédit.

On peut sentir que le modèle, sans réellement produire des énoncés suffisamment spécifiques (comme pour le domaine de la physique, par exemple), ou suffisamment généraux (comme pour produire un modèle prescriptif pour l'apprentissage pris au sens large), permet une prise de conscience de l'importance du découpage des conceptions en leurs éléments constitutifs¹⁰ et de l'utilisation de ces éléments dans l'apprentissage¹¹.

MODÈLE ALLOSTÉRIQUE
Résumé

Nouveautés : les conceptions ne sont pas des blocs solides à interchanger; elles sont des structures « vivantes ». Le changement conceptuel est un processus continu.

Origines théoriques : contributions de Bachelard et Piaget

Principe directeur d'induction de changement conceptuel : agir sur les « sites actifs » des conceptions. Ex : chercher les relations avec les autres savoirs, déterminer et identifier les incertitudes.

Problèmes soulevés : paradoxe : comment faire « avec » et « contre » les conceptions en même temps?

2.2.7 Le modèle de Larochelle et Désautels

Ce modèle, qui s'inspire notamment des travaux de Von Glasersfeld sur le constructivisme radical, donne une place privilégiée au statut épistémologique des connaissances considérées. Si le constructivisme trivial¹² exige de prendre en compte les structures interprétatives (du réel) présentes chez les sujets avant leur entrée en classe, le constructivisme radical oblige une prise en compte du statut épistémologique de toutes les conceptions considérées respectivement.

« Être constructiviste, c'est partager deux convictions qui traduisent l'essentiel de ce mouvement. La première consiste en ce que le savoir ne peut pas être transmis passivement, mais qu'il doit être construit activement par le sujet-en-quête-de-connaissance. La seconde, c'est que la cognition doit être vue comme une fonction adaptative qui sert à l'organisation du monde de l'expérience plutôt qu'à la découverte d'une réalité ontologique. Selon Glasersfeld, cette position est celle du constructivisme radical, le constructivisme trivial ne partageant que la première des deux convictions. »

Larochelle et Désautels (1992, p.26)

¹⁰ Comme pour la perspective de DiSessa, décrite plus loin.

¹¹ i.e. un changement conceptuel inscrit dans la continuité.

¹² On peut aussi l'appeler le « constructivisme psychologique ».

Ainsi, si la cognition est une fonction adaptative plutôt qu'un appareil de « découverte », on dira des conceptions qu'elles sont « viables » (Glaserfeld, 1994) plutôt que « scientifiques ». La viabilité des conceptions ne serait relative qu'au contexte qui les a vues apparaître et/ou dans lequel elles sont employées. Il y a donc une forte tendance à n'accorder aux conceptions aucune « valeur » qui soit objective, si ce n'est celle que daignent leur attribuer les apprenants dans des circonstances toutes particulières.

Ce serait d'ailleurs ce contexte épistémologique particulier qui rend les conceptions personnelles si stables, malgré leur inefficacité relative, leurs contradictions internes et externes possibles, et même au-delà d'un conflit cognitif si efficace soit-il. En effet, les individus qui les emploient, s'ils ne peuvent reconnaître et analyser le cadre épistémologique à l'intérieur duquel ils construisent habituellement leurs idées, ne seront pas susceptibles de souscrire à de nouvelles perspectives et de nouvelles représentations.

Dans cette optique, les seules connaissances qui portent l'étiquette « scientifiques » sont celles qui sont admises comme telles par la communauté scientifique. Quant aux conceptions « viables », elles auront été élaborées et jugées par une micro-communauté de chercheurs dans la classe. C'est une vision toute démocratique de l'élaboration de la connaissance que nous proposent Larochelle et Désautels. (Bertrand, 1998)

Ces derniers ont choisi, par leur modèle du dérangement épistémologique, et puisque les conceptions ne peuvent pas être facilement déracinées de leur environnement, de s'intéresser à leur contexte épistémologique d'apparition. L'explicitation de ce contexte apparaissant comme une nouvelle condition essentielle au changement conceptuel. On invite alors les personnes à préciser les fondements de leurs explications, à réfléchir sur les limites de ces fondements et leur validité et à se construire collectivement, à l'instar des communautés scientifiques, des critères et des règles d'acceptation des modèles. (Larochelle et Désautels, 1992)

Plus besoin de déprécier la valeur des conceptions de qui que ce soit! Pour faire évoluer les conceptions de quelqu'un, il devient nécessaire de lui faire prendre conscience du statut épistémologique (cadre épistémique d'apparition) de ses propres connaissances et de lui faire reconnaître l'intérêt et la possibilité de considérer les postulats et les règles d'autres jeux de la connaissance, dont celui du savoir dit « scientifique¹³ ». C'est donc une certaine forme de métacognition.

« Il faudra plutôt concevoir le développement des compétences intellectuelles qui permettent de repérer les cadres épistémiques en jeu et, ainsi, distinguer les contextes d'utilisation du savoir en jeu (...) Le résultat de ce processus n'est alors pas l'élimination ni la négation de la valeur du savoir commun mais plutôt sa relativisation entendue dans le sens d'une spécification de son contexte approprié d'utilisation. De façon symétrique, c'est aussi la relativisation du savoir scientifique, puisque ce dernier est alors conçu comme le résultat d'une construction fondée sur un autre ensemble de postulats, et répondant à des préoccupations précises.(...) Car, somme toute, le problème ne réside ni dans les conceptions antérieures des apprenants ni dans celles qu'on leur propose dans un enseignement formel. C'est plutôt la méconnaissance de la nature des unes et des autres qui pose un problème et qui peut conduire à les considérer comme interchangeable, alors que ces conceptions, tout en procédant toutes deux de contingences cognitives et sociohistoriques, divergeant grandement quant à l'itinéraire de leur production et de leur reconnaissance. »

Larochelle et Désautels (1992, p.28)

Ces derniers proposent essentiellement de reprendre les quatre conditions de Posner et al., mais d'y ajouter le dérangement épistémologique. Les composantes « conflit » et « déséquilibre » sont encore présentes, mais, pour rendre le conflit encore plus saillant, on propose de mettre en place toute stratégie possible pour que l'élève comprenne le cadre épistémique qui a donné naissance aux conceptions en jeu. C'est-à-dire, en fait, qu'on s'interroge, dans ce modèle, sur les règles générales du grand jeu de la connaissance et non sur l'épistémologie particulière de chaque conception.

Par exemple, dans l'étude de la chaleur, les élèves utilisent couramment la conception « la laine est chaude et le métal est froid » et présentent ces propriétés comme étant de véritables qualités permanentes et intrinsèques de ces objets; un peu comme la couleur, ou la masse. Pour les tenants du dérangement épistémologique, il ne suffirait pas de mettre en conflit cette conception avec une expérience qui impliquerait des mesures thermométriques, de croiser les doigts et d'espérer l'accommodation; il faudrait aussi mettre en place des stratégies qui

¹³ i.e. tel qu'admis par la communauté scientifique.

mettent en évidence les cadres épistémiques généraux qui ont permis l'existence de cette conception. Dans ce cas du « métal froid », il s'agirait probablement, par exemple, d'exposer aux élèves le fait que l'explication fréquemment employée par « monsieur tout le monde » pour cerner les effets calorifiques donne un statut de valeur substantielle aux sensations physiques¹⁴. Pour Larochelle et Désautels, cette opération de mise en évidence est indispensable pour assurer la durabilité du changement.

« Cette stratégie (dérangement épistémologique) consiste à promouvoir une réflexion critique sur les postulats et les finalités qui orientent toute production de la connaissance, dont celle du savoir scientifique »

Bertrand (1998, p.86)

Cependant, comme le souligne Laplante (1997), ce qui est remarquable à propos de ce dernier modèle, c'est sa complexité et le défi que pose sa mise en oeuvre en milieu scolaire. Bien sûr, le modèle a été mis à l'essai en classe, mais souvent dans des situations assez différentes de celles rencontrées dans les classes du primaire ou du secondaire où, entre autres, les enseignants et les enseignantes généralistes travaillent avec des groupes d'élèves de plus en plus nombreux. C'est en partie ce qui a amené certains chercheurs à remettre en question la faisabilité didactique de certains de ces modèles pédagogiques (Arcà et Caravita, 1993; Astolfi et Peterfalvi, 1993). Comme le souligne Duit (1995), les stratégies d'orientation constructiviste connaissent des succès limités. De plus, elles ne rendent pas l'enseignement et l'apprentissage des sciences plus aisés, au contraire, elles créent même des situations plus exigeantes pour les acteurs qui s'y engagent.

On pourrait même aller jusqu'à se demander si le « dérangement épistémologique » constitue un objectif raisonnable pour l'enseignement secondaire. Si cette stratégie autorise une prise de conscience fort intéressante pour le scientifique et l'enseignant, il n'est pas évident que l'élève du secondaire, déjà quelque peu « empêtré » dans sa quête de sens des phénomènes naturels, puisse véritablement utiliser une telle métaconnaissance.

¹⁴ Il serait aussi nécessaire de préciser le cadre épistémique d'apparition de la conception proposée (par le professeur ou les pairs), afin que l'élève puisse reconnaître une différence supplémentaire dans les conceptions présentées.

Le statut de la conception initiale est cependant fort intéressant. Celle-ci n'est plus à détruire. On reconnaît plutôt sa valeur dans le contexte interprétatif particulier qu'est le quotidien. Il n'est pas même réellement question de la dissiper, mais plutôt de l'analyser afin de pouvoir reconnaître dans quel contexte elle prend sa valeur et sa signification.

« En somme, il s'agit de conceptions différentes qui sont pertinentes à l'intérieur de certaines conditions et le problème qui se pose alors n'est pas celui de la substitution d'une conception scientifique à une conception spontanée, mais bien celui de la discrimination des tenants et aboutissants de certaines conceptions »

Larochelle et Désautels (1992, p.42)

Bien sûr, on peut compter le danger de tomber dans un relativisme absolu, qui considérerait que finalement, toutes les conceptions se valent et que toutes ne sont en fait que des gribouillis parmi d'autres (Thouin, 1996). Dans cette perspective, l'astrologie, la numérologie et l'homéopathie auraient leur viabilité propre (dans leur contexte). Bien sûr, pour employer une métaphore citée par Larochelle et Bernarz (1994), la carte n'est jamais le territoire, mais ne faut-il pas admettre que les représentations « canons de la science », permettent un progrès technologique et des avancées dont il est bien difficile de douter? Et, d'ailleurs, comme le disait Sokal : « Tous ceux qui croient que les lois de la mécanique sont des constructions mentales sont invités à venir le vérifier depuis la fenêtre de mon appartement (j'habite au 21^{ème} étage) ». (Gardner, 1997 p.13)

Ainsi, le « discrepant event » (de Nussbaum et Novick) prendrait encore une fois une nouvelle signification : il n'est plus une anomalie dans le sens d'un manque ou d'une faute: il est le produit de ce cadre interprétatif même qui fait habituellement montre d'un pouvoir explicatif. La contradiction ne vient pas de l'extérieur (le prof, la réalité¹⁵), mais de l'intérieur (structure conceptuelle déjà présente).

Il est finalement fort intéressant de voir que le modèle du dérangement épistémologique implique une composante sociale importante. Dans les études menées par Larochelle et Désautels, il va pratiquement toujours de soi que la valeur relative des conceptions soit discutée (ce qui n'est pas sans rappeler [ou

¹⁵ Ce qui permet probablement d'éviter certains effets de contrat et le sentiment d'humiliation pouvant survenir quand un élève « met sur la table » ses conceptions et qu'il les voit se faire discréditer.

appeler?] la perspective socio-constructiviste dont il sera question plus tard dans le texte). Si une accommodation se produit, elle devra se faire un peu à l'image de ce qui se passe dans la communauté scientifique (c'est-à-dire par admission sociale de sa « viabilité »), car, en réalité, il faut bien admettre que la boîte noire ne s'ouvre jamais.

MODÈLE DE LAROCHELLE ET DÉSAUTELS
Résumé

Nouveauté : Ce sont les individus qui déterminent la valeur des conceptions.
Origines théoriques : constructivisme radical de Von Glasersfeld.
Principes directeurs d'induction de changement conceptuel : Détermination de la « viabilité » de conceptions par des individus ou des communautés à l'intérieur de « cadres épistémiques ». Réflexions explicitées sur les processus de la pensée.
Méthode de cueillette de données privilégiée dans ces recherches : entretiens cliniques devant des problèmes épistémologiques. Étude d'« itinéraires cognitifs ».
Problèmes soulevés : difficultés d'application dans la réalité de la classe. Relativisme absolu difficile à faire coexister avec les habitudes scientifiques.

2.2.8 La perspective du conflit socio-cognitif

Il ne saurait être question, du moins dans tous les cas, de présumer que les conflits que vivent les individus à l'intérieur de leur structure conceptuelle personnelle soient suffisants pour produire à tout coup des changements conceptuels. D'ailleurs, l'épistémologie contemporaine ne nous indique-t-elle pas que les connaissances scientifiques sont nécessairement soumises au jeu social de la communauté scientifique? Une expérience au résultat nouveau n'est-elle pas d'ailleurs sanctionnée uniquement lorsqu'elle a pu être reproduite par d'autres laboratoires? Les paradigmes (au sens de Kuhn) ne doivent-ils pas passer l'épreuve du temps et du nombre pour être considérés comme plus « vrais » ou plus « scientifiques »?

L'idée que le conflit puisse être provoqué par l'idée divergente d'un alter est présente dans de nombreux modèles exposés précédemment. Nussbaum et Novick ont introduit leur « discrepant event » dans la leçon, mais ont laissé les élèves débattre de l'explication entre eux. Dans le modèle allostérique, la composante sociale est aussi omniprésente. Dans plusieurs des travaux décrits dans « Les origines du savoir » de Giordan et de Vecchi (1987) sur (notamment) la

calorimétrie, on s'est efforcé de mettre « sur la place publique » les différents concepts des élèves avant la tenue de quelque manipulation que ce soit. Ainsi :

« (...) la confrontation des idées entre les élèves les oblige à justifier ce qu'ils avancent, et, éventuellement, dans un second temps, à imaginer des observations ou des expériences pour confirmer ou infirmer aussi bien leurs propos que ceux des autres »

Giordan et de Vecchi (1987, p.49)

Et que dire des expériences de Larochelle et Désautels sinon que les interactions sociales (notamment dans l'expérience du modèle de la boîte noire [Désautels et Larochelle, 1992]) y sont particulièrement présentes?

C'est cependant à l'intérieur du modèle du conflit socio-cognitif que ce souci du conflit d'origine sociale occupe l'essentiel de l'intérêt. C'est dans les suites des travaux de Piaget et de Vygotsky (sur l'origine socio-historique des connaissances) que ce mouvement prend forme. Ses tenants, tous constructivistes, se nomment Doise, Mugny, Perret-Clermont.

« Dans une théorie comme la théorie piagétienne, le modèle explicatif est un modèle binaire; alors que dans la thèse du conflit socio-cognitif, il s'agit d'un modèle ternaire. Le conflit producteur de progrès dont nous parle la théorie piagétienne est un conflit psychologique, qui résulte des confrontations et contradictions entre les actions ou anticipations du sujet et les observables ou les résultats de son action (...) on remarquera que les défenseurs de la thèse du conflit socio-cognitif n'ont jamais dit que de tels conflits, de nature exclusivement intra-individuelles, ne sont pas nécessaires, mais ils affirment qu'ils ne peuvent être tenus pour suffisants et qu'à certains moments-clés du développement la cause première des progrès individuels n'est pas à chercher dans les confrontations intra-individuelles, mais dans les contradictions inter-individuelles. »

Michel Gilly in Astolfi et al. (1997, p.39)

Il faut ici prendre la peine de citer l'étude de Perret-Clermont (1988) sur la conservation des volumes. En demandant à des triades d'élèves de diviser le contenu de jus en trois parts égales dans des contenants inégaux, on s'aperçoit que le conflit socio-cognitif (le seul possible dans cette expérience) qui survient alors, permet certaines accommodations. L'interaction sociale, forcée par l'existence d'une seule solution possible (et qu'il faudra justifier!) a eu un effet positif sur l'évolution des conceptions : Plusieurs d'entre eux ont pu développer une conception adéquate (ou devrait-on dire ici « équitable »?) concernant la conservation du volume des liquides.

Il faudra ici noter une contrainte qui n'apparaît pratiquement jamais dans la littérature sur le conflit socio-cognitif (peut-être parce qu'elle va de soi pour les auteurs): c'est-à-dire que pour que celui-ci soit efficace, il doit y avoir un moyen de sanctionner les discussions (expérience, modèle, démonstration ou à la limite, le discours du professeur). Si une discussion a lieu et qu'elle n'est pas balisée ou qu'aucune « mise à l'essai » ne permette de trancher ou de sanctionner les hypothèses, alors la discussion peut, au lieu de mener à bon port, faire dériver sérieusement ceux qui y prennent part. C'est ce qu'Hynd et al. ont découvert dans une étude sur l'effet de plusieurs variables relatives aux conflits :

« Although it seems reasonable that having students see a demonstration, discussing their ideas in group, and reading a text would be the best approach for a science teacher to take, participating in all three instructional modes was not the most conducive to learning in this study. Students who saw the demonstration and read the text outperformed students who participated in all three activities. (...) It may be that when counterintuitive physic concepts are introduced, teachers need to be a part of the discussion that takes place. (...) Where naive concepts are present, student-to-student discussion may result in the solidification of old concepts or the learning of new nonscientific ideas. »

Hynd et al. (1994, p.21)

Cette dérive peut simplement faire montre d'un caractère contre-productif, mais elle peut également faire apparaître des modélisations particulièrement éloignées des canons de la communauté scientifique. C'est un souci particulier pour les tenants d'un constructivisme non radical, puisque l'objectif est pour eux une progression vers une vision plus scientifique des phénomènes.

Pour les promoteurs de la perspective du conflit socio-cognitif, le savoir initial des apprenants est véritablement considéré comme un point d'appui car c'est lui qui permet de construire des objections, d'évoquer des justifications, et même, à la limite, de se construire un protocole de vérification. Le savoir de l'enfant participe à la démarche et le savoir construit à l'issue des discussions est un savoir « scientifique » au sens qu'il est construit et validé par une communauté de « chercheurs »... Puisque la boîte noire reste encore fermée...

Il est cependant d'avis, pour Laplante (1997) que les situations d'enseignement et d'apprentissage qui font appel aux notions de conflit socio-cognitif et d'obstacle épistémologique sont très exigeantes pour ceux et celles qui y participent, ne

serait-ce qu'en raison du travail qu'elles supposent sur les plans épistémologique et affectif.

MODÈLE SOCIO-CONSTRUCTIVISTE Résumé
<u>Nouveauté</u> : la conception du savoir exige la prise en compte de la communauté
<u>Origines théoriques</u> : Piaget, perspective socio-historique de Vygotsky
<u>Principe directeur d'induction de changement conceptuel</u> : Le conflit cognitif et l'apprentissage sont nécessairement déclenchés par la présence d'alters
<u>Méthode de cueillette de données privilégiée dans ces recherches</u> : Entrevues cliniques en dyades, en triades.
<u>Problèmes soulevés</u> : activités exigeantes à soutenir. Il existe un danger réel de dérive si les discussions ne sont pas dirigées.

2.2.9 Synthèse des modèles de changement conceptuel

Les activités issues de la perspective constructiviste peuvent paraître, a priori, fort intéressantes et ce, pour de nombreuses raisons.

Premièrement, elles s'adressent à l'élève directement et le mettent au centre du processus d'apprentissage. L'élève se voit attribuer non seulement un rôle actif important dans l'élaboration de son propre savoir, mais parfois aussi dans le choix et la construction des savoirs « institutionnalisés » par la micro-communauté scientifique que constitue la classe. Dans cette participation toute personnelle, il est appelé à reconnaître l'existence et l'intérêt de ses intuitions et de son savoir initial. Il est à prévoir que cette mise en valeur de son apport aura des effets positifs sur sa motivation.

Deuxièmement, certains des modèles présentés plus haut initient les élèves à des réflexions toutes métacognitives : Quelles peuvent être les propriétés des savoirs? comment se développent-ils? Qu'est-ce qu'une connaissance scientifique? Quels sont les critères qui font d'une connaissance un meilleur pari qu'une autre? Quelles sont les caractéristiques de mon épistémologie personnelle? Comment est-ce que je pense? Ces questions philosophiques entraînent des réflexions dont le produit n'est pas sans intérêt pédagogique.

Enfin, ces modèles amènent des changements importants dans la façon dont les choses se déroulent en classe en favorisant une négociation plus grande des processus et des contenus d'apprentissage. Il s'agit donc de modèles qui mènent à l'élaboration d'un contexte d'apprentissage très riche et émancipateur pour ceux et celles qui y participent, qui changent non seulement le rapport au savoir, mais également le rapport au pouvoir. (Laplante, 1997)

Pourtant, comme le suggèrent Larochelle et Bednarz (1994), l'intégration de la thèse constructiviste au renouvellement des pratiques éducatives demeure marginale. Pour contrer cet état de fait, on suggère non seulement d'induire des changements dans les pratiques pédagogiques des enseignants, mais également dans leurs réflexions épistémologiques. C'est par des prises de conscience non seulement sur la nature épistémologique de l'apprentissage, mais aussi sur celle de la connaissance, qu'on peut espérer briser le cycle par lequel les enseignants reproduisent ce qu'ils ont vécu à l'école, c'est-à-dire la croyance en la nature exclusivement accumulative du savoir et en un positivisme pratiquement absolu¹⁶.

Ainsi, il est de l'avis de Laplante (1997) comme de Matthews (1994) qu'il faudrait d'abord amener les enseignants et enseignantes à réfléchir de façon critique à leur enseignement faisant intervenir des images, des métaphores, des croyances et des valeurs pour qu'ils en arrivent à repenser leur rôle dans la classe. Plus spécifiquement, il faudrait les amener à prendre conscience de leurs conceptions de la science, de l'enseignement, de l'apprentissage et à voir comment ces conceptions orientent les stratégies pédagogiques mises en oeuvre dans leur classe. Il faudrait même les amener à reconsidérer certains aspects de leur épistémologie personnelle.

Ce n'est que dans un tel contexte que de nouveaux modèles pédagogiques d'orientation constructiviste pourraient leur être présentés et faire l'objet d'expérimentation dans leur classe. Tout en continuant leur enseignement et leur réflexion, en développant de nouvelles images et métaphores décrivant leurs rôles changeants, les enseignants et enseignantes pourraient en arriver à construire une

¹⁶ Tel qu'il a été observé, par exemple, par Larochelle et Désautels en 1998

vision personnelle de l'enseignement et de l'apprentissage dans un contexte constructiviste et prendre les mesures nécessaires pour la réaliser.

La perspective constructiviste telle que présentée par Piaget, a non seulement légué aux chercheurs et enseignants des lignes directrices intéressantes, mais aussi des zones grises et des interrogations aux allures chroniques : comment rendre un modèle véritablement conforme aux promesses des théories sur l'accommodation? Quels sont les moyens de véritablement se libérer de l'empirisme? Dans quelle mesure (triviale ou radicale) le constructivisme doit-il diriger nos entreprises de recherches et nos entreprises d'enseignement pour être efficace tout en demeurant réaliste? Il n'est pas facile de savoir naviguer entre une vérité absolue qui n'existe pas et une réalité qu'on ne peut qu'approximer.

Les chercheurs se sont efforcés de matérialiser le constructivisme à travers leurs expériences diverses et à travers différents ancrages : approches sociologiques, historiques, épistémologiques, psychocognitives, intelligence artificielle, etc. On peut sentir que le « débat des modèles » qui est issu d'une telle diversité permet, à chaque nouveau projet, à chaque nouvelle perspective, une prise de conscience, un véritable « méta-conflit cognitif », qui, on l'espère, finira par voir une certaine accommodation se produire.

Un peu comme c'est le cas en épistémologie des sciences, on remarque aussi que les modèles accordent de plus en plus de place à l'être humain... Le maître comme l'élève, et que la science (en classe comme dans la communauté scientifique) est de plus en plus perçue comme une activité d'élaboration plutôt que de découverte, de discussion et d'échange plutôt que de solitude. Le statut des conceptions initiales évolue, de la « mauvaise herbe » jusqu'au « tremplin » et, systématiquement, on s'interroge désormais sur leur constitution et sur leur origine.

Mais les difficultés de ces modèles ne se matérialisent pas qu'en leur difficulté d'administration en contexte pratique. Certaines lacunes apparaissent saillantes quand on tente d'analyser leur réel apport au contexte théorique de l'apprentissage. Nous ferons ici état de ces lacunes. Leur mise en évidence

prépare le terrain à une justification du choix de la perspective de DiSessa comme cadre interprétatif.

a) La fugacité des définitions

Premièrement, il convient de remarquer que les modèles font intervenir des notions sur lesquelles il est difficile d'avoir prise, des idées dont la définition n'est pas claire. Les tentatives de définitions de « conception » (qu'elle soit étiquetée de « spontanée », de « naïve », ou de « scientifique »), par exemple, font intervenir d'autres concepts flous. Il y est question de structure, de représentation, de viabilité et de cohérence. Bien que ces mots rappellent leurs ancrages théoriques dans un paradigme constructiviste, leur contribution à l'opérationnalisation de la notion de conception est loin de pouvoir être qualifiée de manifeste.

La notion de changement conceptuel est elle-même sujette à des interprétations variées. Parfois, elle est conçue comme un échange et parfois comme une évolution, mais cette distinction n'est pas toujours faite. L'emploi de cette expression semble applicable à tout type d'apprentissage de rupture : des légers « ajustements » jusqu'aux véritables « conversions¹⁷ ».

En plus de mettre en scène des concepts « mous », les modèles, d'inspirations diverses, ne semblent pas s'entendre sur les rapports qu'il peut y avoir entre les diverses connaissances pouvant coexister à l'intérieur du paradigme. Ainsi, les objectifs du changement conceptuel (i.e. l'apprentissage de nouvelles conceptions) ne peuvent être bien cernés : faut-il considérer les rapports entre les concepts initiaux et les concepts souhaités comme des rapports novice/experts, comme des relations particulier/universel ou comme une différence entre des savoirs au pouvoir restreint et d'autres plus performants?

Chaque modèle, pour être utilisable et pour être cohérent, doit être nécessairement identifié à son auteur. Si elle est prise comme un tout, la perspective du changement conceptuel fait montre d'une désorganisation exemplaire qui ne peut

¹⁷ Dont parlait Bachelard (1967)

qu'en peu de choses guider une intervention pédagogique, un traitement didactique ou un programme de recherche.

« Dans cette littérature où les éléments sont parfois mentionnés et rarement rassemblés, il n'existe pas d'unité, de langage commun ou de ligne directrice. Novak et al. (1994) sont d'avis que la recherche sur le changement conceptuel est disjointe, manque 1) de cohésion et 2) d'un paradigme clair. »

Potvin (1998, p.111-112)

b) Les problèmes de la notion de « conception »

Malgré son caractère flou, la notion de conception a inspiré de nombreux programmes de recherche qui ont abouti en de riches répertoires. Cependant, la constitution de ces répertoires est basée sur la récurrence des conceptions chez de nombreux individus. Les conceptions fréquentes et courantes deviennent alors l'objet d'études supplémentaires. Or, il n'est pas rare, surtout en physique, de voir de nombreuses conceptions apparaître dans une même classe. À la limite, il y a autant de conceptions que d'individus pour un même phénomène. Ne faire l'étude que des conceptions récurrentes ou fréquentes, on l'a dit, c'est aussi perdre la finesse de la réalité.

Dans ces répertoires, les conceptions apparaissent telles qu'elles sont verbalisées par les individus. Or, la tentation de réduire les conceptions aux mots qui les décrivent constitue également un danger. De nombreuses conceptions échappent au pouvoir descriptif des mots. On peut voir en de nombreuses occasions des individus éprouver de la difficulté à verbaliser leurs intuitions, sans pour autant hésiter quand vient le temps de produire une prédiction. En paradoxe, les mots permettent à des intuitions de se formaliser, mais simultanément, en raison de leur sens particulier (et donc restreint) et de leurs multiples combinaisons et agencements, on ne peut présumer que les mots décrivent toujours bien la pensée. Qui sait le nombre d'idées qui ne seront jamais bien verbalisées? (ou même verbalisées tout court). L'intuition et la bouche ne parlent pas toujours la même langue. L'étude du fonctionnement de l'intuition (plutôt que l'examen des conceptions déjà répertoriées) est peut-être la meilleure clé de la connaissance des processus constructivistes. On admet d'ailleurs qu'il existe de nombreuses conceptions qui échappent aux répertoires. Or, l'intuition, bien qu'apparaissant

dans les études sur le changement conceptuel, ne fait en aucun cas figure d'objet. On se contente de la mentionner au passage ou d'employer l'adverbe « intuitivement » pour décrire les actions des sujets.

DiSessa fait d'ailleurs remarquer que l'ensemble des conceptions, quelles qu'elles soient, ne laisse pas apparaître les distinctions possibles en son sein. Les conceptions sont plutôt considérées comme faisant ou non partie de la catégorie des conceptions, peu importe leur origine, les mécanismes qui leur ont donné naissance ou le domaine de l'activité scientifique qui les concerne, ce qui ne contribue en rien à les rendre utilisables. DiSessa nous illustre le problème en indiquant que connaître le concept de « chien » est fort probablement différent de connaître une « force » en physique. En effet, il est possible de se faire une représentation prototypique d'un chien (exemple : un coolie ou un berger allemand), mais ce n'est pas aussi évident pour le concept de force. C'est le cas également pour les concepts de « religion » et d' « angle » ou de « crayon » et de « nombre ». L'auteur ne tente pas d'établir une typologie, mais se sert plutôt de ces exemples pour illustrer l'erreur qui consiste utiliser et à confondre n'importe quelle représentation en « conception ». Comme illustration supplémentaire, on peut mentionner que les conceptions originant de la biologie, par exemple, ne possèdent pas le même statut épistémologique que celles issues de la physique. Une éventuelle confusion peut contribuer à rendre la notion de « conception » encore plus grossière. Giordan (1999) également nous met en garde contre une sclérose du terme « conception » et nous invite à relativiser l'idée.

Il est possible que cette sclérose de la « conception » tienne au fait que cette notion ait pratiquement été élevée au rang d'« unité de base » de la compréhension. Elle est présentée comme un objet unitaire et monolithique (Cervera 1997), un objet qu'il faut faire passer d'un état statique à un autre. Or, les conceptions ne semblent pas toutes revêtir cette caractéristique. Elles peuvent, tout au contraire, être perçues comme étant particulièrement flexibles et dynamiques. La forme qu'elles prennent s'est avérée particulièrement adaptable. On peut ainsi voir des conceptions apparaître d'une manière apparemment tout à fait spontanée. Certaines conceptions en physique-mécanique, par exemple, peuvent se construire sur commande et au besoin. On les voit se transformer (voire

même se scinder) rapidement pour interpréter une réalité ou un phénomène. Elles ne sont donc pas nécessairement aussi stables que pourrait le suggérer la littérature sur le changement conceptuel. (DiSessa, 1993)

Considérées comme « unité de base » de la compréhension, les conceptions ne font pas souvent objet d'analyse, tout comme si elles étaient d'une seule pièce ou comme si elles étaient absolument fondamentales. Cette connotation atomique empêche de voir les conceptions comme pouvant être décortiquées. Elle interdit une analyse supplémentaire et marque l'arrêt de l'investigation. Malgré un nombre impressionnant de conceptions répertoriées à ce jour, on ne sait toujours pas de quoi elles sont faites. Tout comme pour l'étude de l'atome, dont le nombre d'éléments découverts a un jour semblé ne plus avoir de fin, il s'agit maintenant de s'intéresser aux protons, électrons et neutrons... Ainsi qu'aux forces nucléaires.

c) La négligence des processus à la base du changement conceptuel

Certaines critiques ont récemment été formulées quant à la conformité de la perspective de changement conceptuel aux principes constructivistes. Par exemple, même si de récents modèles (comme le modèle allostérique) s'inscrivent de plus en plus sous le signe d'une évolution conceptuelle plutôt que d'un échange de conceptions, la majorité d'entre eux voient le processus comme une rupture. On définit souvent, en effet, les conceptions des élèves comme en incompatibilité, voire même en contradiction avec les conceptions « scientifiques ». Dans un tel contexte, comment pouvoir expliquer l'existence d'experts? Avec quels outils ces derniers sont-ils parvenus à s'affranchir de leurs conceptions naïves pour faire le bond vers le savoir institutionnalisé? Doit-on concevoir leur formation comme une succession de « révolutions scientifiques » apparentées à des « changements de paradigmes »? Ou doit-on plutôt imaginer une succession d'étapes intermédiaires, du plus naïf au plus complexe, qui sont des approximations successives et graduelles vers les conceptions « scientifiques »?

L'issue des stratégies basées sur le conflit cognitif ne demeure souvent que sous le signe de la description. On donne ainsi des airs de tour de magie ou de recette au changement conceptuel : « mettez-y les ingrédients nécessaires et le changement

se produira spontanément! ». Certains modèles se concentrent ainsi sur des descriptions des conditions qui, de l'extérieur, sont supposées pouvoir produire des accommodations efficacement.

Plusieurs de ces présentations axiomatiques des conditions favorables au changement conceptuel sont particulièrement présentes dans la littérature américaine. Il a bien été dit que la connaissance des primitives était le premier pas vers le changement (de la même façon que la connaissance d'un piège est le premier pas vers son évitement), mais il n'a pas été avancé que l'étude des contingences d'apparition, d'existence et de renforcement mêmes des conceptions (ex: propriétés, critères de validité et de scientificité, développement, fonctionnement) pourraient servir pour construire une stratégie de développement des connaissances basée sur les mêmes paramètres. C'est-à-dire que les modèles actuels ne s'intéressent que très peu aux processus qui font d'une conception une idée à laquelle on adhère. C'est précisément ce que DiSessa et ses collaborateurs (1993) reprochent au paradigme.

Bien que certains, comme le modèle allostérique, insistent sur l'importance et le rôle du savoir précédent dans la construction du savoir suivant, aucun d'eux n'offre un vocabulaire ou des outils théoriques pour décrire cette transition. La perspective du changement conceptuel se voit donc dans l'impossibilité 1) d'expliquer l'origine des conceptions, 2) d'expliquer la récurrence générale de certaines conceptions, ni les différences particulières pouvant apparaître d'un individu à l'autre, 3) de donner un rôle aux savoirs naïfs dans la construction des savoirs d'experts, 4) de donner un rôle à l'intuition dans les connaissances scientifiques, 5) d'expliquer les intuitions naïves quand elles s'avèrent correctes et 6) de savoir si une proposition de changement conceptuel pour un public particulier est raisonnable (i.e. s'il se situe dans la « zone proximale » de Vygotsky).

d) La négligence de l'épistémologie personnelle

Les modèles du changement conceptuel, qui sont basés sur la psychologie de Piaget, ne font intervenir que rarement les considérations d'épistémologie personnelle. Ces dernières font rapidement objet d'étude dans le modèle de

Posner et Strike (1982), mais elles sont largement basées sur la « grande » épistémologie; celle qui s'inspire de critères de scientificité de la communauté scientifique. En utilisant cette théorie, le changement conceptuel est perçu comme étant conduit par l'évaluation rationnelle de revendications de savoirs opposés. Comme les révolutions de Kuhn, le changement vécu par l'apprenant est perçu comme étant holistique en ce qu'une conception est complètement abandonnée pour l'usage d'une autre, plus utile¹⁸. » (Demastes et al., 1995) On postule que les difficultés rencontrées par la communauté scientifique pour accepter les théories sont également rencontrées par un élève qui se les approprie.

Même si le rapprochement peut constituer un éclairage intéressant pour l'enseignant et pour le chercheur qui cherche à comprendre l'évolution des idées, il paraît hasardeux de tenter de calquer le développement des conceptions des élèves sur le modèle collectif; les considérations culturelles, fonctionnelles, et les cadres épistémologiques n'étant pas les mêmes pour les individus que pour les communautés. (Potvin, 1998; Johsua et Dupin, 1993; Orange, 1997, Johsua, 1985 et le « mythe naturaliste ») Il semble aujourd'hui accepté que les véritables ruptures que sont les révolutions scientifiques ne suffisent plus à expliquer le développement des connaissances par les individus. On peut d'ailleurs sentir ici le danger d'un passage trop direct d'un paradigme épistémologique à un paradigme d'apprentissage¹⁹.

¹⁸ Trad. de l'anglais: « The conceptual change theory of Posner et al. (1982) uses the model of Kuhn's (1970) scientific revolutions to explain the change of major, organizing conceptions within the learner. Using this theory, conceptual change is thought to be driven by the rational evaluation of opposing knowledge claims. And like Kuhn's revolutions, the change experienced by the learner is understood to be holistic in which one conception is completely abandoned for use of another, more useful conception. » (Demastes et al., 1995)

¹⁹ « Les contributions de Villani (1991) et plus récemment de Demastes (1995) permettent de voir les tendances actuelles vers lesquelles semble se diriger la recherche du changement conceptuel et du conflit cognitif. En effet, ces deux auteurs insistent sur le fait que ces théories (celles de Posner et al. et compagnie) sont basées sur le fait que l'apprenant effectue ses choix de conceptions sur des bases logiques et rationnelles, ce qui ne semble pas être le cas. Leurs propres résultats cependant laissent supposer que les élèves ne procèdent pas du tout par logique rationnelle: « Même si les participants étaient rationnels, ils n'opéraient pas à l'intérieur des notions traditionnelles de rationalité (...) Nos données suggèrent qu'il y a des cas où la logique joue un rôle secondaire aux considérations affectives, aux buts et motivations de l'apprenant¹⁹. » (Demastes et al., 1995) De la même façon, la logique semble subordonnée aux considérations épistémologiques. L'élève croit agir logiquement, mais il le fait dans une structure cognitive scientifiquement déficiente. Le résultat, malgré la bonne foi, ne peut être que déficient » (Potvin, 1998)

Il semble donc que l'épistémologie personnelle, c'est-à-dire l'ensemble des critères que les individus emploient pour « faire du sens » des phénomènes naturels, soient davantage appropriés pour la poursuite des travaux qui s'inscrivent dans cette perspective. Et d'ailleurs, le constructivisme ne contient-il pas implicitement la notion d'éducation personnalisée?

e) La dénigration des conceptions personnelles

Les considérations affectives ne constituent pas des objets d'études à l'intérieur de paradigme. Or, cela ne veut pas dire que l'on supprime par décret ce que l'on néglige par méthode (Astolfi, 1997). L'affectivité est fort probablement au centre et à l'origine de l'apprentissage. Même Piaget s'est attardé à la question :

« La vie affective et la vie cognitive sont donc inséparables, quoique distinctes. Elles sont inséparables parce que tout échange avec le milieu suppose à la fois une structuration et une valorisation, mais elles n'en restent pas moins distinctes, puisque ces deux aspects de la conduite ne peuvent se réduire l'une à l'autre. C'est ainsi qu'on ne saurait raisonner, même en mathématiques pures, sans éprouver quelque sentiment (...) »

Piaget (1967, p.12)

Ceci étant dit, on peut chercher à imaginer quelle peut être la réaction affective d'un individu chez qui l'on tente de forcer un changement conceptuel, tel que le suggèrent les modèles actuels.

L'apprentissage étant conçu comme un renversement des crédibilités respectives des conceptions, il est plausible de concevoir qu'un élève puisse l'assimiler à une activité consistant à dévaloriser son savoir personnel, savoir auquel, on l'a vu, il attribue nécessairement du prix. À la limite, l'entreprise de changement conceptuel peut ainsi sembler devenir une succession de démolitions des idées personnelles, qui ne pourrait que mener à une déconfiture affective et une perte de motivation. Il semble particulièrement important de s'assurer que le programme d'apprentissage s'immunise de ces effets. Il est donc urgent de s'assurer que le changement conceptuel ne deviendra pas facteur de « sciencophobie ». Or, la perspective de changement conceptuel ne cherche pas véritablement, à l'heure actuelle, à s'immuniser contre cette possibilité, si ce n'est pas le biais des aspects socioconstructivistes.

Deuxième partie :

2.3 La perspective de DiSessa

« The notion that students come to science courses with misconceptions has become quite widely accepted by those who follow or participate in education research. DiSessa and his colleagues (DiSessa 1988, 1993; Smith, DiSessa & Roschelle, 1993/94) have challenged the theoretical and empirical validity of this perspective and offered an alternative account of cognitive structure in phenomenological primitives or p-prims. »

Hammer (1996, p.97)

Comme en réponse aux inquiétudes que nous avons soulevées précédemment, la perspective de DiSessa (1993) ouvre de nouveaux univers de connaissances didactiques. Elle considère la conception non pas comme l'unité de base de la compréhension dans l'apprentissage des sciences, mais comme l'expression de quelque chose de plus fondamental, quelque chose de moins saisissable et de plus intuitif.

Sa perspective suggère qu'une stratégie de changement conceptuel qui ne tenterait de traiter que les conceptions elles-mêmes ne ferait rien d'autre que poursuivre une chimère; ce serait comme expliquer une caractéristique physiologique d'origine héréditaire par l'étude du phénotype plutôt que du génotype. Il faut s'adresser à un niveau plus fondamental de la compréhension pour effectuer un changement viable et durable. Parce que s'il est vrai que, pour changer les choses, on peut couper la queue de la souris, sa descendance, elle, en aura toujours une.

Ainsi DiSessa, contrairement aux modèles de changement conceptuel qui, on l'a vu, n'offrent pas de rôle à l'intuition, propose-t-il une expression décrivant l'intuition employée par les individus pour interpréter les phénomènes du mouvement : le « sens de la mécanique »²⁰.

Dans sa philosophie, ce « sens de la mécanique » est davantage perçu comme un juge que comme un avocat. Son travail consiste à juger plutôt qu'à construire des argumentations ou de recueillir des données. Un individu qui tente d'expliquer une réalité physique peut ainsi se laisser influencer par des métaphores ou des

²⁰ trad. de « sense of mechanism » (DiSessa, 1993)

habitudes de pensée, par la similarité avec d'autres situations ou des protocoles d'interprétation qu'il juge fiables. Le sens de la mécanique n'agit pas comme un avocat tentant d'éprouver un argument ou un énoncé. Ce serait plutôt, à l'intérieur de cette analogie, l'« espace cognitif » où se mettent en action ces mécanismes dans le but de produire un jugement.

C'est dans le cadre circonstancié plus restreint de « classes de coordination » que l'intuition exerce de tels jugements.

2.3.1 Les classes de coordination

Omniprésentes dans toute l'épistémologie intuitive de la physique de DiSessa, les classes de coordination doivent être comprises comme des systèmes de connaissances plutôt que comme des compréhensions statiques et fixes des phénomènes ou comme des catégories, des citations ou des définitions. Elles déterminent et délimitent l'espace dans lequel une compréhension d'un phénomène ou de plusieurs phénomènes interreliés²¹ se développent et se maintiennent. Cet espace renferme un ensemble de coordinations qui agit sur des données ou des perceptions effectuées sur des situations physiques particulières. Les paramètres qui décrivent le réel peuvent donc y être mis en relation dans le but de trouver un sens aux phénomènes considérés.

Les classes de coordination ne concernent évidemment pas tous les types de connaissances. Elles ne sont pas des théories, puisqu'elles sont souvent bien moins articulées et formalisées que celles-ci. Elles ne tiennent pas de connaissances catégorielles²². Elles ne sont pas non plus des équations, même si on verra parfois des sujets se servir d'équations pour coordonner les paramètres d'un problème.

Par hypothèse²³, le « sens de la mécanique », que déterminent les classes de coordination, est riche, varié, particulièrement mal articulé et son fonctionnement

²¹ En fait, ces phénomènes ne seront liés que si le sujet juge qu'ils le sont.

²² « Category-like concepts »

²³ Voir DiSessa (1993)

est difficile à cerner. Il contient de nombreux éléments abstraits dont le sens est difficile à déterminer par les méthodes habituelles et il arrive fort souvent que les mots ne soient pas d'un grand secours pour le décrire.

« I deliberately use the term "sense of mechanism" to emphasize that the picture I paint of human causality is dramatically different from many other characterizations. It involves diverse and diffuse judgments and impressions more than it consists of some small set of sharply defined and necessary principles. »

DiSessa (1993, p.107)

2.3.2 Les p-prim

S'inspirant des travaux en intelligence artificielle (ou IA), où les conduites « intelligentes » des systèmes ordonnés permettent d'éclairer les conduites intelligentes humaines et vice-versa (Green, 1985), Andy DiSessa a construit une « épistémologie de la physique » (DiSessa, 1993) à partir de son expérience de logiciels tels que LOGO et DYNATURTLE. (DiSessa et Hammer, 1993)

Ayant principalement oeuvré dans le domaine de la mécanique et s'étant employé à étudier le cadre épistémique particulier par lequel les individus arrivaient à se construire un « sens de la mécanique », il lui est apparu que les conceptions évoquées et spontanément employées étaient construites à l'aide d'habitudes interprétatives récurrentes et intuitives : les primitives phénoménologiques (ou p-prim) (DiSessa, 1993, p.112).

« The name, phenomenological primitive, is meant to capture several of the most important characteristics of these objects. They are phenomenological in the sense that they often originate in nearly superficial interpretations of experienced reality. They are also phenomenological in the sense that, once established, p-prim constitute a rich vocabulary through which people remember and interpret their experience. They are ready schemata in terms of which one sees and explains the world. There are also two senses of primitiveness involved. P-prim are often self-explanatory and are used as if they needed no justification. But also, primitive is meant to imply that these objects are primitive elements of cognitive mechanism –nearly minimal memory elements, evoked as a whole, and they are perhaps more atomic and isolated a mental structure as one can find. »

La dénomination « primitive » rappelle également les fonctions primitives d'un programme informatique, qui sont des sous-commandes constitutives de fonctions plus complexes.

Les p-prims doivent alors être comprises comme étant les outils intuitifs par lesquels les individus coordonnent les paramètres impliqués dans une classe de coordination. Elles déterminent en fait la nature des relations par lesquelles ces paramètres sont coordonnés. La réflexion d'un individu à propos d'une question de mécanique dépendra donc 1) de quelles p-prims seront activées et 2) de comment ces p-prims feront leur travail de coordination. C'est-à-dire : traiteront-elles les bons paramètres et le feront-elles de la bonne façon?

De par leur nature intuitive, les p-prims sont particulièrement difficiles à identifier et à caractériser. De plus, elles ne sont probablement pas les seuls objets que contient le sens de la mécanique. Cela les rend particulièrement difficiles à circonscrire, à identifier et à discerner. Certaines p-prims ne se laissent pas aisément formuler en quelques mots ou en une expression simple. Ce sont des objets glissants, dont l'étude exige un niveau d'analyse plus fondamental que les seules paroles employées par les sujets pour les décrire.

Heureusement, de nombreux principes identifiés par DiSessa nous permettent de reconnaître une p-prim à l'intérieur d'un discours. En voici quelques-uns qui peuvent s'avérer utiles à l'intérieur d'une opération qui consiste à les dénicher :

- 1) Principe d'anomalie. C'est un principe déjà employé dans la recherche sur les conceptions erronées. Les discours non scientifiques de sujets sont intéressants en ce qu'ils permettent de voir la force des p-prims au-delà des apprentissages scolaires. On peut s'attendre à trouver des p-prims dans ces discours.
- 2) Principe d'évidence. En général, les p-prims sont associées à des événements que les sujets n'éprouvent aucun besoin d'expliquer. Ces événements sont « évidents ».
- 3) Principe d'impénétrabilité. On ne peut pas analyser la p-prim : elle est l'outil de base. La p-prim est elle-même impénétrable pour le sujet; elle est l'explication. Elle n'est pas explicable par son détenteur.
- 4) Principe de couverture. L'intégralité des phénomènes devrait pouvoir être couverte par les p-prims.
- 5) Principe de diversité. Il existe de nombreuses p-prims. DiSessa admet lui-même avoir beaucoup de difficulté à envisager une tentative d'unification des p-prims.

Si on cherche à donner des exemples de p-prim, on peut parler de la p-prim d'Ohm²⁴ ainsi nommée à cause de sa ressemblance avec la loi d'Ohm (en électricité) dans laquelle on retrouve une relation proportionnelle et une autre, inversement proportionnelle. Respectivement; plus la différence de potentiel (U) est grande, plus le courant (I) est intense, plus le résistor (R) a une valeur élevée, moins le courant (I) sera important. On retrouve alors, dans la p-prim d'Ohm, un AGENT(U), qui agit pour produire un RÉSULTAT(I) contre une RÉSISTANCE (R). Il semble cependant que ce principe soit applicable à de nombreux autres phénomènes scientifiques qui ne sont pas en rapport avec l'électricité. Ainsi, on retrouve la p-prim d'Ohm en mécanique, où les individus ont souvent développé la conception selon laquelle « une force produit toujours un mouvement contre une friction ». L'émergence de cette conception n'est pas une surprise si on considère que l'individu a construit cet agencement AGENT-RÉSULTAT-RÉSISTANCE dans un environnement particulier où il y a toujours de l'air pour produire une friction et où les mouvements non entretenus finissent toujours par s'évanouir.

Un autre exemple éloquent de l'application de la p-prim d'Ohm est celui de la pression. La conception fréquente « la pression atmosphérique (AGENT) écrase (RÉSULTAT) la bouteille de plastique (dont la solidité constitue la RÉSISTANCE) », on le voit, peut être explicitée en fonction de cette p-prim. En effet, si la pression est plus forte (a dit le professeur), la bouteille ne s'écrase-t-elle pas davantage? De même, si la bouteille est suffisamment solide, disons, une bouteille de verre, l'écrasement n'aura pas lieu. Cette conception ne tient compte en rien de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, qui est, en fait, le véritable agent. Comment s'étonner que l'élève qui possède une telle conception n'admette pas l'existence d'une pression importante qui s'applique sur lui en tout moment et en tout lieu, d'autant plus qu'il ne la ressent même pas? Comment s'étonner que les considérations de symétrie, comme l'équilibre des pressions, dans un tel problème, puissent causer des difficultés de compréhension? Et comment s'étonner, si jamais le changement conceptuel s'effectue, que l'élève finisse par revenir à son ancienne conception quand l'habitude interprétative perdure dans un environnement physique qui renforce rigoureusement la moindre émergence de la

²⁴ Voir DiSessa, Andrea A. 1993. *Toward an epistemology of physics*.

conception erronée? On peut voir, à ce niveau, que la p-prim permet une analyse plus fertile que la perspective du changement conceptuel laissée à elle-même.

La p-prim d'Ohm est également généralement employée dans le problème de l'aspirateur. Ce problème est très souvent abordé de la façon suivante par certains sujets : Ils inscrivent les paramètres qu'ils jugent pertinents au problème dans la même structure : un moteur (AGENT), en fonctionnant, produit une aspiration (RÉSULTAT) contre une RÉSISTANCE (qui peut ici prendre la forme de plusieurs facteurs selon les sujets [la densité du fluide aspiré, la taille des objets aspirés, etc.] dans le cas qui nous intéresse ici, la résistance sera produite par une main se déposant sur l'embout du tuyau et empêchant l'aspiration). Lorsqu'on pose la main sur l'embout du tuyau, (essayez-le!) on peut remarquer que le moteur s'emballé.

Le problème, analysé dans cette perspective, laisse le sujet sur l'impression que le moteur « s'aperçoit » que l'aspiration ne se fait plus et tente de compenser la résistance par un effort plus grand pour réaliser cette aspiration. Or, le moteur d'un aspirateur ne répond pas à une commande régulatrice. S'il semble « travailler plus fort », c'est qu'en réalité, il travaille à créer une dépression en amont (le véritable RÉSULTAT recherché) et, en même temps, doit lutter contre la différence de pression qu'il a lui-même provoquée entre l'amont et l'aval (la véritable RÉSISTANCE). En empêchant l'air de circuler dans le tuyau, la différence de pression qu'il y a entre l'avant et l'arrière de l'hélice chute. Le moteur, qui tourne alors « dans le vide » (i.e. sans résistance) voit sa vitesse augmenter, les pales de l'hélice ne tournant plus désormais que pour entretenir un mouvement de rotation de l'air.

L'interprétation produite à l'aide de la p-prim d'Ohm par l'individu lui laisse donc croire que le moteur va produire un effort supplémentaire (qui, selon DiSessa, constitue une autre p-prim : « working harder » qu'on peut voir apparaître dans d'autres situations).

Le sujet se croit alors autorisé à doter le moteur (dans son explication) d'une capacité à « s'ajuster », alors qu'il n'en est rien. Cela rejoint peut-être la tendance des individus à doter les machines de caractéristiques humaines; dans ce cas-ci,

par exemple, l'intention non satisfaite a été pourvue d'une signification physique. Il est à noter que les deux explications font intervenir la même p-prim, seuls les paramètres coordonnés ont changé. Il faut cependant admettre que, dans ce cas-ci, l'explication « génotypique » (scientifique) supplante l'explication « phénotypique » (celle du moteur-conscient).

Voici un dernier exemple : Hammer (1996) illustre une situation où des sujets doivent expliquer pourquoi il fait plus chaud pendant l'été que durant l'hiver. L'explication conceptuelle classique est que la terre se trouve plus près du soleil lors de cette saison. Hammer indique que, dans ce cas, il n'est pas nécessaire que l'élève détienne initialement une conception stable sur le phénomène pour qu'il réponde de la sorte. Il aura plutôt tendance à se construire une réponse sur commande (et) sur-le-champ, basée sur une p-prim identifiée par DiSessa : « plus près = plus intense ». La musique n'est-elle d'ailleurs pas plus intense quand sa source se trouve plus près? Ne faut-il pas porter le lait à son nez pour savoir s'il est encore bon? Sur la base d'une telle habitude interprétative (validée et renforcée à de nombreuses reprises par les expériences vécues par l'individu), le problème de l'été ne semble-t-il pas facile à résoudre? La réponse ne semble-t-elle pas intuitivement évidente?

Et maintenant, si on tente d'expliquer aux sujets que c'est plutôt l'inclinaison de la terre qui est responsable des saisons, on verra plusieurs d'entre eux tenir si fermement à la p-prim identifiée plus haut que la résolution de la dissonance cognitive (du conflit) se formulera somme suit : « l'inclinaison de la terre a pour résultat qu'elle rapproche l'hémisphère Nord du soleil durant l'été », ce qui est effectivement vrai, mais tout à fait négligeable à l'échelle astronomique.

Cette dernière analyse illustre bien comment une conception peut survivre à l'enseignement.

Voici une liste non exhaustive de p-prim identifiés par Smith, DiSessa, Roschelle et leurs collègues et une brève description de leurs caractéristiques.

- 1) P-prim d'Ohm. Décrit précédemment. Fait intervenir les paramètres agent, résultat et une interférence (une résistance). Cette p-prim est probablement la plus largement connue et utilisée. On la voit apparaître en mécanique, en cinématique mais aussi en biologie où des individus, pour mieux guérir (ou pour guérir plus vite), vont prendre plus que la dose prescrite de médicament.
- 2) P-prim « Force as a mover ». Implique nécessairement que le mouvement résultant d'une force soit dans le même sens que cette force.
- 3) P-prim « résistance spontanée ». Peu importe les circonstances « périphériques », un gros objet produit toujours une plus grande résistance au mouvement.
- 4) P-prim « dying away ». L'amplitude des mouvements ou des phénomènes s'éteint naturellement avec le temps, sans intervention extérieure.
- 5) P-prim « warming up ». Le changement nécessite du temps pour se compléter jusqu'à un climax. Par exemple, les objets continuent d'accélérer momentanément après qu'on les a poussés.
- 6) P-prim « working harder ». Les machines, lorsqu'elles rencontrent une résistance importante, vont compenser naturellement cette résistance en « travaillant plus fort ». Cette p-prim est très liée à la p-prim d'Ohm. C'est l'explication donnée par un sujet qui tente d'expliquer pourquoi, lorsqu'on bouche l'embout du tuyau d'un aspirateur, le moteur s'emballe.
- 7) P-prim « closer means more intense ». Cette p-prim a été développée dans le texte précédent dans l'exemple de la raison de la chaleur en été.
- 8) P-prim « fixation ». Si deux influences opposées sont égales, elles « bloquent » un objet en place. Certains sujets ont même verbalisé qu'un satellite était « fixé » (clamped) en orbite; coincé entre les forces centrifuge et centripète.
- 9) P-prim « support ». Utilisé dans de nombreuses situations où, par exemple, un objet est posé sur un autre. Dans le problème du livre posé sur la table, la table « supporte » le livre, mais elle n'est aucunement un agent.
- 10) P-prim « équilibre ». Utilisé en de nombreuses circonstances, défini dans aucune d'elles par les sujets, l'équilibre agit dans tous les domaines de la science (problèmes biologiques, poulies, mouvement rectiligne accéléré ou non, écologie, etc.)
- 11) P-prim « canceling ». Nul besoin de dire que deux influences opposées ont un bilan net nul. Elles ne s'annulent pas non plus; elles disparaissent tout simplement!
- 12) P-prim « things move in the direction they are facing ». Cette p-prim est fréquente chez les tout jeunes enfants. Elle implique que le « devant » des objets soit toujours dans la direction du mouvement.

Il existe ainsi de nombreuses autres p-prim décrites dans « Toward an epistemology of physics » de Andrea DiSessa (1993).

2.3.3 Le comportement des p-prim

Les p-prim ne seront pas toutes activées de la même façon. Certains seront activées plus facilement dans certaines circonstances, d'autres ne le seront jamais dans d'autres contextes. On dira d'une p-prim (dans une circonstance X) qu'elle a une grande « priorité d'appel », si elle ressort souvent.

Ce ne sont pas non plus toutes les p-prim qui ont la même priorité naturelle. Certaines sont hiérarchiquement plus élevées et on leur attribuera un rôle plus fréquemment. C'est le cas, par exemple, de la « p-prim d'Ohm », qu'on verra agir très souvent en mécanique et en cinématique. Par opposition, on ne verra pas

souvent agir la p-prim « aspiration²⁵ », qui est le plus souvent observée dans l'explication de la raison pour laquelle le jus peut monter dans la paille. Une autre classe de p-prim dites de « basse priorité » sont souvent employées pour expliquer les cas où les p-prim principales sont inefficaces pour décrire l'issue d'une situation. Ils servent en quelque sorte, d'« excuses ». D'autres considérations sont aussi impliquées :

« I have already made a number of observations about systematicity. For example, I have considered: central elements (Ohm's p-prim, force as a mover) and less central (wobbling, warming up); important attributes (agency) that may give rise to central causal schematizations (causal syntax); classes of recognizable patterns (amplitude patterns like violence and damped bobbing); and even a few mechanisms for producing limited systematicity, such as phenomenological syllogism and slogans (equal and opposite reaction). »

DiSessa (1993, p157)

Ce ne sont donc pas toutes les p-prim qui ont la même valeur ou la même priorité dans les coordinations. DiSessa avait par exemple remarqué qu'il était très difficile de faire admettre à ses sujets qu'une cloche plus épaisse puisse produire un son plus aigu (higher pitch) qu'une cloche mince. Cela illustre que certaines p-prim (comme « plus lourd implique plus lent ») ont une priorité sur certaines autres (comme « plus raide implique plus vibrant²⁶ »). Il existe de nombreux autres exemples où des difficultés d'apprentissage peuvent être interprétées comme témoins de la priorité inadéquate de certaines p-prim dans certains problèmes.

Il se peut également que certaines p-prim soient tout simplement moins importantes dans la vie de tous les jours. C'est peut-être le cas dans l'exemple précédent : on a vraisemblablement à utiliser « plus lourd implique plus lent » dans un éventail de circonstances plus important et/ou plus varié que « plus raide implique plus vibrant ».

La valeur relative d'une p-prim dépend également des circonstances qui l'auront déclenchée. Les paramètres qui apparaissent pertinents à l'individu seront déterminants pour le choix des outils d'interprétation d'une situation. Dans l'exemple précédent, le poids peut avoir été jugé comme étant un paramètre plus

²⁵ « sucking »

²⁶ « stiffer implies higher pitch »

important que l'épaisseur. On a donc fait intervenir la p-prim correspondante. Dans de nombreuses p-prim, qui sont d'ailleurs souvent exprimées en termes de « X » implique « Y » (p-prim d'Ohm, « plus près = plus intense », etc.), la détermination du bon « agent », de sa nature et de ses propriétés est très importante. Par exemple, des sujets ont affirmé que, dans une attraction entre un aimant et un morceau de fer, c'était exclusivement l'aimant qui produisait l'attraction (i.e. qu'il ne s'agissait en rien d'une attraction mutuelle), parce que l'aimant (agent) était responsable de l'attraction²⁷. Dans d'autres expériences, bien des sujets éprouvent de la difficulté à voir qu'une table pourra « agir » sur un livre déposé dessus.

Dans un autre ordre d'idées, on retrouve très souvent plus d'une p-prim présentes dans une même classe de coordination. Il peut alors exister des liens privilégiés entre ces p-prim. On admettra même que certaines p-prim en appellent certaines autres tout naturellement. C'est par exemple le cas de « la force en tant que déplaceur²⁸ » et de « la poussée continue²⁹ ». Il sera déterminé que la première (qui implique que tout mouvement est motivé par un agent) et la seconde (qui implique que pour maintenir un mouvement, il faille soutenir un effort) sont liés par une forte priorité d'appel. Elles concernent en effet toutes deux les objets en mouvement. Le sujet pourra donc souvent faire appel aux deux pour décrire une situation comme, par exemple, celle où on pousse un livre sur une table.

Les experts eux aussi emploient les p-prim dans leur compréhension des phénomènes scientifiques. La différence d'avec les novices est, apparemment, qu'ils coordonnent les bons paramètres à l'aide des bonnes p-prim. Il faut admettre cependant que les experts ont également développé l'habitude de chercher les logiques communes à de nombreux phénomènes dans le but de les traduire en quelques principes fondamentaux qui soient peu nombreux et plutôt simples; on ne peut présumer de l'existence de ce type d'engagement chez le novice.

²⁷ Dans cette entrevue de DiSessa, le sujet refusait même d'admettre qu'un aimant pouvait subir une attraction par un réfrigérateur, même si on pouvait sentir l'aimant « attiré » vers celui-ci.

²⁸ « force as a mover »

²⁹ « continuous push »

En tous les cas cependant, il semble que le « sens de la mécanique » d'un individu ait priorité sur n'importe lequel des apprentissages scolaires qu'il ait pu cumuler. DiSessa (1998) illustre ce fait avec conviction lorsqu'il cite le cas d'un de ses sujets qui avait décrété la non validité d'une loi physique apprise à l'université au profit de ses propres intuitions. L'auteur avait alors identifié un authentique problème de coordination, non de perception ou de savoir opérant, explicable par un enchevêtrement de p-prim classiques.

2.3.4 Conceptions ou p-prim?

Les p-prim ne sont pas des conceptions. On n'en dit jamais d'ailleurs qu'elles puissent être « erronées » ou « scientifiques ». Elles sont les blocs élémentaires de construction des classes de coordination, qu'elles soient circonstanciellement viables ou non. Ultiment, elles sont les blocs constitutifs des conceptions elles-mêmes. Et si elles peuvent expliquer et analyser les conceptions, l'inverse n'est cependant pas vrai.

Si, d'ailleurs, la p-prim autorise d'approfondir le raisonnement sur l'intelligence scientifique, ce n'est pas le cas de la conception. La considération de la conception comme « unité de base » de la compréhension interdit toute analyse supplémentaire. Bien souvent, en effet, on verra un rapport de recherche constater qu'un individu adhère à telle ou telle conception et, vraisemblablement, le plus souvent, l'analyse ne sera pas poussée davantage.

Et que dire des « conceptions fréquentes »? Eh bien, la récurrence de certaines conceptions nous pousse parfois à y voir une balise fiable, sur laquelle on puisse baser une intervention. Cependant, une telle intervention reviendrait à couper la queue de la souris; cela n'en change pas le génome. Certains programmes pédagogiques prônent de telles méthodes qui, superficielles, ne modifient en rien la nature profonde des compréhensions.

Ainsi, pour chaque conception fréquente, il est à prévoir qu'une analyse plus poussée pourra révéler, par exemple, l'emploi récurrent d'une même p-prim.

Si on ne fait que s'intéresser qu'aux caractéristiques apparentes de la compréhension, le risque est grand de répéter l'erreur des premiers généticiens qui tentaient d'expliquer l'hérédité par l'étude du phénotype. En comparaison, la génétique mendélienne nous permet de faire des prédictions statistiques bien meilleures, et même, aujourd'hui, des interventions médicales mieux ciblées. Une pareille efficacité ne serait-elle pas la bienvenue en didactique?

Quant aux « conceptions erronées », elles seront comprises comme étant le phénotype de l'emploi inapproprié d'une p-prim dans un contexte considéré.

2.3.5 Apprentissage et p-prim

Au lieu de s'intéresser à un changement conceptuel par le moyen d'un « échange de conceptions », la perspective de DiSessa suggère, quand c'est possible, de conserver intactes les p-prim et de plutôt chercher à changer les composantes défectueuses dans leur utilisation. Par exemple, agir sur les variables introduites dans le p-prim d'Ohm. Dans « la force produit un mouvement contre la friction », il s'agira de tenter de changer (peut-être par un conflit cognitif) le paramètre « mouvement » par l' « accélération » et la « friction » par la « masse », de sorte à reconstruire la deuxième loi de Newton ($F=ma$) et suggérer ensuite d'aborder les problèmes de friction comme étant eux-mêmes des problèmes de forces. Dans cette perspective, la notions de force (qui ne nécessitait apparemment pas de changement) et la p-prim elle-même sont restées intactes.

Parfois, cependant, on n'aura point le choix : quand l'apprentissage exige de monter une plus haute marche, il faudra tenter d'effectuer un « changement de p-prim » chez un individu :

« To summarize, learning physics involve reducing the explanatory priority of many p-prim, such as "sucking" that prescribe direct connections between a class of actions and resulting motions. Instead, the Newtonian explanations of motion are channeled into a single, complex notion (i.e. force), which requires elaborate situation-specific reasoning to explain familiar phenomena. »

DiSessa (1993, p.145)

DiSessa postule que l'intégralité de l'expérience commune³⁰ devrait être couverte par les p-prim. Les concepts les plus difficiles à comprendre seraient alors les plus contre-intuitifs; ceux qui n'ont pas de p-prim pour les appuyer ou ceux qui demandent une coordination complexe de plusieurs p-prim. Cela pourrait contribuer à expliquer certains exemples (comme celui où la voiture qui va quatre fois plus vite cause seize fois plus de dégâts lors d'une collision avec un mur) suggérés par Giordan (1999). On voit mal, dans cet exemple, comment la p-prim d'Ohm (ou n'importe quelle p-prim majeure déjà répertoriée) pourrait expliquer le phénomène; c'est peut-être pourquoi il est contre-intuitif. DiSessa (1993) insiste également sur les difficultés inhérentes aux situations où les p-prim ne viennent pas naturellement ni facilement à la rescousse de la compréhension. Ces situations sont présentées comme étant celles qui posent souvent le plus de difficultés aux étudiants de physique.

³⁰ traduction libre de « common experience »

Troisième partie :

2.4 Le choix de l'approche de DiSessa comme cadre théorique

Le cadre théorique et analytique choisi pour mener la présente recherche contient un riche vocabulaire relatif à l'épistémologie personnelle. Cette caractéristique marque une différence intéressante avec les modèles de changement conceptuel où les ancrages dépendent souvent de la « grande épistémologie », c'est-à-dire de celle des communautés savantes et des critères qu'elles se donnent pour créditer une idée de « scientifique ». Il nous semble que ce principe, profondément constructiviste, constitue un vecteur important de la théorie vers une personnalisation des apprentissages.

Dans cette perspective, la « conception fréquente » nous apparaît comme un bien pauvre outil dont l'usage est de produire des tentatives de prédiction des conceptions de chaque individu. En effet, il peut être bien imprudent de présumer que chaque individu d'une population est conforme à cette moyenne. Les p-prim, nous semblent, au contraire, par leur obsession d'une l'épistémologie qui cherche à rejoindre les personnes dans leurs particularités, bien mieux adaptées aux besoins d'une étude compréhensive des structures conceptuelles d'individus.

Le « point de vue p-prim » propose un monde organisé de méta-connaissances et des points de vue au pouvoir d'interprétation plus étendu que les modèles de changement conceptuel. En ce sens, il appelle un changement de paradigme à propos du changement conceptuel. C'est une véritable révolution scientifique sur le savoir que nous propose DiSessa. Cette révolution, cependant, semble, pour le moment, ne concerner que le domaine de la physique. Les p-prim n'ont qu'anecdotiquement fait objet d'étude dans les autres domaines de la connaissance scientifique. Il serait intéressant (dans un autre contexte) de pouvoir observer la viabilité de ce cadre en biologie, par exemple, ou en chimie.

Pour l'instant, nous nous concentrerons sur l'utilisation de ce paradigme dans le domaine de la mécanique. C'est un domaine où l'intuition occupe une place prépondérante, où les relations entre les variables sont riches et complexes et où

les interactions physiques des individus avec la réalité qui les environne sont omniprésentes.

Cette troisième partie du texte, plus argumentative, expose donc les avantages de la perspective de DiSessa sur les autres approches du changement conceptuel. Les thèmes abordés concernent la prise en compte de l'intuition, le caractère atomique des p-prims, leur rôle dans l'évolution des conceptions, leur respect de la continuité dans les apprentissages, ainsi que leur réalisme praxique.

2.4.1 La place de l'intuition

Plutôt que de s'en tenir exclusivement aux mots qui parviennent à décrire la compréhension, la perspective de DiSessa admet l'existence d'un univers de compréhension qui peut être qualifié d'intuitif. Il s'agit d'un ensemble de structures et d'outils qui servent à construire du sens, mais qui restent implicites, un peu cachés et qui ne sont pratiquement jamais réellement discutés.

On peut donner comme exemple la tendance qu'ont les individus à considérer comme des causes les événements qui en précèdent immédiatement d'autres (les effets). Il ne nous vient jamais à l'esprit d'inverser cet ordre. La raison en est que, à l'intérieur de l'intuition, se trouve cette tendance toute naturelle à poster les causes avant les effets. Cet outil de compréhension, discret, ne fait jamais objet de discussion, mais n'en est pas, pour autant, moins présent dans la construction de sens.

Il est postulé, dans la perspective de DiSessa, que l'intuition regorge d'outils semblables et que les p-prims comptent parmi ces outils. Ces derniers servent alors à construire le sens de phénomènes de toutes sortes dont les phénomènes de mécanique. Du coup, l'intuition, plus flexible, moins palpable, devient objet à la place de la conception, monolithique, inflexible et à laquelle on ne peut accéder que par l'emploi des pauvres mots qui la décrivent.

Et si cette intuition peut être considérée comme un obstacle à l'enseignement des sciences, elle peut aussi être vue comme l'accès au savoir scientifique, puisque

cette intuition est présente, on l'a vu, chez tous les individus, qu'ils soient experts ou novices. Ainsi, la perspective permet de décrire les intuitions qui mènent à l'agencement correct et efficace des notions et des constructions aux allures scientifiques. Les modèles de changements conceptuels ne vont s'en tenir, bien souvent, qu'à l'étude des « conceptions erronées », n'expliquant ni comment ni quand peuvent survenir spontanément les intuitions correctes. Le « point de vue p-prim » autorise donc une certaine réhabilitation de l'intuition à l'intérieur de l'intelligence scientifique.

2.4.2 L'élémentarité

Les p-prim ont été présentées comme étant des unités de base de la compréhension qui sont plus fondamentales que les conceptions. Elles ont même été qualifiées métaphoriquement de « génotypiques ». Or, ce postulat mérite d'être appuyé et illustré. Il convient également d'expliquer en quoi cette élémentarité constitue un avantage marqué sur la perspective conceptuelle.

a) Premièrement, il faut admettre que dans l'étude des conceptions, les répertoires n'en finissent plus de se remplir. Il y a toujours une nouvelle conception à ajouter à celles qui sont déjà connues. À la limite, il existe autant de conceptions qu'il peut y avoir d'individus sondés. L'étude des p-prim, par contre, révèle un nombre important de ces objets, certes, mais beaucoup plus restreint que celui des conceptions.

S'il est vrai que certaines p-prim peuvent être absentes de l'arsenal épistémologique d'un individu, on doit admettre qu'il y a tout de même convergence; la plupart des élèves les détiennent et les emploient. Ce qu'ils en font peut varier de façon importante, mais il y a tout de même des récurrences quant à leur existence et à leur utilisation.

Ainsi, si le nombre de conceptions enregistrées chez un individu ou dans une population est divergent, le nombre de p-prim lui, converge. Ce qui suggère qu'on puisse mieux cerner l'ensemble des compréhensions avec un plus petit nombre d'objets. Il devient alors pensable d'imaginer des recherches sur l'intelligence

scientifique qui soient plus homogènes et des interventions pédagogiques mieux ciblées. On peut même penser qu'à partir de ces éléments constitutifs que sont les p-prim, il soit possible de construire un nombre pratiquement infini de conceptions par des combinaison de ces objets, ce qui permet d'expliquer les conceptions sans avoir besoin pour autant de chercher à en faire un répertoire exhaustif

b) De plus, il est important de mentionner qu'il est possible de retrouver une seule p-prim pour décrire de nombreuses conceptions. On retrouva ainsi, par exemple, la p-prim d'Ohm dans les raisonnements d'élèves concernant des domaines scientifiques tout aussi variés que la thermodynamique, la mécanique ou l'électricité. On verra aussi des sujets verbaliser leur croyance en l'« équilibre » dans des domaines de connaissances tout aussi distincts.

À l'opposé, il n'est pas possible de retrouver une seule conception dans plusieurs p-prim. Il n'y a pas de symétrie pour la simple raison que l'un est faite de l'autre et non l'inverse.

c) Finalement, il devient aisé de montrer que l'étude de l'épistémologie personnelle des élèves peut être plus fructueuse que celle que permet le paradigme du changement conceptuel. DiSessa relate à ce propos l'histoire d'élèves éprouvant des difficultés scolaires dont la nature n'a pu être analysée par les modèles actuels du changement conceptuel, mais dont l'analyse par les p-prim s'est avérée fructueuse³¹. Les idées de DiSessa semblent ainsi davantage pouvoir d'adresser aux particularités des compréhensions des individus.

³¹ « An idiosyncratic example of an inappropriate importation of balancing into understanding physics involve a student who constantly puzzled me by drawing force vectors of free-body diagrams in the opposite direction from real forces. The reason for this behavior became apparent when she openly declared that the meaning of $F=ma$ for her was that "nature required everything to be in balance" and the $-m*a-$ was the thing that balanced (apparently in the sense of "dynamic balancing" -canceling out- but with the imperative attribute of "abstract balancing" any force. Thus, for any force, she frequently identified the balancing ma force as necessarily existing. This example is valuable in showing how, contrary to the misconception point of view of widely held systematic difficulties, the present view allows us to understand individual, although sometimes personally pervasive, constructions as attempts to universalize combinations of common primitives into a more systematic sense of mechanism. » (DiSessa, 1993, p.138)

« For example, if the question were to arise in the context of a discussion about the tilt of the earth, "closer means stronger" may never be activated or the p-prim may be activated but applied in a different way, leading the student to reason that the tilt of the earth pushes one hemisphere closer to the sun. By the misconceptions perspective, what is stored in some form is directly the notion that "it is hotter in summer because the earth is closer to the sun". By that perspective, it is difficult to understand how any discussion about why it is hotter in the summer would not invoke the misconception. »

Hammer (1996, p.102-103)

Pour illustrer la supériorité de l'approche « p-prim » sur celle des conceptions par l'argument de l'élémentarité, nous avons choisi de proposer une analyse de certaines conceptions fréquentes à l'aide du cadre que constitue l'approche de DiSessa. (Les conceptions tirées de Thouin (1998) sont marquées d'un astérisque[*])

Conception	Analyse possible avec la perspective de DiSessa (Description de la classe de coordination avec ses p-prim associés)
<p>Même sans force de frottement, il faut appliquer une force constante pour qu'un objet se déplace à vitesse constante*</p> <p>Si un objet est en mouvement, une force agit sur cet objet. S'il est immobile, aucune force n'agit.*</p>	<p><u>P-prim d'Ohm</u> AGENT : force (moteur, force musculaire), RÉSULTAT : mouvement, RÉSISTANCE : friction de l'air</p>
<p>Le phénomène de gravité est dû à la présence d'atmosphère (par opposition au vide) et l'air appuie sur les gens vers le bas</p> <p>Les astronautes sont moins lourds sur la lune parce que leur combinaison spatiale est pleine d'air*.</p> <p>Les objets lourds tombent plus vite que les objets légers*</p> <p>La période d'un pendule dépend de l'amplitude ou du poids*</p> <p>Les objets légers flottent et les objets lourds coulent*</p> <p>Plus un ballon en caoutchouc contient de l'air, plus il est léger*</p> <p>Plus un plan d'eau est profond, plus les objets flottent facilement*</p>	<p><u>P-prim d'Ohm</u> AGENT : poids, RÉSULTAT : vitesse de la chute (ou tendance à couler), RÉSISTANCE : dépend du sujet (souvent, on parle du nombre de bulles d'air contenu dans l'objet [ou quantité d'air], de la forme [fuselée ou non], de la proximité du fond [dans le cas des bateaux], etc...)</p>

Pour qu'un objet se tienne en équilibre, le point d'appui doit nécessairement se trouver au centre*	<p align="center"><u>P-prim « équilibre »</u></p> <p>Le mot équilibre reste inexplicité... ce qui suggère la présence de la p-prim. La p-prim équilibre fait souvent surface accompagnée des notions de « milieu », d' « immobilité », de « nécessité naturelle ». Ici, dans les deux premières conceptions, en étant plus près du point d'appui, l'équilibre est plus facile à obtenir.</p>
Plus on est près du point d'appui, moins la force nécessaire pour équilibrer un levier est grande*	
Tous les objets en équilibre sont en équilibre stable* (note ajoutée : i.e. sans action ou mouvement apparent)	
Le son se propage moins bien dans les liquides et les solides que dans l'air*	<p align="center"><u>P-prim d'Ohm</u></p> <p>AGENT : source de l'émission, RÉSULTAT : propagation, RÉSISTANCE : épaisseur du milieu, dureté ou densité.</p>
L'épaisseur d'un matériau influence sa conductivité thermique*	
La gravitation est une sorte de magnétisme*	Il se peut ici qu'on utilise une seule p-prim pour expliciter le comportement de toutes les « influences sans contact »
Le mur n'oppose pas de force sur une main qui le pousse : le mur retient.	<p align="center"><u>P-prim « support »</u></p> <p>Les surfaces n'opposent pas une force comme telle à un corps qui cherche à les traverser. Elles « retiennent » ou « supportent » passivement.</p>
Les objets immobiles, tels que les tables ou les chaises ne peuvent exercer une force*	
Une force centrifuge réelle s'oppose à la force centripète*	<p align="center"><u>P-prim « canceling »</u></p> <p>Des influences antagonistes disparaissent... L'immobilité ou un effet absent constitue une justification de la p-prim</p> <p align="center">Ou</p> <p align="center"><u>P-prim « fixation »</u></p> <p>Si deux influences antagonistes sont égales, elles « bloquent [clamp] » un objet en place</p>
Il n'y a pas de force agissant sur un livre posé sur une table	
La collision d'ondes entraîne la disparition permanente de ces ondes*	
La grosseur de la pupille varie selon la distance des objets regardés*	<p align="center"><u>P-prim d'Ohm</u></p> <p>AGENT : Source de lumière, RÉSULTAT : propagation efficace de la lumière, RÉSISTANCE : étroitesse de la « fenêtre ».</p>
Pour bien voir à l'extérieur, la nuit, il est préférable d'allumer toutes les lumières à l'intérieur*	

En frappant plus fort sur un objet, on change la hauteur du son émis par cet objet*	<p style="text-align: center;"><u>P-prim d'Ohm</u> AGENT : coup, RÉSULTAT : hauteur du son, RÉSISTANCE : dépend de la situation et du sujet Ou <u>P-prim « violence »</u> accorde des propriétés particulières aux phénomènes considérés comme violents</p>
Le tonnerre est le bruit d'un éclair qui frappe le sol*	
Toutes les substances se contractent en passant de l'état liquide à l'état solide*	<p style="text-align: center;"><u>P-prim d'Ohm</u> AGENT : source de chaleur, RÉSULTAT : augmentation de température, augmentation du volume, sensation de chaleur, RÉSISTANCE : présence de vent (aération)</p>
En été, on frissonne après une baignade parce que l'eau de la piscine est plus chaude que l'air*	
Un réfrigérateur contient un puissant ventilateur qui refroidit les aliments*	
Une augmentation ou une diminution de la quantité de chaleur entraîne toujours une augmentation ou une diminution de la température*	
La température du mélange de deux quantités d'eau est égale à la somme des températures des deux quantités*	
La grosseur d'un aimant détermine sa force*	<p style="text-align: center;"><u>P-prim d'Ohm</u> AGENT : taille de l'aimant, RÉSULTAT : attraction, RÉSISTANCE : distance, obstacles physiques Ou <u>P-prim « plus près = plus intense »</u></p>
Un aimant ne peut agir à travers un obstacle*	
Le courant (I) et la différence de potentiel (U) vont ensemble et sont donc équivalents	<p style="text-align: center;"><u>P-prim d'Ohm</u> AGENT : taille de la pile (certaines piles 1,5V ont une taille plus importante que certaines autres) ou courant ou différence de potentiel RÉSULTAT : importance de la manifestation électrique, RÉSISTANCE : distance, obstacles physiques</p>
Le courant électrique domestique est produit par de grosses piles*	
Le courant produit par des piles 1,5V est dangereux*	

Il fait plus chaud l'été que l'hiver parce que le soleil est plus près de nous l'été (Hammer, 1996)	<p><u>P-prim « plus près = plus intense »</u> Plus on est près de la source d'une émission, plus on peut percevoir ses effets</p>
Il fait plus chaud l'été que l'hiver parce l'inclinaison de la terre rapproche un des deux hémisphères du soleil (Hammer, 1996)	
Il fait plus chaud à l'équateur parce que ces régions sont plus rapprochées du centre de la terre*	
Si on bouche l'embout d'un tuyau de balayeuse, le moteur s'emballe parce qu'il travaille plus fort (DiSessa, 1993)	<p><u>P-prim « working harder »</u> Pour obtenir un effet de déplacement, il faut, dans certains cas, « travailler plus fort ».</p>
Si en appuyant sur un mur, on ne perçoit aucun effet (ni déplacement, ni déformation), c'est qu'on appuie « pas assez fort » (DiSessa, 1993)	
Une force transmise à un objet lancé finit par s'épuiser et l'objet finit par tomber	<p><u>P-prim « dying away »</u> l'amplitude de certains phénomènes s'éteint avec le temps.</p>
Une soupe se refroidit avec le temps	
Une balle qui tourne au bout d'une ficelle aura une trajectoire courbe après avoir été lâchée*	

Tableau 1) Correspondances entre conceptions et p-prim

2.4.3 Qu'est-ce qui change dans le changement conceptuel?

Il n'est pas aisé d'expliquer les mécanismes d'élaboration des conceptions. Les modèles actuels de changement conceptuel ne peuvent guère que s'appuyer sur des critères relativement fugaces tels que la viabilité ou la fertilité pour expliquer l'apparition et le maintien d'une conception.

S'il est vrai que les structures cognitives des individus sont le produit d'accommodations, alors le critère de viabilité est effectivement d'une importance

particulière. Or, si les individus se refusent souvent à s'accommoder à de nouvelles données (qui peuvent être surprenantes) apportées par un enseignement, c'est peut-être qu'il y a autre chose qui renforce l'inertie des conceptions.

On peut suggérer qu'un principe de « meilleur rendement » ou d'économie (Mach, 1908) est à la base de la croyance en une conception. Cependant, un tel principe nous ramène encore une fois à l'épistémologie. En effet, considérer une connaissance comme étant plus valable sur un certain critère d'économie (doublé d'une efficacité) n'est, en fin de compte, rien d'autre qu'une activité basée sur un critère de « vérité ». Encore une fois, les questions intuitives entrent en jeu.

Mais il y a plus. La perspective de DiSessa suggère en effet que les conceptions se construisent sur la base de p-prim. On peut donc s'attendre à ce qu'une conception soit d'autant plus facile à construire qu'elle s'inscrit aisément à l'intérieur d'une p-prim. On peut également s'attendre à ce qu'elle se voit « renforcée » à chaque fois que la structure cognitive la faisant intervenir s'avère efficace pour effectuer une prédiction ou pour produire une explication sensée. Ainsi, les explications les plus conformes aux outils intuitifs sont-elles aussi les plus faciles à élaborer et à renforcer. On se retrouve, dans ce cadre interprétatif, avec un outil supplémentaire pour aborder l'origine des conceptions et pour expliquer leur ténacité au-delà de l'enseignement. Il devient même possible d'expliquer pourquoi les élèves reviennent souvent à leurs anciennes idées et ce, malgré un traitement pédagogique qui faisait directement contre ces mêmes idées.

Le paradigme permet également un regard plus optimiste vers le futur. L'évolution des conceptions des élèves, considérée comme étant entraînée, animée et canalisée par les considérations épistémiques, peut également être mieux prédite et être mieux organisée. Il est même pensable qu'un programme d'études puisse être structuré de telle sorte que l'évolution de la pensée scientifique soit balisée par l'existence des p-prim. Autrement dit, non seulement les interventions didactiques ou pédagogiques ponctuelles sont inscrites dans la logique des p-prim, mais toute la séquence des apprentissages passe par un itinéraire qui respecte davantage ces considérations intuitives. C'est toute une réforme du programme de physique qu'une telle perspective peut réclamer.

Mais les p-prim accordent aussi un éclairage particulier à la flexibilité des conceptions, comme, d'ailleurs, c'est tout spécialement le cas pour la physique. En effet, les modèles de changement conceptuel présentent les conceptions comme les atomes inattaquables de la compréhension. Or, au début des séquences d'apprentissage, les élèves font souvent montre d'une ouverture étonnante et d'une aptitude particulière à effectuer des modifications plutôt fondamentales sur leurs concepts initiaux et, ce, très rapidement. C'est comme s'ils pouvaient sur-le-champ modifier certaines composantes de leur « intelligence des phénomènes » pour s'accommoder de certaines données particulières. Bien sûr, ils resteront irrémédiablement accrochés à certaines conceptions, mais ils semblent également (et généralement avec un enthousiasme difficile à expliquer, étant donné la difficulté de la tâche) fort disposés à apprendre; à adopter un comportement allostérique flexible.

Les modèles de changement conceptuel ne semblent pas pouvoir appréhender ce phénomène. Ils n'offrent pas de cadre d'analyse intéressant pour interpréter ce type d'événement. Les conceptions, monolithiques, solides dans les têtes autant que dans leur intégrité, doivent être remplacées, déplacées – malgré leur poids -, voire même détruites, tout simplement. La perspective de DiSessa, par contre, considère que les p-prim sont les seules composantes à être inévitables à l'intérieur du « sens de la mécanique ». Le reste, c'est-à-dire les paramètres qu'on choisit de coordonner et la manière qu'on choisit pour les mettre en relation, sont autant de pièces ou d'articulations mobiles susceptibles d'être modifiés ou simplement échangés. Le changement conceptuel perd définitivement sa connotation de « substitution » ou d' « échange » et l'apprentissage en physique apparaît dès lors comme une activité consistant à s'intéresser aux pièces défectueuses à l'intérieur de chaque représentation.

Ce point de vue autorise également une explication quant à la récurrence de certaines conceptions. Les conceptions fréquentes peuvent alors être vues comme étant le phénotype de classes de coordinations faisant plus couramment intervenir une p-prim particulière. Or, ce n'est pas parce qu'on emploie la même p-prim qu'un autre individu (pour appréhender un même phénomène) que celle-ci coordonne les

mêmes éléments, ni que ces éléments ont la même signification pour tous. Ainsi la perspective de DiSessa permet-elle d'expliquer les récurrences grossières dans les conceptions d'une population d'individu, mais aussi permet-elle de cerner les différences plus fines qui apparaissent entre les différentes versions respectives de ces conceptions.

Finalement, il convient d'admettre que la définition de la p-prim, telle que suggérée par DiSessa, n'a aucune ambition d'universalité. Et même si elle est restreinte à la physique (jusqu'ici), cette restriction lui donne une allure plus solide bien que circonstanciée. Elle fait peut-être montre de moins d'ambition, en se limitant à un « sens de la mécanique », mais n'en est certainement pas moins opérationnalisable et utile en certains contextes.

2.4.4 Rupture, continuité et constructivisme

De plus en plus nombreux sont les chercheurs d'orientation constructiviste qui considèrent que l'apprentissage n'est pas faite que de conflits et que le « nouveau » et le « vieux » interagissent toujours nécessairement et de manière complexe :

« Si la phase de mise en problème peut correspondre à une rupture importante par rapport aux connaissances antérieures, il est difficile d'admettre que c'est toujours le cas. Cela impliquerait que toute connaissance ne permet de maîtriser que le ou les problèmes dont elle est issue et que tout nouveau problème nécessite une rupture. »

Orange (1997, p.14)

« Il semble donc nécessaire, selon Giordan, Girault, Martinand et de Vecchi, de dépasser les pédagogies donnant un rôle passif aux conceptions préalables. La connaissance se situe à la fois dans le prolongement et dans la rupture des acquis antérieurs qui ont fourni le cadre de questionnement, car, à chaque niveau de compréhension, la structure mentale de l'individu est réorganisée selon une autre approche de la réalité. On connaît à partir de nos savoirs antérieurs, et, en même temps, on apprend contre ces derniers. C'est ce processus conflictuel que les chercheurs proposent d'approfondir. En effet, tout apprentissage significatif est la résultante de l'activité d'un apprenant qui produit du sens à partir des conceptions préalables mobilisées et en fonction des situations et des informations qu'il possède. Ces représentations constituent la grille de lecture de l'apprenant. Les données nouvelles sont alors intégrées ou refusées par l'apprenant qui s'enrichit d'un nouveau savoir. »

Bertrand (1998, p.81)

« D'une manière encore plus restreinte, les travaux de didactique de ces dernières années ont surtout cherché comment il était possible d'aborder un des problèmes majeurs de l'apprentissage scientifique qui apparaît être le suivant: comment obtenir qu'un élève se bâtisse des rapports nouveaux à des savoirs nouveaux, ceci à partir de rapports anciens à des savoirs anciens, et alors que ces derniers peuvent -de par leur efficacité même- se constituer en obstacle à l'évolution nécessaire? »

Johsua et Dupin (1993, p.395)

Le point de vue particulier de DiSessa sur les conceptions permet un certain nombre d'interventions didactiques mieux inscrites dans une telle perspective de continuité; une complexification conceptuelle plutôt qu'un troc. En effet, si l'échange conceptuel consiste à substituer une conception monolithique pour une autre, la perspective de DiSessa propose, quant à elle, de considérer la structure conceptuelle initiale comme point d'appui de l'intervention plutôt que comme obstacle. En effet, comme il a été dit, il existe déjà des éléments valides (certains invariants, extrants, ou relations) dans les représentations initiales, si naïves soient-elles. Et d'ailleurs, quelle autre référence l'élève pourrait-il employer? Comment un novice pourrait-il aspirer à devenir expert?

« There is a fundamental continuity between mundane human experience and physics as science: the latter is made of the former. »

Marton (1993, p.228)

De plus, il y est question de laisser davantage de place à des modèles transitoires pouvant constituer des approximations satisfaisantes des modèles scientifiques. Ainsi, plutôt qu'un changement abrupt (comme le suggéraient Posner et Strike [1982]), le changement conceptuel peut être perçu comme une succession de constructions approximatives vers les modèles canoniques.

Finalement, les compréhensions d'experts et de novices ne doivent plus s'inscrire en opposition. Elles doivent plutôt être vues comme possédant non seulement des différences, mais aussi des éléments semblables. Ainsi, les experts et les novices inscrivent-ils tous leurs connaissances dans des classes de coordination et ils coordonnent aussi à l'aide de p-prims. Cependant, les éléments qu'ils choisissent et les p-prims qui les coordonnent ne sont pas les mêmes. Cette façon de voir l'apprentissage autorise l'existence d'une continuité entre les connaissances « expertes » et « naïves ».

Il devient également possible de concevoir que certaines intuitions spontanées puissent mener à des conceptions correctes du premier coup (des coordinations correspondant aux canons). Or, les modèles de changement conceptuel n'analysent jamais ces éventualités autrement, encore une fois, qu'en expliquant leur existence par le critère de viabilité.

" In general, p-prims establish abstract classes of unproblematic happenings. This is the opposite of misconceptions research strategy, which never analyses "correct" intuitions."

DiSessa (1993, p.121)

Pour toutes ces raisons, il semble que la perspective de DiSessa s'inscrive davantage en conformité avec les principes constructivistes. Celui-ci a d'ailleurs pris la peine d'exposer ce point de vue à de nombreuses reprises.

« Smith, DiSessa & Roschelle argued, on theoretical grounds, that the misconception perspective contradicts constructivism: If students' conceptions are deeply and fundamentally different from experts', then from what can they construct expert conceptions? On empirical grounds, they argued that intuitive reasoning is not as consistent or stable as the misconceptions perspective implies. »

Hammer (1996, p.98)

2.4.5 P-prims et interventions pratiques

Les p-prims semblent aussi pouvoir expliquer ou analyser efficacement un plus grand nombre de cas particuliers. Il est même postulé que c'est tout l'ensemble du « sens de la mécanique » des élèves qui puisse être décrit par des agencements de p-prims. Il en découle qu'un plus grand nombre d'apprenants peuvent être atteints par un enseignement tenant compte des p-prims. Les autres modèles de changement conceptuel, qui ne s'intéressent souvent qu'aux conceptions fréquentes, ne peuvent évidemment cerner autant de cas particuliers. Il en résulte une éventuelle meilleure efficacité dans la classe. C'est d'ailleurs un principe du constructivisme que de s'attarder à ce qu'il y a dans la tête de chaque individu plutôt que ce qu'il peut y avoir dans une hypothétique « tête moyenne ».

Il devient également possible d'estimer le degré de difficulté dont chaque changement conceptuel fait montre. Par l'analyse de la conception, il devient possible de voir si on n'y trouve qu'un petit nombre d'éléments défectueux, ou alors s'il est nécessaire d'orienter l'élève vers une toute autre p-prim. De cette façon on

peut voir si un apprentissage est un ajustement ou une conversion. Il devient alors pensable d'employer cette connaissance pour savoir si un apprentissage considéré peut être qualifié de « raisonnable » à tel ou tel moment de l'apprentissage, ce qui nous rapproche de la notion de « zone proximale de développement de Vygotsky ». Les modèles de changement conceptuel n'offrent, quant à eux, aucun critère pour estimer le degré de difficulté des sauts cognitifs qu'on exige parfois des élèves.

Quant aux aspects affectifs des élèves, si les modèles de changement conceptuel devaient prendre la précaution de ne pas blesser l'élève dans ses convictions (puisque les conceptions présentées s'inscrivent par définition contre les leurs), la perspective de DiSessa, quant à elle, valorise tout naturellement le savoir initial intuitif par une mise en branle de son contenu plutôt que par une pauvre contre-indication qui cherche à compenser une faute. Il y a fort à parier que les élèves, systématiquement impliqués dans la production des savoirs, vont entretenir leur motivation par le respect et la mise en valeur de leur apport.

La contribution de DiSessa laisse donc entrevoir quantités de nouvelles avenues didactiques et pédagogiques.

Chapitre 3
Questions de recherche

Chapitre 3 : Questions de recherche

3 Formulation des questions de recherche

Les nombreuses recherches dont il est fait mention dans le cadre théorique et qui sont à l'origine des différents modèles de changement conceptuel ont étudié et interprété qualitativement les outils et démarches que les sujets mettent en oeuvre pour construire le sens des situations qui leurs sont proposées. On recueille, dans ces études, les verbalisations des sujets au moyen d'entrevues flexibles, individuelles, en dyades ou en groupes, qui laissent place à de nombreuses nouveautés et permettent de voir émerger des conceptions et stratégies d'apprentissage qui seraient peut-être autrement passées inaperçues.

Or, on ne peut présumer que les verbalisations des sujets inscrits dans un contexte d'entrevue permettent à elles seules d'obtenir toutes les informations nécessaires à l'étude de la compréhension, comme on ne peut d'ailleurs prétendre qu'elles sont obligatoirement des indices très fidèles des véritables processus de l'intelligence. Nous nous heurtons dès lors à la difficulté de devoir nous méfier des verbalisations car elles ne permettent pas d'accéder à toute l'intelligence physique telle qu'elle existe chez nos sujets.

Par exemple, selon Vermersh (1994), les individus n'ont absolument pas besoin d'être capables d'explicitier les étapes et opérations nécessaires à la réalisation d'une tâche pour la réussir. Une partie de leur savoir est à ce point intriquée à leur conduite qu'elle en reste (parfois à jamais) inexplicitée. On dit alors que ces connaissances, souvent les plus familières, sont automatisées. Caverni (1988) ajoute que plus une conduite est automatisée, moins d'informations deviennent disponibles à son propos. On imagine alors assez mal comment les verbalisations qu'on obtient pendant des entretiens normaux pourraient suffire à décrire l'ensemble des actions intelligentes d'un individu

Pour parvenir à objectiver de telles connaissances automatisées, il faut employer un protocole d'entrevue qui permette leur explicitation. Ce protocole sera expliqué en détails dans le chapitre 4. On se contentera de dire ici que dans un contexte de

recherche exploratoire, tel que celui qui est proposé ici, il convient non seulement de mettre en place un protocole qui puisse laisser apparaître des éléments nouveaux ainsi que de nouvelles procédures, mais le questionnement d'entrevue doit aussi être formulé tel qu'il peut laisser le sujet produire librement des verbalisations riches et intéressantes, et ce, hors de toute influence autre que les intuitions et engagements qui motivent ses choix de réponse et qui ne sont rien d'autre, en fait, que l'objet de recherche.

Dans la construction de son savoir, l'élève peut employer tout un arsenal de ressources. Parmi celles-ci, certaines se verbalisent tout naturellement, comme une équation bien connue ou un slogan, tandis que d'autres (comme les p-primis, dans le cas des connaissances de la physique) se trouvent à un niveau particulièrement fondamental et donc, souvent implicite. Ce sont, rappelons-le, les outils de base employés par l'élève qui lui permettent de construire les connaissances procédurales et les conceptions. Ce sont les habitudes interprétatives par le moyen desquelles le sujet s'approprie le réel.

Ces outils, de par leur caractère fondamental, vont être particulièrement difficiles à identifier et à caractériser. Largement employés dans les apprentissages tant scolaires qu'usuels, ils finissent en effet par être automatiques. C'est à partir de ce moment qu'ils deviennent difficiles à étudier.

« La première difficulté est que l'action est une connaissance autonome, et que le sujet pour réussir son action n'a pas besoin de savoir qu'il sait. C'est-à-dire qu'il n'a pas besoin d'avoir conscientisé les moyens de sa réussite, pour réussir. Psychologiquement, c'est un des obstacles majeurs auquel on s'est toujours heurté dans le questionnement relatif à l'action : pour pouvoir répondre, l'élève, le formé, le professionnel, doit d'abord ou en même temps conscientiser ses connaissances réfléchies. Cette difficulté se traduit par la réponse « je ne sais pas » à la question : « comment faites-vous? », ou bien par un silence embarrassé, ou bien encore par un discours donnant la description de ce qu'il faudrait faire. »

Vermersh (1994, p.71)

On retrouve aussi chez Piaget cette même idée que la réussite précède la compréhension, autrement dit que l'action est antérieure à sa conceptualisation, laquelle requiert une prise de conscience de l'action à partir, notamment de ses résultats. On peut donc réussir (au plan de l'action) sans pour autant comprendre les raisons de la réussite.

Jean Paul Caverni (1988) présente d'ailleurs cette difficulté comme étant une objection des plus importantes à la valeur des verbalisations. Les p-prim sont clairement des procédures intuitives de ce type. D'ailleurs, DiSessa nous indique que l'un des indices fondamentaux qui nous permettent de reconnaître les p-prim obéit à un principe d'impénétrabilité, c'est-à-dire qu'elles apparaissent particulièrement difficiles à atteindre et à analyser. La présente recherche constitue donc un défi en ce qu'elle s'attaque directement à ce principe d'impénétrabilité puisqu'elle vise précisément à mettre en évidence – à reconnaître ou à identifier – ces éléments de connaissances intuitifs et implicites qui orientent aussi bien l'action que l'interprétation de ses résultats. Tout discrets et subtils que sont les éléments des classes de coordination, il nous faudra donc les mettre à jour.

DiSessa indique d'ailleurs à ce propos que, d'après lui, la confirmation de l'existence des p-prim ne peut se faire directement. Comme on a découvert l'électron par des moyens indirects (effets mécaniques, de fluorescence ou électromagnétiques), on pourra de la même manière identifier et reconnaître les p-prim. Il nous indique également des pistes pour reconnaître de cette façon la présence possible de p-prim. Par exemple, si des sujets se trouvent très satisfaits de leurs propres explications (sans qu'ils n'émettent de doute à leur endroit), il y a de bonnes chances qu'une p-prim soit présente à l'intérieur du discours. Marton (1993) est d'avis, quant à lui, que si les p-prim sont basées sur l'expérience des sujets et sont des structures de la conscience, ils devraient, en principe, être observables.

Selon Viennot (1979 et 1996), c'est dans l'étude des problèmes de physique formulés le plus simplement qu'on peut le plus facilement mettre en évidence l'emploi de compréhensions fautives. Viennot, dont on ne peut nier l'importante contribution en didactique de la physique, avait exploré les conceptions de sujets pour le simple cas d'une balle lancée vers le haut qui finit par retomber. L'ampleur des découvertes alors effectuées à propos de l'intelligence mécanique de ses sujets a de quoi surprendre. Nous inspirant des recherches de Viennot, il semble donc nécessaire de s'en tenir à des situations mécaniques très primaires afin de favoriser des échanges dont les objets sont des descriptions qualitatives des raisons physiques des mouvements.

La présente thèse propose donc de suivre en détails les itinéraires cognitifs de sujets inscrits dans des contextes de situations-problèmes. Nous examinerons, par le biais de verbalisations libres, le développement de l'intelligence mécanique des sujets lorsqu'ils sont mis en contact avec des situations simples de mécanique newtonienne inscrites à l'intérieur d'un micromonde informatisé. À chaque moment de cet examen, nous nous poserons les questions de recherche suivantes :

- 1) Quels sont les modèles, symboliques ou formalisés, transitoires ou définitifs, que les sujets vont développer pour construire leur compréhension des situations?
- 2) Quelles sont les conceptions, généralement formulées explicitement, qui joueront un rôle d'obstacle ou de « tremplin » dans la compréhension de la logique des situations?
- 3) Quelles sont les p-prims employées par les sujets, ayant possiblement un rôle à jouer dans l'élaboration des modèles précédemment mentionnés ainsi que dans la coordination des variables, qu'elles soient employées fautivement ou avec succès?
- 4) Quelles sont les autres considérations relatives aux p-prims qui pourraient se manifester lors de l'examen de la coordination des paramètres des situations? (Cette question est en fait une sous-question de la question 3)

Chapitre 4
Méthodologie

Chapitre 4 : Méthodologie

4.1 Introduction

La description de la méthode retenue pour se conformer aux problèmes de recherche et obtenir les verbalisations souhaitées se divise en quatre parties principales.

La première d'entre elles présente les sujets qui ont été interrogés. Il y est notamment question de l'enrôlement, de la sélection ainsi que des critères à l'origine de la sélection. Par la suite, une seconde section s'intéresse aux situations-problèmes (ou simplement *situations*) qui ont été élaborées et soumises aux sujets. Une description générale expose d'abord les possibilités du logiciel *Interactive Physics^{MD}*. Des descriptions spécifiques à chacune des situations suivront. Une troisième partie expose le procédé d'entrevue retenu. Il y est question des initiatives proposées pour obtenir des explicitations plutôt que des verbalisations simples. Finalement, une quatrième partie présente le mode de traitement des données privilégié. On y voit au passage que l'analyse de verbalisations libres à propos de problèmes ouverts pose des difficultés particulières qu'il convient de cerner.

4.2 Les sujets

Le milieu dans lequel la recherche a été tenue est l'école secondaire Jeanne-Mance, de la Commission scolaire de Montréal (CSDM). École publique située dans un milieu défavorisé, Jeanne-Mance est une école de 1250 élèves. Sur le total des 94 volontaires qui se sont manifestés, vingt sujets ont été choisis pour vivre les entrevues. Ceux-ci ont été retenus en fonction, principalement, de leur disponibilité et d'un critère de distribution égale des genres. En aucun cas, on a tenu compte de leurs résultats scolaires ou de l'opinion que leurs enseignants ont parfois exprimée à leur égard. Étant donné notre choix de considérer autant d'élèves de chaque niveau pour obtenir un portrait relativement représentatif du secondaire, nous avons donc passé en entrevue quatre élèves de première secondaire, quatre de deuxième, etc. pour un total de 20.

Cependant, sur ce total de vingt sujets, seuls les verbalisations de cinq d'entre eux, un par niveau, ont fait objet d'une étude systématique. Ce sont ces cinq sujets qui ont fourni la majorité des épisodes traités dans l'analyse. Quelques rares épisodes qui se sont produits dans les autres entrevues sont parfois évoqués brièvement, mais pour l'essentiel, nous nous en tiendrons aux cinq sujets principaux. Le choix de ces cinq sujets sur les vingt disponibles est basé sur un certain nombre de critères.

Premièrement, les sujets devaient produire des verbalisations librement. C'est-à-dire qu'ils ne devaient pas chercher à satisfaire l'intervieweur ou à donner des réponses stéréotypées ou classiquement « scolaires ». L'objectif de la recherche est d'obtenir des verbalisations libres de toute « coutume scolaire » et dont le contenu révèle des intuitions ou des réflexions qui prennent les situations explorées pour objet plutôt que la nécessité de produire de « bonnes » réponses. Bien sûr, l'obtention totale et sans écart de cette liberté est impossible, mais ce critère a permis d'écarter quelques sujets rapidement.

Deuxièmement, les sujets devaient produire un minimum de verbalisations. En effet, ces verbalisations constituent le moyen privilégié pour nous d'obtenir des informations sur les processus de compréhension des sujets. Il est donc beaucoup plus intéressant d'obtenir des réponses, hypothèses, prédictions, justifications et explications abondantes. Certains sujets ont peu parlé. L'interprétation de leurs itinéraires cognitifs est alors beaucoup plus difficile. Ces sujets ont été écartés.

Troisièmement, les sujets devaient faire intervenir leurs intuitions. C'est-à-dire que s'ils ont été exposés à une formation en physique-mécanique avancée, ils risquaient de systématiser la résolution des défis qui leurs ont été posés en conformité avec cette formation, s'éloignant ainsi des intuitions qu'on peut possiblement retrouver à l'abord d'un cours de physique et qui sont susceptibles d'interférer avec la formation. Ce critère a permis d'écarter un sujet de cinquième secondaire dont l'expérience scolaire en mécanique a probablement noyé les intuitions initiales.

Quatrièmement, les sujets devaient être isolés les uns des autres. Au terme de l'une des entrevues, un de nos sujets a admis avoir expliqué à un autre (moins avancé dans les situations) les solutions qu'il avait découvertes pour résoudre certains défis. On a alors choisi de l'écartier.

Finalement, les verbalisations devaient être riches. Si le but de la présente étude avait été de présenter un paysage finement représentatif d'une grande population, ce critère n'aurait pu être employé pour écartier certains sujets d'une analyse systématique. Les considérations de validité externe nous eurent alors contraints à nous rabattre sur d'autres critères. Cependant, ce n'est pas le cas ici. Au lieu d'entretenir une ambition de représentativité, le présent exercice de présentation cherche davantage à saisir la nature des processus impliqués dans un contexte particulier, local certes, mais relativement bien cerné et balisé. Ce critère, moins binaire que les précédents, a servi à terminer la sélection des sujets afin qu'il n'en reste plus qu'un par niveau.

Chaque sujet interviewé se voit convoqué de 5 à 7 reprises, pour une moyenne d'environ 6 heures. Le choix de l'arrêt des rencontres pour un sujet est basé sur 1) la disponibilité de celui-ci, 2) un développement avancé de la dernière situation ou 3) une démotivation manifeste de celui-ci. Ce nombre d'entretiens a semblé adéquat pour s'approprier correctement la réalité des situations tout en gardant les sujets motivés et intéressés. Au total, cela représente plus de 120 heures d'enregistrement. Si on inclut les deux séances de pré-expérimentations en présence d'élèves qui ont servi à mettre au point les situations, on peut compter plus de 145 heures.

4.3 Les situations

Les situations proposées aux élèves ont été conçues sur le logiciel *Interactive Physics^{MD}*. Il s'agit d'un logiciel conçu à la base pour la construction de modèles en génie mécanique mais dont l'accès est si convivial qu'il autorise son emploi dans les ordres d'enseignement inférieurs. Classées dans une séquence considérée comme croissante en termes de difficulté, les situations sont au nombre de cinq. Elles ont été programmées à partir de la matrice vierge du logiciel. Elles sont donc

des progiciels. Toutes mettent en jeu une balle qui évolue sur l'écran. Cette balle se met en mouvement conformément aux lois de la mécanique telles que Newton les a découvertes et telles qu'elles gèrent n'importe quelle situation inscrite dans le logiciel. Cet ensemble des situations constitue un *micromonde de mouvement*, c'est-à-dire, comme le propose Legendre (1993), un environnement d'apprentissage qui met l'accent sur le caractère fonctionnel et expérientiel de la connaissance physique. À noter : toutes les situations du micromonde agissent comme en l'absence de gravité et de friction avec l'air.

Les situations que nous avons développées constituent d'ailleurs une version plus élaborée des micromondes de Legendre (1993, 1994, 1995). Ceux-ci avaient été conçus à partir du programme de « tortue dynamique » de DiSessa (1992) et se caractérisaient par la possibilité de donner des impulsions (des « Kicks ») de différentes grandeur dans différentes directions. Ces micromondes font abstraction de la friction, de l'attraction gravitationnelle et de la masse de l'objet. Elles étaient, en quelque sorte, des occasions idéales d'étudier les effets directs des « coups » sur la vitesse finale. Cette dernière, étant donné la masse fixée, était donc équivalente à la vitesse finale, lorsque la vitesse initiale est nulle.

Pour en revenir à nos situations, on peut dire qu'à chaque essai, le sujet peut simplement agir sur un certain nombre de paramètres susceptibles d'influencer le comportement de la balle. Lorsqu'il a fait le choix de ces paramètres -qu'il inscrit dans les espaces prévus à cet effet- et qu'il a eu l'occasion de discuter de ceux-ci avec l'intervieweur, il est prêt à lancer son essai. Il peut alors appuyer sur le bouton « run » pour initier le déroulement de l'essai et suivre le progrès de la balle à l'écran. Celle-ci se comporte en conformité avec le choix de ces paramètres. Certaines informations concernant ce comportement peuvent alors être obtenues par l'observation de la balle (estimations de la vitesse, position de la balle ou de sa photo, trajectoire) alors que d'autres peuvent être obtenues par une lecture à l'écran (chronomètre, vélocimètre). C'est à la lumière de ces informations que le sujet peut se renseigner sur l'effet de son choix de variables, en tirer des conclusions, ajuster ses modèles et préparer les essais suivants. Pour aider le sujet à évaluer certaines grandeurs, certaines situations sont pourvues de rapporteurs d'angles et de règles fixées en toile de fond. D'autres objets iconiques (cœurs,

fleurs, flocons de neige) sont également fixés sur cette toile. Ils n'ont pas de rôle mécanique à jouer dans les situations, mais vont cependant pouvoir servir de point de repère ou de cibles à atteindre. Malgré le fait que ces icônes soient omniprésentes, les sujets ont tous rapidement compris qu'ils n'avaient d'autre rôle à jouer dans les explorations que celui de fournir des références spatiales. Aucun sujet n'a jamais proposé, par exemple, que la balle puisse rebondir sur un de ces objets.

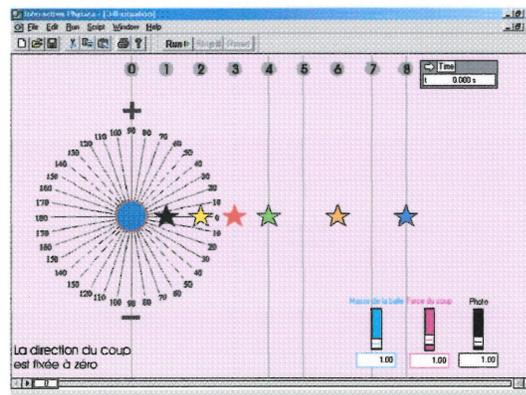


Figure 1) Un exemple de situation : la situation 03

Les trois premières situations, versions évoluées des premiers micromonde de Legendre (1993, 1994, 1995), proposent aux sujets le cas d'une balle initialement au repos à laquelle on donne un « coup ». Les paramètres inscrits dans la situation par les sujets vont principalement définir la nature de ce « coup ». Par la suite, dans les situations suivantes, d'autres variables, telles que la masse de la balle ou la « photo » (c'est-à-dire le délai avant qu'une « photo » de la balle ne soit prise) sont ajoutées au fur et à mesure que le sujet progresse. Les deux dernières situations, quant à elles, proposent un jeu de paramètres semblables à la différence près que la balle est initialement en mouvement. Toutes ces situations s'apparentent clairement au « système des coups » de Legendre (1993, 1994, 1995), bien que certaines différences soient manifestes, comme, par exemple, le fait que l'état cinétique initial de la balle soit toujours le même au moment où le coup est donné ou que les variables « masse » et « photo » soient jusqu'ici

inédites. La présence de ces variables permettra d'étendre les conclusions de l'étude.

Dans les micromondes de Legendre (1993, 1994, 1995), trois schèmes ont occupé le plus clair des entrevues. Le **schème unidimensionnel** correspondait à la représentation des changements de vitesse et d'orientation dans les situations unidimensionnelles. Ceci peut être approché de notre situation 04, où tous les mouvements ne peuvent se produire que sur un axe (puisque la direction du coup ne peut être portée que dans la même direction que la direction initiale, ou dans la direction inverse), à la différence près que la masse est aussi un facteur du problème. Le **schème de la moyenne**, quant à lui, apparaît, quant à lui, comme un cas particulier de notre situation 05, où toutes les directions et intensité du coup sont permises. Dans ce schème, cependant, la force du coup était fixée; égale à la grandeur du mouvement. Quand au **schème de l'écart**, qui correspondait à la représentation des changements de vitesse dans les situations bidimensionnelles, celui-ci ressemblait beaucoup plus à notre situation 05 en termes des variables impliquées. Nos trois premières situations, les 01, 02 et 03, peuvent être considérées comme des préalables aux autres situations. Ce sont les cas où la balle est initialement au repos. Ces dernières situations nous ont paru essentielles à faire vivre à nos sujets étant donné l'importance de compenser pour les difficultés supplémentaires que constituent la « masse » et la « photo ».

Nous allons maintenant décrire chacune des situations employées dans les entretiens. Nous mettrons notamment l'accent sur leurs caractéristiques en plus d'insister sur les éléments de coordination qu'elles cherchent à mettre en relief.

4.3.1 La situation 01

La première situation à laquelle sont confrontés les sujets s'ouvre sur fond orange. Chaque sujet a ici la possibilité d'intervenir sur deux paramètres, la *force du coup* et sa *direction*. Il a le choix, pour inscrire les valeurs choisies, de les taper à partir du clavier ou de déplacer un bouton jusqu'à la valeur désirée. La valeur de *force du coup* (bouton rose) varie de 0 à 10 et celle de la *direction du coup* (bouton vert) de -180 à 180 . Cette dernière correspond, à la trajectoire de la balle que le sujet peut lire sur le rapporteur d'angles. Quant à la vitesse de celle-ci, elle varie proportionnellement en fonction du coup qui lui est donné. Cette vitesse correspond toujours à la moitié de la force du coup et apparaît sur le vélocimètre. Étant donné que la situation ne tient pas compte de la friction due au déplacement, la vitesse reste constante. L'intervieweur dispose ici de quatre « cibles » disposées sur l'écran (une dans chacun des quadrants) pour lancer des défis aux sujets. Ces défis, relativement nombreux, annoncent aux sujets les tâches qu'ils sont appelés à réaliser. Par exemple, la balle doit traverser telle cible, à telle vitesse.

Ici, dans la figure 2, on peut suivre (en trois temps) l'évolution de la situation si, par exemple, un sujet choisit les valeurs 4 et -165 pour la *force du coup* et la *direction du coup*, respectivement, dans une tentative de traverser le centre de la fleur à une vitesse de 2m/s.

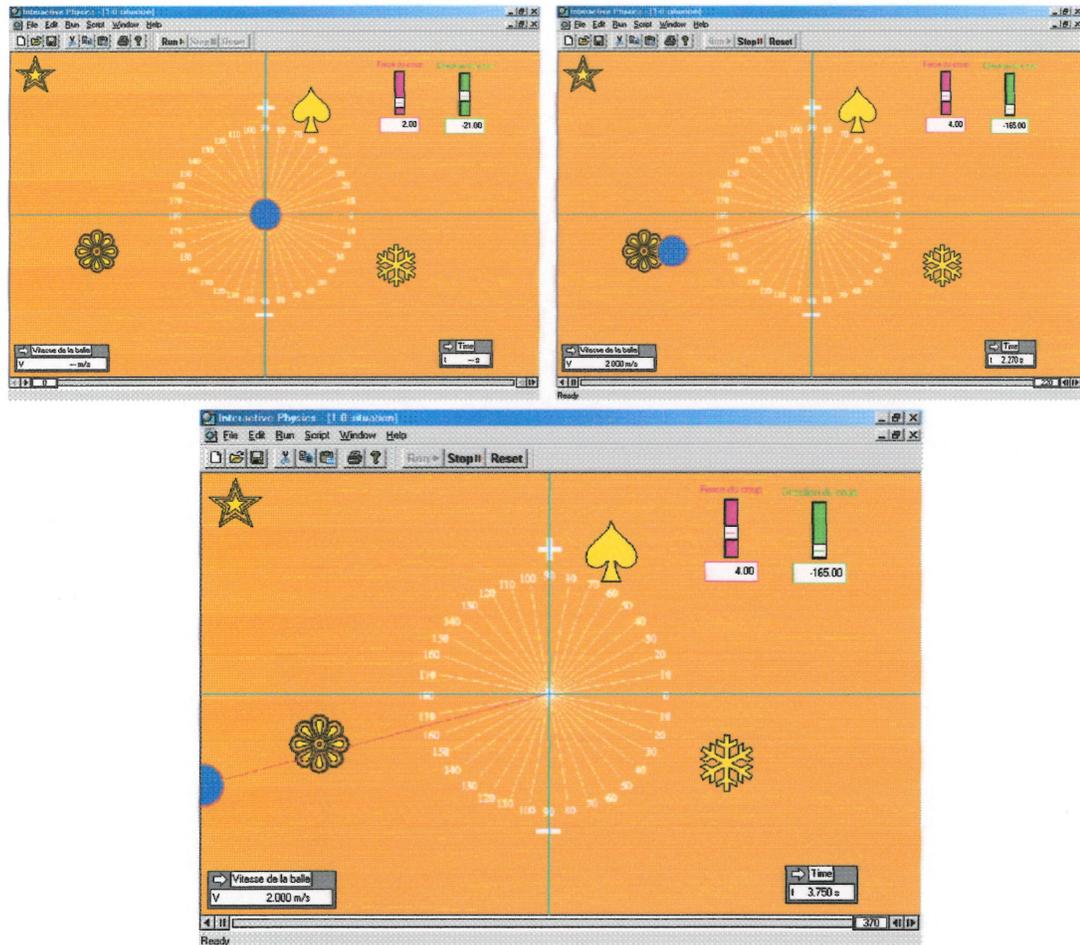


Figure 2) La situation 01 en trois temps

4.3.2 La situation 02

La seconde situation à laquelle sont exposés les sujets s'ouvre sur fond jaune. Elle obéit à la même logique physique que la situation 01 et elle est très semblable en apparence. L'emplacement des cibles est cependant changé et, en plus de la *force du coup* et de sa *direction*, on retrouve deux paramètres supplémentaires : la *masse de la balle* (bouton bleu) et la *photo* (bouton noir).

Le premier de ces deux paramètres peut varier depuis la valeur 0,05 jusqu'à la valeur 20 en changeant la position du bouton ou, si le déplacement du bouton ne permet pas d'atteindre précisément la valeur désirée, en tapant au clavier. Le choix de la valeur du paramètre *masse* a pour effet d'augmenter ou de réduire la masse

de la balle. Ainsi, au moment de lancer la situation, la balle répond non seulement en raison proportionnelle à la force du coup (paramètre dont nous avons parlé dans la section précédente), mais aussi en *raison inverse* de la masse. Ainsi, lors du coup, une balle plus massive accélère conformément à $F=ma$, ce qui signifie, par exemple, que si on double sa masse, l'accélération est deux fois moins importante.

Un autre bouton, celui de la *photo* peut afficher une valeur se situant entre 0 et 10. Il s'agit, en fait, d'une valeur de temps, ou un délai, exprimés en secondes. À partir du moment où la situation est lancée, un chronométrage photo s'enclenche de sorte que lorsque le délai indiqué par le bouton est passé, la balle va déposer sur le fond de l'écran une sorte d'ombre ou de photo en noir. Cette photo permet alors de stigmatiser l'écran de la position que la balle occupait au moment précis où la photo a été prise. Il devient alors possible de demander aux sujets de recouvrir les cibles avec cette photo, plutôt que de simplement les traverser et de laisser la balle continuer sa course, comme c'était le cas dans la situation précédente.

Les objectifs que vise cette situation se situent au niveau des coordinations que les sujets peuvent établir entre les différents paramètres. Étant donné que tous les quatre paramètres sont susceptibles d'influencer la localisation finale, ou le « point d'atterrissage » de la photo, l'articulation des variables les unes par rapport aux autres peut s'avérer être une opération complexe. En résumé, plus la *force du coup* et la variable *photo* seront élevées, plus la photo se prend loin de l'origine et plus la masse est élevée, moins elle se prend loin.

Ici, dans la figure 3, on peut suivre (en trois temps) l'évolution de l'essai tel qu'un sujet a choisi d'y inscrire les valeurs (0,8), (2), (1,4), et (25) pour la *masse*, la *photo*, la *force du coup* et la *direction du coup*, respectivement, dans une tentative de recouvrir l'étoile avec la photo.

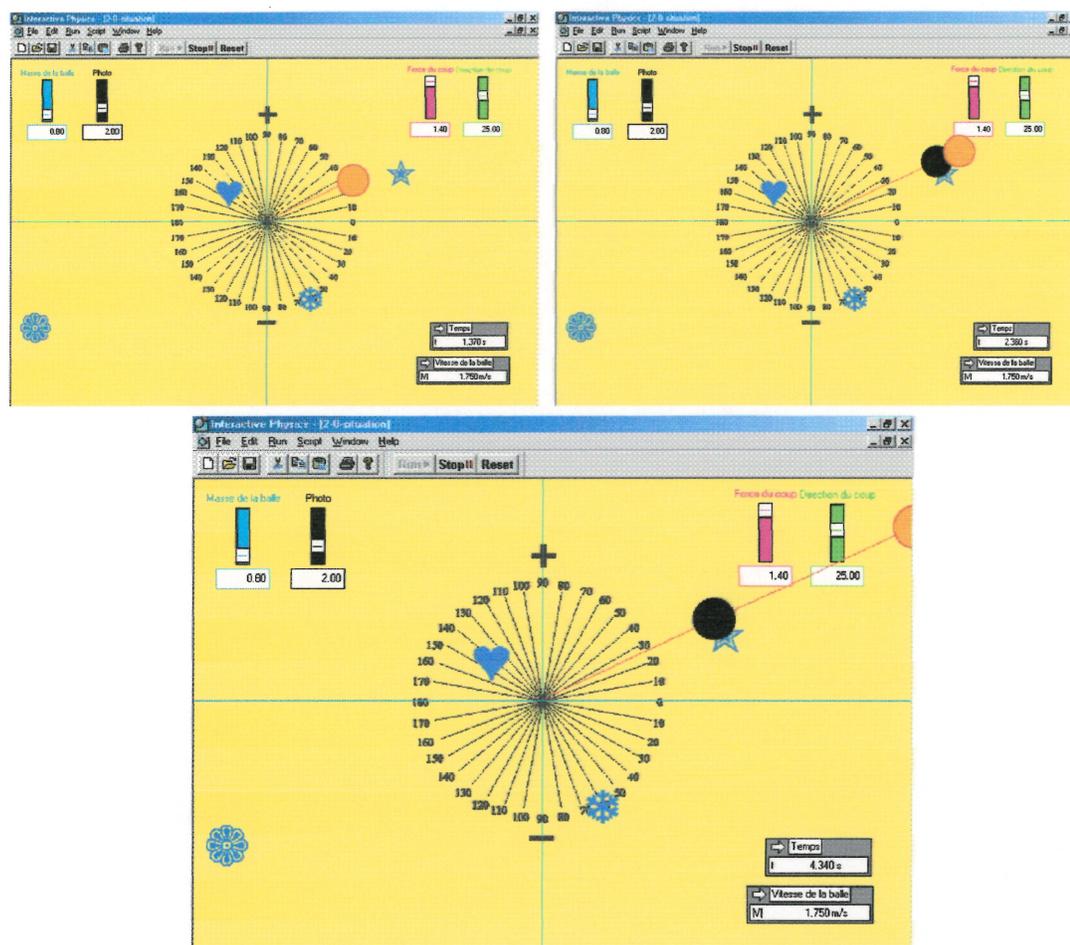


Figure 3) La situation 02 en trois temps

4.3.3 La situation 03

La situation 03 s'ouvre sur fond mauve. Son fonctionnement est très semblable à celui de la situation 02 à quelques exceptions près. Premièrement, le bouton *direction du coup* a disparu. Il est remplacé par un commentaire écrit : « la *direction du coup* est fixée à zéro ». Le sujet comprend rapidement que la balle prend donc, à chaque essai, un coup dirigé vers la droite. Toutes les cibles sont d'ailleurs situées sur le prolongement de cette direction et la position initiale de la balle est située plus à gauche sur l'écran afin pouvoir suivre sur un plus long segment son évolution. Même s'il devient inutile, on a laissé en place le rapporteur d'angles afin de favoriser la conviction que la situation 03 fonctionne bel et bien comme la

précédente. Les trois autres boutons habituels (*masse*, *force*, *photo*) sont cependant présents, affichant les mêmes couleurs. L'indicateur de la vitesse de la balle est, quant à lui, absent.

La différence principale entre la situation 02 et celle-ci se situe au niveau des cibles à recouvrir. Ces dernières sont situées sur des lignes verticales qui ramènent à des mesures de distance chiffrées. En d'autres termes, la situation permet une lecture rapide de D , c'est-à-dire une lecture de la distance entre le point-position original de la balle et le point de la prise de photo. Par exemple, l'étoile verte est une cible dont le $D=4$. Si une photo est prise qui recouvre complètement cette cible, la distance origine-photo sera de 4.

On présente à tous les sujets la même situation de départ. On leur indique alors que lorsque la valeur de tous les boutons est fixée à 1, la photo de la balle est prise sur l'étoile verte ($D=4$). Lorsqu'on lance la situation avec ces valeurs de *masse*, de *force* et de *photo*, la balle se comporte conformément à ce qui apparaît en figure 4. Cette information constitue le point de départ (ou la référence) pour justifier les modifications que les sujets choisiront d'apporter aux variables dans le but de recouvrir les autres cibles. C'est en effet sous la forme d'un « passage de telle étoile à telle autre » que l'intervieweur lance ses défis au sujet.

Il y a six cibles (toutes des étoiles, mais de couleurs différentes) installées sur des valeurs entières de D . Ces valeurs sont respectivement 1,2,3,4,6 et 8 pour les étoiles noire, jaune, rouge, verte, orange et bleue. Le choix de ces valeurs pour les cibles est déterminé en fonction des rapports simples qu'il est possible d'établir entre des paires de ces valeurs; double, triple, quadruple, octuple, moitié, tiers, quart, huitième. Il est aussi possible de dresser entre d'autres paires de valeurs des rapports non entiers. Par exemple, de l'étoile bleue (8) à l'étoile rouge (3) le rapport est de 2,666... L'intervieweur propose aux sujets des « passages » qui impliquent les deux types de rapports.

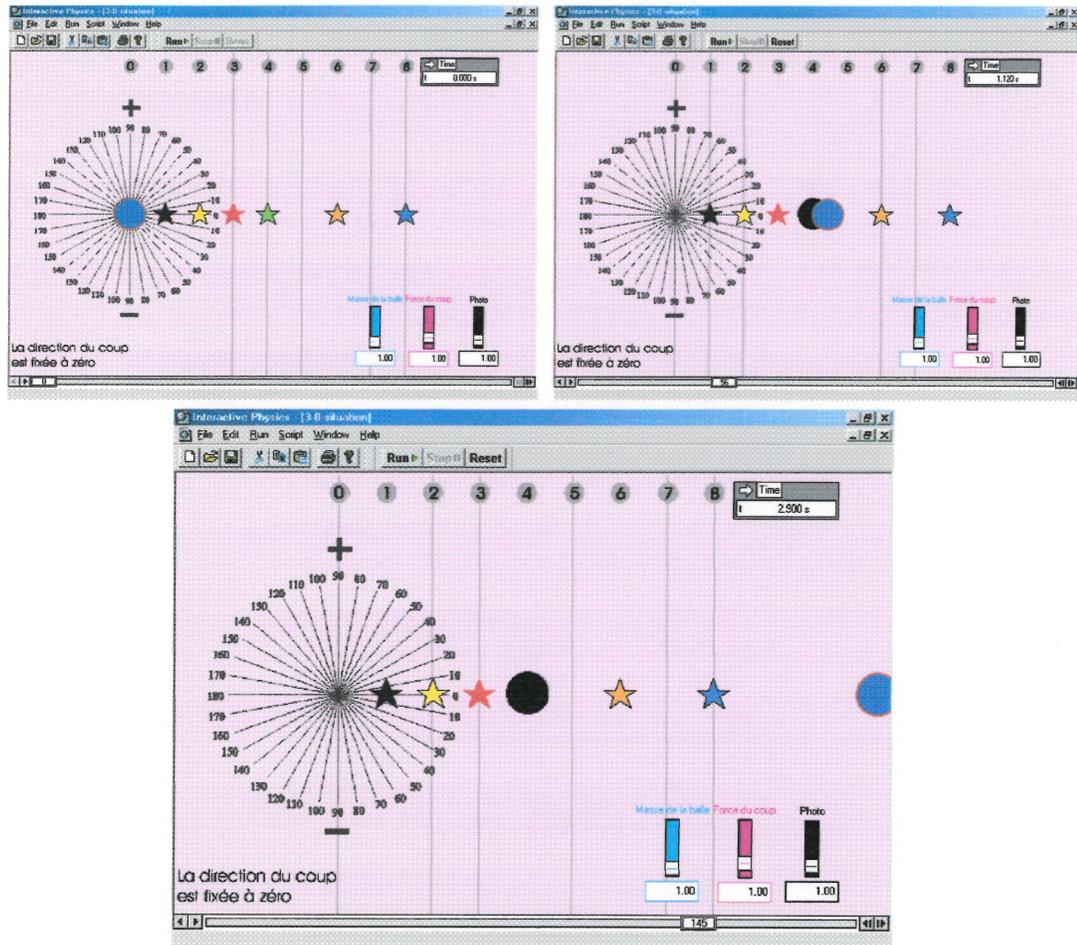


Figure 4) La situation 03 en trois temps

En d'autres moments, à partir d'autres combinaisons de valeurs dont on connaît le résultat (D), on demande au sujet de changer plus d'un paramètre pour obtenir un même D ou pour recouvrir une autre cible.

Il est clair ici que l'objectif de la situation consiste à traduire dans le langage mathématique les intuitions développées dans la situation précédente. Les sujets, contraints de prendre explicitement en compte les évaluations de D, vont donc être, par conséquent, invités à construire des articulations logico-mathématiques entre les variables de la situation. Ainsi, les coordinations, dont on a vu poindre les balbutiements dans la situation 02, doivent davantage être explicitées, voire même mises en équation.

4.3.4 La situation 04

La situation 04 s'ouvre sur fond gris-bleu. À première vue, on peut y reconnaître de nombreux éléments des situations précédentes ainsi. Le bouton *photo* a cependant disparu. Il n'y a donc pas de prise de photo. Ce bouton a été remplacé par le bouton *direction du coup*, qui effectue un retour depuis la situation 02. Il ne permet cependant que deux choix : les directions 0 et 180. Il est donc impossible de donner des coups à la balle dans d'autres directions que la droite (0°) et la gauche (180°). Le fonctionnement est clairement inspiré des micromondes de Legendre (1993, 1994, 1995) où le schème unidimensionnel s'est révélé.

Une autre différence : la balle, avant de lancer les essais, est absente de l'écran. Elle n'occupe pas sa position habituelle au centre du rapporteur d'angles. Ce n'est qu'au moment de lancer l'essai que celle-ci apparaît depuis la gauche de l'écran en se dirigeant vers le centre du rapporteur d'angles. Elle se déplace alors toujours à la même vitesse (1m/s) peu importe les valeurs inscrites dans les boutons (incluant la *masse*). Ce n'est qu'au moment où celle-ci traverse le centre du rapporteur d'angles qu'elle « encaisse » un « coup » de direction et d'intensité conformes aux valeurs choisies et inscrites dans les boutons par l'expérimentateur. Pour éviter que les sujets ne confondent ce coup avec un autre coup hypothétique qui aurait pu propulser la balle au moment de lancer l'essai, un pictogramme pointant le centre du rapporteur d'angles indique « le coup est donné ici ».

Pour les mêmes valeurs choisies, la balle va, dans cette situation, se comporter différemment de ce qu'elle aurait fait dans les autres, où la vitesse initiale était nulle. Les sujets devront donc devoir tenir compte de ce momentum dans leurs explorations.

Vu le choix restreint des *directions de coup* possibles (0° et 180°), la balle ne peut changer la direction de sa trajectoire. Celle-ci ne peut qu'accélérer (coup donné vers la droite [0°]) ou ralentir (coup donné vers la gauche [180°]). Ce sont la trajectoire apparente de la balle et la lecture de sa vitesse sur le vélocimètre qui constitueront les informations privilégiées pour sanctionner les essais. L'intervieweur pose d'ailleurs ses défis en ces termes. Par exemple, il peut

réclamer au sujet qu'il fasse « rebondir la balle vers la gauche à une vitesse de 2m/s ». Dans la figure 5, on peut voir, en trois temps, le comportement de la balle tel qu'un coup lui est donné vers la *direction 0* à une *force* de 1 alors que cette balle a une *masse* de 1. Notez que la vitesse indiquée sur le vélocimètre passe de 1m/s à 2m/s au moment où le coup est donné.

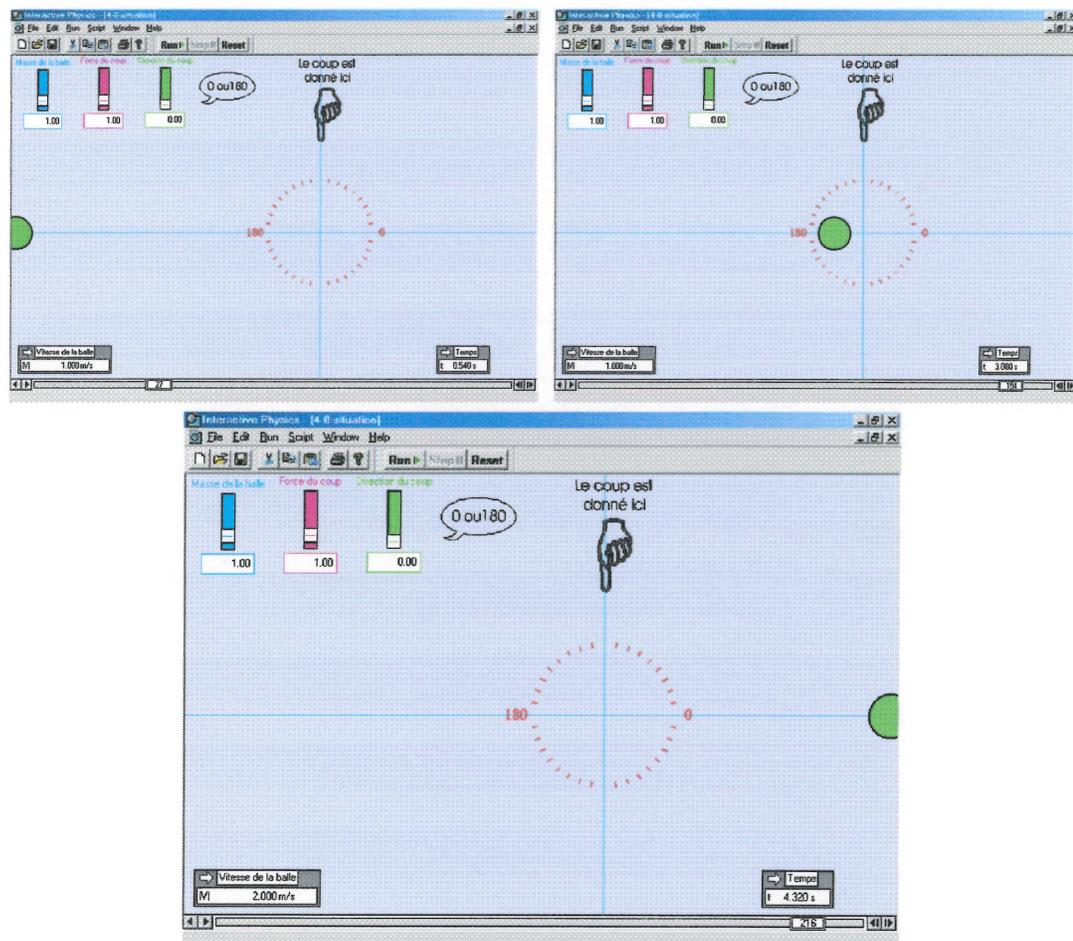


Figure 5) La situation 04 en trois temps

La situation rend possible l'examen des raisons que les sujets feront intervenir pour expliquer les vitesses et directions finales; des conceptions telles que « la vitesse initiale n'a pas d'influence sur l'effet du coup » ou des p-prim, comme la p-prim d'Ohm ou « force as a mover » ou celle d' « équilibre ». Dans cette situation, il est par exemple possible d'immobiliser la balle au centre du rapporteur d'angles, en frappant d'une *force de coup* de 1 dans la *direction du coup* de 180. Il est alors

intéressant d'examiner quelles seront les stratégies évoquées par les sujets pour construire leurs coordinations.

Dans les premières explorations, on choisit de fixer la masse à 1. Ce n'est que par la suite, quand la compréhension est plus avancée, qu'on tente des essais pour d'autres valeurs de *masse*.

4.3.5 La situation 05

La situation 05 s'ouvre sur fond vert. Son fonctionnement est en tous points semblable à celui de la situation précédente à l'exception près que la *masse de la balle* est fixée à 1. C'est-à-dire que le bouton permettant habituellement de choisir la *masse* a disparu. De plus, le bouton *direction du coup* permet désormais de fixer cette dernière à n'importe quelle valeur du rapporteur d'angles, de -180° à 180° . On se souvient que la situation précédente obligeait de choisir entre deux valeurs de *direction* uniquement : 0° et 180° . Le sujet peut donc observer le comportement d'une balle à laquelle on peut alors donner un coup d'intensité voulue dans la direction de son choix. Comme dans la situation précédente, le coup est donné à la balle alors qu'elle est déjà en mouvement (à 1m/s). On remarque que si on fixe la *force du coup* et la *masse de la balle* à 1, on obtient le *schème de la moyenne*, que Legendre (1993, 1994, 1995) avait développé avec ses sujets. Si on permet au sujet de choisir librement la *force du coup*, alors qu'on fixe la masse à 1, on peut obtenir le *schème de l'écart*. (Legendre, 1993, 1994, 1995). Bien entendu, si tous les paramètres sont à l'initiative de l'élève, la situation en est beaucoup plus complexe.

L'objectif premier de cette situation est d'examiner la prise en compte par le sujet du mouvement initial de la balle dans les réflexions visant à résoudre les défis. Sans ce mouvement, en effet, la situation se comporterait conformément aux situations 01, 02 et 03. C'est donc en cela que la situation 05 se distingue des autres. Il est également intéressant de surveiller le comportement des sujets dont la compréhension qualitative de la situation précédente était la meilleure. C'est-à-dire qu'on examine s'ils sont en mesure de transposer leur prise en compte du momentum initial de la balle dans des problèmes de trajectoire, en plus de

problèmes de vitesse finale. On a choisi de présenter cette situation à tous les sujets bien qu'ils n'aient pas tous nécessairement complètement maîtrisé la situation précédente.

On peut voir, en trois temps, dans la figure 6, le comportement de la balle lorsqu'un coup lui est donné dans la *direction* 90 à une *force* de 1. Nous avons choisi de présenter cet exemple particulier, car il est un épisode typique de la situation 05; les sujets, dans une tentative de traverser l'étoile (située à la position 90° sur le rapporteur d'angles) vont choisir d'inscrire les valeurs 90 et 1. Le lecteur peut suivre facilement la trajectoire alors obtenue puisque la balle laisse à l'écran une trace rouge de son passage.



Figure 6) La situation 05 en trois temps

4.3.6 Aspect ludique des situations

Les entrevues, telles qu'elles sont planifiées et telles qu'elles font intervenir des situations-problèmes informatisées où des défis occupent une place de premier plan, peuvent, en effet, avoir un peu l'air d'un jeu.

Il ne s'agit évidemment pas de sacrifier la valeur des entrevues au seul plaisir de jouer, mais il semble possible de croire que si l'élève se sent interpellé de la même manière qu'un jeu pourrait le faire, cette avidité toute « naturelle » qu'ont les enfants à jouer et à résoudre les problèmes peut rendre service à une recherche comme la présente. En effet, cette dernière présume de la motivation du sujet; il ne s'agit pas d'une recherche qui fait de la motivation un objet à explorer.

Le jeu n'est d'ailleurs peut-être pas toujours qu'un jeu. On a souvent tendance à confondre jeu et loisir. Or, nous suggère Rieber (1996), le jeu n'est pas nécessairement le contraire du « travail », comme pourrait suggérer l'usage commun qu'on fait de ce mot. Le jeu serait plutôt, dans la perspective qui nous intéresse, un excellent moteur d'apprentissage.

« Work becomes play when one's job is so satisfying and rewarding that getting paid to do it is of secondary importance. »

Rieber (1996, p.44)

Pour décrire l'exploration des situations, qui d'ailleurs, ne ressemblent en rien aux activités de type « scolaire » habituelles, on n'aura nulle crainte, ici, d'employer le mot « jeu ». La motivation spontanée de la très grande majorité des sujets en est, nous le croyons, le meilleur témoin. Le jeu sera donc vu ici comme la pratique d'une activité répondant à un certain nombre de règles et dont l'exploration de ces règles, les « renforcements », sanctions, et plaisirs de comprendre (et de maîtriser) sont omniprésents. Rieber suggère d'ailleurs que le jeu est non seulement un bon moyen d'apprendre, mais qu'il est le meilleur moteur qui soit de l'apprentissage. On abondera ici dans le sens de Brousseau quand il suggère que...

« Dans sa vie réelle, le sujet organise ses actions selon ses intérêts, dans le cadre de règles inconnues et changeantes; à l'opposé de ses activités sérieuses, professionnelles ou privées, se présentent les situations de jeu où il peut au contraire choisir les règles, se livrer au plaisir, se libérer des autres contraintes. Pourtant on connaît de nombreux exemples où la description précise du fonctionnement de

certaines relations sociales, financières, économiques, militaires, etc., est éclairée et facilitée par sa transcription en termes de jeu; la situation de jeu est souvent un bon modèle de situations réelles. C'est pourquoi le jeu peut être un puissant dérivatif et un symbole de la vie: il lui ressemble! »

(Brousseau, 1998, p.80)

Et si le jeu peut ressembler à la vie, les situations décrites dans cette thèse seront comprises comme étant des activités de découverte de cette partie de la vie avec laquelle on « joue », après tout, à chaque seconde, c'est-à-dire la mécanique.

4.4 Les procédés d'entrevue et de collecte des données

Tous les moyens entrepris afin d'obtenir le matériau de recherche dont il s'agit de faire par la suite l'analyse sont exposés dans cette partie de la thèse.

4.4.1 Le type d'entrevue privilégié

Même si cette méthode n'est pas souvent spécifiée comme la méthode privilégiée pour l'étude des conceptions, nous avons tout de même choisi d'avoir recours à l'entretien d'explicitation. Cette technique d'entrevue consiste à faire coller le sujet de plus près possible à son action vécue en provoquant des évocations, c'est-à-dire que l'intervieweur tente d'attarder le sujet sur les éléments présents à sa conscience durant la résolution des situations-problèmes. Il est à espérer que la prise en compte systématique de ces évocations peut faciliter l'explicitation des intuitions.

L'intervieweur cherche donc continuellement à rapprocher le sujet de son action, convaincu que ce dernier ne va véritablement révéler ses habitudes interprétatives qu'à travers des évocations qui soient le plus directement possible coordonnées à cette action, et ce, plutôt qu'à travers l'explication des « théorisations » du sujet, qui pourraient constituer, en fait, des interprétations a posteriori, susceptibles d'être davantage éloignées de son épistémologie personnelle.

Ainsi, dans le souci d'éviter des biais relatifs à des considérations de contrat didactique, le travail de reconstituer l'histoire du développement d'une connaissance appartient au chercheur plutôt qu'au sujet. En effet, une

interprétation trop « réfléchie » de son action risque de l'entraîner dans des explications dont l'objectif est la satisfaction des attentes. Il est également à espérer que la réflexion pendant l'action à propos de l'action permet de surveiller « en direct » (c'est-à-dire plutôt qu'en différé) l'élaboration des constructions du sujet. Selon Caverni, la meilleure garantie de pouvoir se renseigner sur ces processus (en même temps qu'aider le sujet à s'en informer lui-même) se trouverait effectivement dans la verbalisation concomitante (i.e. en cours d'exécution de la tâche).

4.4.2 Le guidage vers la position de parole incarnée et l'aspect procédural

« Le plus important, peut-être, pour s'approprier cette technique, est de donner du sens au but qui consiste à s'informer ou à aider l'autre à s'informer de la dimension procédurale de l'action vécue. »

Vermersh (1994, p.69)

Les verbalisations peuvent décrire des aspects nombreux et divers d'un même événement et il est bien difficile de savoir lequel d'entre eux un sujet va choisir pour répondre à une question. L'intervieweur n'a d'ailleurs d'autre choix que de recevoir cet abord tel qu'il apparaît au début du discours. Cependant, dans un entretien dont l'objectif est l'explicitation, il convient par la suite de guider le sujet vers une position de parole particulière; c'est-à-dire vers celle qui va permettre une explicitation des processus automatisés par lesquels un sujet va traiter un problème ou, comme dans ce cas-ci, une situation-problème.

Cette position de parole, nous dit Vermersh, doit avoir pour objet des évocations, c'est-à-dire l'appel à la conscience d'éléments pertinents. Dans le présent cas, il s'agit de provoquer l'évocation des moyens employés par l'élève pour s'approprier le fonctionnement de la situation. Selon De La Garanderie (1995), ces évocations peuvent se structurer dans le temps (une séquence d'étapes qui décrit l'histoire d'un phénomène, par exemple, ou les points de repères qu'on va utiliser pour se rendre au supermarché) ou dans l'espace (le sujet va se faire une représentation spatiale d'un certain nombre d'objets, par exemple, les pièces d'une machine ou le plan d'une ville).

Il faut alors s'assurer que le sujet « colle » à la situation du plus près qu'il soit possible de la faire et qu'il décrive les événements et les stratégies qu'il emploie pour interpréter son exploration. Si le sujet s'écarte de ses évocations et s'il cherche à répondre en s'éloignant du vécu de l'action, il risque de ne faire référence que superficiellement à l'objet étudié, tel qu'il est courant de le faire au quotidien, par des descriptions qui ne font qu'égratigner la surface ou des exposés des circonstances périphériques à l'objet d'intérêt.

Nous croyons que ce n'est que par l'étude de ce que l'élève emploie comme stratégie dans des situations concrètes, réelles et spécifiées qu'il est possible de comprendre ce à quoi il adhère réellement, ce à quoi il attribue quelque valeur épistémologique, plutôt que par toute autre forme de discours.

Cependant, l'explicitation de sa propre pensée analysée est une opération particulièrement inhabituelle et même contre-intuitive. La tâche de l'intervieweur consiste donc à guider le sujet vers cette évocation. Et pour lui aussi, la tâche est contre-intuitive. Il doit notamment éviter de canaliser le sujet vers des verbalisations qui portent des jugements sur la valeur du travail accompli ou sur la performance. Il doit également éloigner le sujet des éléments contextuels trop périphériques à la tâche, qui évitent que le sujet ne parle de sa démarche. Il faut également éviter de laisser le sujet se faire gouverner par des slogans ou des déclarations (relatives à la tâche) trop figées (ex : tout ce qui monte redescend). Aussi, on prend soin de ne pas le laisser se centrer sur ses intentions. Il peut en effet y avoir une différence importante entre le but conscientisé (et verbalisé) et l'intention telle que reflétée par l'exécution de la tâche.

L'entretien d'explicitation exige que de nombreuses conditions soient respectées. Parmi celles-ci, on compte :

- 1) L'intérêt de laisser en place les silences. C'est notamment lors de ces silences que le sujet est en évocation¹.

¹ « Le silence est sans doute l'une des choses les plus difficiles à tolérer pour l'intervieweur. Quand la personne qu'il interroge hésite, ne serait-ce qu'un instant, il devient anxieux et se comporte comme s'il considérait ce silence comme une rupture de la communication. Parfois même, déçu de ne pas obtenir une réponse aussi rapidement qu'il le désire, l'intervieweur reformule trop tôt la question, faisant ainsi obstacle à la communication entre son interlocuteur et lui. Cette reformulation effectuée

- 2) Imposer, quand c'est nécessaire, un ralentissement du rythme d'entrevue. Cela permet parfois de forcer les évocations quand elles semblent absentes et de souvent laisser apparaître les contradictions et les détails intéressants.
- 3) Quand le sujet est manifestement en évocation, porter attention à ne pas briser le cours de ces évocations. Lui poser les questions suivantes, par exemple, à voix basse.
- 4) Les questions de l'intervieweur peuvent être posées en étant conscient de l'importance de laisser le sujet en position de parole incarnée. C'est-à-dire en essayant d'éviter les questions qui impliquent le sujet en tant qu'individu obéissant à des considérations affectives, ce qui aurait probablement pour effet de mettre le sujet en position défensive et de le renvoyer à la coutume didactique et aux habitudes scolaires. L'intervieweur peut également proposer des questions qui appellent des descriptions plutôt que des réponses toutes construites. La première règle à observer en ce domaine consiste à éviter l'utilisation de toute question qui commence par le mot « pourquoi » et de tous ses synonymes (exemple : « comment ça? ») dans la mesure du possible.

« 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? », mais « Que fait-il quand il fait cette chose? », « Comment le fait-il? ». Le questionnement descriptif est là pour documenter le détail de l'action effectuée, jusqu'à être suffisamment bien informé pour comprendre la logique intrinsèque de production de la réponse. L'intelligibilité de la conduite de l'élève apparaît avec la description de ce qu'il a réellement fait. »

Vermersh (1994, p.86)

trop tôt ou mal à propos risque fort de mettre le répondant dans l'embarras: ce dernier peut éprouver le sentiment de ne pas répondre aux attentes de l'intervieweur, d'être incompetent. Rappelons-le, l'interviewé a souvent besoin d'un certain temps de réflexion avant de répondre à une question qui peut être tout à fait nouvelle pour lui. » Boutin (1997, p.114) Heureusement, des indices non verbaux nous permettent de reconnaître assez facilement les moments où les sujets évoquent les objets de leur discours. Par exemple, le décrochement du regard ou le ralentissement du rythme de la verbalisation. Un ralentissement suggère que le sujet est en processus de « construction » de sa réponse. Les entrevues d'experts dont le but est l'explicitation, par exemple, sont particulièrement difficiles à mener car les experts ont rarement besoin de passer par de lourdes évocations pour produire une réponse.

- 5) Employer des reformulations de type « reflet »² ou de type « le point »³ ainsi que les « relances ericksonniennes »⁴, qui incitent à produire de nouvelles explicitations ainsi que des synthèses.
- 6) On privilégie les verbalisations concomitantes, qui, selon Caverni (1988), offrent les meilleurs garanties de validité.
- 7) Les explorations des sujets doivent rester les plus libres possible. L'intervieweur doit faire attention à n'influencer en rien l'itinéraire cognitif du sujet⁵, en d'autres termes, à éviter de « jouer au prof ». L'intervieweur, dans un entretien d'explicitation, n'est pas celui qui enseigne, mais bien celui qui apprend. C'est seulement lors des impasses qu'il se permet d'utiliser les dernières verbalisations du sujet pour le relancer sur des pistes inédites.
- 8) Les relances de l'intervieweur porteront bien entendu sur les perspectives qu'adopte le sujet sur les problèmes qu'il arrive à résoudre, mais également sur ce que le sujet ne semble pas en mesure de cerner facilement; sur ses erreurs. Il convient d'insister à ce niveau sur le fait que le traitement de l'erreur doit être, du point de vue du chercheur, une source d'information plutôt que de sanction et qu'il faut aussi en convaincre le sujet. Le repérage de l'erreur doit être ici systématique, mais elle n'est pas un but; elle est un moyen.

² « Ce type de reformulation se situe à la suite d'une phrase importante du discours. L'intervieweur, ici, reprend les termes de l'intervuë de façon presque identique, de telle sorte que ce dernier reconnaisse, retrace sa propre pensée dans le discours de l'intervieweur. Le reflet permet à l'intervieweur de voir s'il a bien saisi le point de vue de la personne interrogée, mais également à l'intervuë de se rendre compte de l'intérêt de son interlocuteur à bien le comprendre. » Boutin (1997, p.69).

³ Les reformulations peuvent également prendre une forme plus élaborée qui autorise la synthèse des points essentiels d'une partie de l'entrevue. Il s'agit alors de synthétiser les éléments disponibles pour mieux passer à une autre étape de l'entretien. Ce type de reformulation se nomme « le point ».

⁴ Les relances, quant à elles, seront inspirées des « reformulations ericksonniennes » où il est question d'utiliser comme point de départ un morceau de la dernière phrase du sujet. Cela permet de rester en contact avec la tâche en encourageant l'évocation d'éléments antérieurement évoqués. Si une rupture de cette éventuelle chaîne de « question-réponse-question... » se brise par une dénégation (« je ne sais pas », « je ne sais pas pourquoi j'ai fait ça », « j'ai fait ça au hasard »), il faudra à l'intervieweur produire l'effort de chercher ce qui est susceptible dans la réponse du sujet de servir de point de départ dans une nouvelle chaîne. De demander, par exemple, « comment sais-tu que tu ne sais pas? », ou « comment sais-tu que tu n'as pas fait ce qu'il fallait? » ou « dans ce que tu ne sais pas, y a-t-il des choses que tu sais? »

⁵ « Il est bien tentant pour celui qui connaît bien le domaine d'expertise de la personne interviewée de jouer au pédagogue, ou du moins, à « celui qui connaît ». L'intervieweur doit se situer dans une perspective tout à fait contraire: il est celui qui cherche à comprendre, à apprendre. Trop souvent, certains entretiens se transforment en une relation de maître à élève. Cette attitude est à dénoncer. » Boutin (1997, p.74).

« L'idée essentielle, quand on considère l'erreur d'un point de vue constructiviste, c'est de renoncer à ce que J. Piaget appelait le « n'importe quisme ». Aussi bizarre que paraissent les réponses de prime abord, il s'agit de se mettre en quête du sens qu'elles peuvent avoir, de retrouver les opérations intellectuelles dont elles sont la trace. Certes, il n'est pas assuré qu'une réponse qui nous surprend (ou nous irrite) contienne une logique identifiable, il se peut fort bien même qu'elle soit le fruit de la seule ignorance ou de la distraction, mais voilà: si je pars de ce principe-là, je cesse de pousser la réflexion au-delà. Et du coup, si du sens s'y trouvait caché, je m'interdis de pouvoir y accéder. »

Astolfi (1997, p.17)

4.4.3 Le déroulement des entrevues

Chaque entrevue dure de 45 minutes à 1h20. Ces durées sont conditionnées le moment de la journée où elles se produisent : 45-50 minutes sur l'heure du midi, 75 minutes sur une période de cours normale ou 50-80 minutes le soir. Elles peuvent aussi s'écourter pour considérations suivantes : un malaise de l'élève, un retard ou un rendez-vous de celui-ci, une condition mauvaise de l'élève (grippé ou un ayant un léger mal de cœur [...ça arrive...]) ou une démotivation ponctuelle de celui-ci.

Nous ne croyons pas que des entrevues d'une heure soient trop longues pour des élèves, même pour les plus jeunes. Malgré les nombreuses recherches sur le « temps d'attention » des enfants, la nature de la tâche considérée, qui tient du « défi » et peut revêtir un certain caractère ludique, peut vraisemblablement captiver l'attention d'enfants pour la période considérée⁶.

Avec le souci de sortir le moins possible les élèves de leurs cours réguliers, les premières entrevues ont été menées sur l'heure du midi ou le soir, après l'école, en mars et avril 1999. Cependant, par la suite, il a semblé impératif de s'efforcer de terminer les entrevues avant la fin de l'année scolaire. La possibilité de sortir certains élèves de quelques-uns de leurs cours (avec la permission de ces élèves, de leurs parents, et enseignants pour chaque cours) nous a été accordée par la direction de l'école.

⁶ Giordan (1999, p.231) nous indique, à ce propos, que « dans un contexte traditionnel, l'attention d'un enfant peut être très réduite: de l'ordre de quelques minutes. Tout change dès que l'activité éducative repose sur des enjeux ou un intérêt. Les enfants peuvent jouer des heures entières sur trois fois rien, les adolescents passent des journées complètes sur les mêmes jeux électroniques. Nous avons retenu l'intérêt d'enfants d'école maternelle pendant des après-midi sur une même suite d'investigations. Il a suffi de créer l'intrigue ou le défi ou de varier les activités avec la classe. »

Les entrevues se sont donc poursuivies en mai et juin non seulement sur les périodes du midi et le soir mais aussi durant certains cours.



Figure 7) Le poste de travail

En ce qui concerne les intervalles entre les entrevues, on s'est efforcé de laisser passer quelques jours, mais en s'en tenant à une pause d'un maximum d'une semaine. De cette façon, les sujets avaient le temps de repenser à leurs explorations tout en gardant à l'esprit les problèmes posés. De plus, les facteurs affectifs ne sont pas à négliger dans la détermination de cet intervalle⁷.

L'enregistrement des entrevues est fait au moyen d'une carte vidéo avec sortie RCA qui permet la transformation des événements qui se produisent sur le moniteur de l'ordinateur en format vidéo-VHS. Nous avons choisi ce procédé, car l'enregistrement par caméra-vidéo de ce qui se déroule sur un écran donne de mauvais résultats. En plus d'une perte de qualité, la désynchronisation des appareils produit une perturbation importante. L'absence de caméra-vidéo permet aussi d'amoindrir l'indisposition que peut produire chez certains sujets l'éventualité de faire des erreurs qui soient enregistrées. Au niveau de la fiabilité et de la validité, cette méthode constitue donc un avantage en plus de réduire la lourdeur de l'équipement. Le signal audio (i.e. les verbalisations) est capté par un

⁷ « Ainsi, des entretiens trop rapprochés peuvent donner à la personne interviewée l'impression que la relation va se poursuivre. En revanche, des entretiens très espacés risquent de donner à l'interviewé l'impression que son apport n'est plus utile, réduisant ainsi de façon considérable sa motivation. Dans tous les cas, il importe de clarifier les règles du jeu dès le début. » Boutin (1997, p.61).

microphone, posé devant l'écran de l'ordinateur. Il est difficile d'éviter l'intimidation possible causée par la présence de cet objet. On s'est donc efforcé de le rendre plus discret et, à la suite de l'annonce au sujet du fait qu'il est enregistré, il n'en est plus fait mention. Les signaux audio et vidéo se rassemblent « en temps réel » sur le ruban de la vidéocassette, assurant ainsi leur synchronisation.

Une prise de notes a permis d'enrichir les observations enregistrées et a servi à situer les éléments importants du discours.

4.5 Méthodologie de l'analyse

Nous avons effectué la transcription complète des entrevues des cinq sujets. Au total, environ 30 heures d'entretiens ont été transformés en 32000 lignes de texte. L'analyse de ce matériau, quant à elle, a été réalisée à l'aide d'un logiciel de traitement de données qualitatives, *WinMax^{MD}*. Celui-ci autorise l'attribution de codes à des segments d'entrevues, mots, phrases, paragraphes, etc., et permet, en quelque sorte, de marquer les épisodes d'entrevues pertinents, de les regrouper et de les retrouver très facilement. Le système de codes, qui correspondent aux mots-clés les plus importants de la problématique et du cadre-théorique, peut être hiérarchisé. C'est-à-dire que les codes peuvent être insérés les uns dans les autres à la manière des « répertoires » ou des « chemises » informatiques dans une structure logique qui rejoint les préoccupations de la thèse.

Cette hiérarchie ou structure a dû se modifier constamment au fur et à mesure du développement de l'analyse, modifiant conséquemment la problématique et le cadre théorique jusqu'à leur forme actuelle. Nous ne ferons pas ici état des différentes étapes du développement de la hiérarchie de codes, mais bien uniquement de la forme finale qu'elle revêt pour la thèse. Voici un aperçu de cette structure :

<ul style="list-style-type: none"> (r) Raisonnement original [22:269] Accommodation [6:163] Aide de l'intervieweur [28:151] <ul style="list-style-type: none"> L'intervieweur en dit trop [16:49] Difficulté d'explicitation [1:10] Emploi d'une référence [18:97] Erreurs dûes... [0:0] <ul style="list-style-type: none"> à compréhension des consignes [4:83] à d'autres domaines de conn. [1:43] à des habitudes scolaires [14:146] à la complexité du contenu [10:128] à la présence de conceptions [7:90] à une autre raison [24:234] à une surcharge cognitive [15:143] aux démarches adoptées [0:0] aux opérations intellectuelle [1:12] Essai [238:1200] <ul style="list-style-type: none"> échoué [337:1839] <ul style="list-style-type: none"> avec surprise [82:603] de peu [197:1178] sans surprise [10:68] réussi [464:2603] <ul style="list-style-type: none"> avec satisfaction [57:444] sans satisfaction [25:199] Étude de l'effet de... [0:0] <ul style="list-style-type: none"> la direction du coup [37:4209] <ul style="list-style-type: none"> (r) Stratégie "DIRECTION-?" [17:159] (r) Stratégie "DIRECTION-?" [6:51] (r) sur la précision [6:32] la force du coup [69:12192] <ul style="list-style-type: none"> (r) Logique additive [68:341] (r) Logique associative [48:296] la masse de la balle [49:10263] <ul style="list-style-type: none"> (r) stratégie (F-M)/M [6:30] aux extrêmes [6:289] <ul style="list-style-type: none"> avec rapports non entiers [17:2272] la photo (délai-photo) [28:2042] la présence d'une asymptote [34:1173] l'inertie [81:687] 	<ul style="list-style-type: none"> Mixte (étude mixte) [32:5992] <ul style="list-style-type: none"> (r) Strat. ÉQUILIBRE +- ÉCART [18:196] (r) Strat. EFFET DU COUP +1-1 [24:247] <ul style="list-style-type: none"> avec départs changeants [7:800] Fixation des variables [12:68] Formalisation [0:0] <ul style="list-style-type: none"> Modélisation formelle [10:238] P-prim [0:0] <ul style="list-style-type: none"> "canceling" [15:132] "équilibre" [2:14] "Force as a mover" [32:343] "symétrie" [7:142] d'Ohm [8:69] <ul style="list-style-type: none"> (r) raison inverse [0:0] <ul style="list-style-type: none"> appropriée [0:0] <ul style="list-style-type: none"> formalisée (mathématisée) [40:376] <ul style="list-style-type: none"> (r) Strat. "2 BONDS EN 1" [9:199] qualitative (compréhensive) [43:284] inappropriée [30:253] (r)raisonnement proportionnel [0:0] <ul style="list-style-type: none"> approprié [0:0] <ul style="list-style-type: none"> formalisé (mathématisé) [72:506] <ul style="list-style-type: none"> (r) Strat. "2 BONDS en 1" [1:3] qualitatif (compréhensif) [45:252] inapproprié [16:106] Prise de contact-situation [36:1713] Référence à la réalité [35:440] Refuge dans les mathématiques [68:858] Refus de calcul [3:28] Représentativité du logiciel [13:211] Tâtonnement [58:2546] <ul style="list-style-type: none"> non raisonné [11:244] raisonné [28:1144] Zone [0:0] <ul style="list-style-type: none"> de difficulté [68:14256] de facilité [92:16440] Discussions diverses [2:363] peu pertinente ou confuse [26:1153]
--	--

Tableau II) Liste des codes et sous-codes employés lors de l'analyse des données

Il est à noter que plusieurs de ces codes n'ont pas fait l'objet d'une interprétation détaillée.

Chacun des codes est suivi de deux nombres. Le premier désigne le nombre de fois que des transcriptions d'entrevues ont été attribuées à ce code et le second indique le nombre de lignes. Au total, 2883 codes ont été attribués sur plus de 90000 lignes de texte, dans, au total, 44 fichiers-transcriptions. Il ne faut cependant pas se laisser impressionner par ces chiffres puisque de nombreux codes s'intersectent et certains sont des codes qui décrivent des régions entières des transcriptions.

Il n'est resté pas moins que la quantité de matériel codé a exigé deux initiatives de repérage supplémentaires. La première était possible grâce au logiciel. En effet, celui-ci autorise de juger d'un « poids » à attribuer à une codification. En d'autres termes, il permet de repérer rapidement les codifications du matériel qui ont un intérêt majeur. Quand la quantité de segments codés, pas exemple, du code « p-prim [force as a mover] » est trop élevée, on peut alors facilement repérer les épisodes les plus clairement représentatifs du code; ce sont ceux dont le poids est le plus grand.

Une seconde initiative pour retrouver le matériel rapidement et les épisodes majeurs à analyser a été entreprise par une synthèse des entrevues. En clair, il s'agissait de repasser le matériel et de raconter, en un texte court de quelques pages, l'essentiel des événements des entrevues. En tout, autant de textes-synthèses que d'entrevues, c'est-à-dire quarante quatre. Une deuxième codification de ces épisodes généraux a été effectuée. En voici la hiérarchie et les statistiques. Il est à noter, encore une fois, que ce ne sont pas tous ces codes qui ont finalement servi à l'analyse. Cependant, la présentation de la liste entière de ces méta-codes donne un aperçu de l'outil à partir duquel on a retenu un certain nombre d'éléments.

<ul style="list-style-type: none"> 1) Coordinations [0:0] <ul style="list-style-type: none"> 1) Propriétés des coordina... [0:0] <ul style="list-style-type: none"> Application AVANT verbalisa. [7:32] Explicitation --> Efficacité [11:45] Facilité de renforcement [12:69] Flexibilité (adaptatives) [18:96] Fragilité [6:48] 2) Stratégies [0:0] <ul style="list-style-type: none"> Concepts intermédiaires [3:15] <ul style="list-style-type: none"> --> plus d'efficacité [0:0] Liens entre les variables [19:70] Logique additive (ou sous.) [23:99] Logique associative [13:54] <ul style="list-style-type: none"> Strat.1: "2 bonds en 1" [4:30] Strat.2: "Direction-?" [1:3] Strat.3: "Direction/?" [4:11] Strat.4: "Point connu +-écart" [7:38] Strat.5: "Équilibre +- écart" [4:18] Strat.6: "(F-M)/M" [0:0] Strat.7: "Effet du coup +1-1" [5:30] Tâtonnements [60:217] Utilisation du UN (1) [2:9] 3) P-PRIMS [0:0] <ul style="list-style-type: none"> 1) "Canceling" [9:31] 2) "Équilibre" [0:0] 3) "Symetry" [2:10] 4) "Force as a mover" [35:141] 5) "Violence" [1:3] 	<ul style="list-style-type: none"> 6) "P-prim d'OHM" [11:40] <ul style="list-style-type: none"> Raison inverse [19:104] <ul style="list-style-type: none"> Étude de l'asymptote [11:48] <ul style="list-style-type: none"> Non linéarité [21:116] <ul style="list-style-type: none"> Y-a-t-il un RELIEF ? [8:79] Raison proportionnelle [30:121] P-prims et INERTIE [31:231] Propriétés [0:0] 2) Aspects LOGICO-MATH [0:0] <ul style="list-style-type: none"> 1) AutomatHismes [25:141] <ul style="list-style-type: none"> Maths = refuge ? [22:103] <ul style="list-style-type: none"> sources de conn. phys. ? [16:95] 2) Raisons qualitatives [5:17] <ul style="list-style-type: none"> Défis mieux réussis [17:113] <ul style="list-style-type: none"> Explicat. + généralisables ? [12:70] Meilleurs souvenirs ? [8:35] <ul style="list-style-type: none"> Référence à la réalité [9:105] 3) modélisation formelle ? [1:3] 3) Réflexion épistémologique [0:0] <ul style="list-style-type: none"> apprendre = avances + reculs [22:214] <ul style="list-style-type: none"> problèmes simples? [1:3] Relativisme ??? [3:35] Rôle de l'intuition [4:27] <ul style="list-style-type: none"> Unité ou fragmentation [14:71] 4) Emploi d'un micromonde [0:0] <ul style="list-style-type: none"> App.dû au micromonde ? [5:23] <ul style="list-style-type: none"> Représentativité ? [6:26] <ul style="list-style-type: none"> Sujets inducteurs? [9:37]
---	---

Tableau III) Liste des codes et sous-codes employés lors de l'analyse des textes-synthèses

Il est à noter qu'en aucun cas, les analyses de ces textes-synthèse n'ont été considérées comme une analyse du matériau brut. Cette seconde initiative d'analyse n'a été mise au point que pour faciliter la recherche de certains épisodes. Par exemple, si on cherche à retrouver les épisodes où les sujets ont éprouvé des difficultés avec la relation proportionnelle dans telle ou telle situation, il est possible d'interroger la seconde analyse plus rapidement et alors « remonter » jusqu'au matériau brut pour retrouver les épisodes pertinents et, au passage, profiter des « poids » des codifications.

C'est en parcourant le matériau lors de la codification et en observant les régularités qui se sont dégagées de cette codification que l'analyse a été réalisée.

Chapitre 5
Analyse et interprétation

Chapitre 5 : Analyse et interprétation

5.1 Introduction

L'analyse des procédés employés par les sujets pour s'approprier la logique des situations-problèmes à travers leurs verbalisations nous a amené à les présenter en trois parties principales.

Dans la première partie, nous présenterons les différents modèles qui auront été développés par les sujets. Ces modèles, qu'ils soient transitoires ou définitifs, que leur pouvoir soit très local ou plus général, sont clairement issus des contextes qui les ont vus apparaître. C'est pourquoi nous avons choisi de les présenter attachés aux situations dans l'exploration desquelles ils ont été construits. Nous passerons donc en revue ces modèles en commençant par ceux qui se sont manifestés dans la situation 01, 02... et ainsi de suite jusqu'à la dernière.

Dans la seconde partie, nous nous intéresserons plus particulièrement aux conceptions. Nous prendrons la peine de présenter au lecteur toutes les conceptions qui sont apparues explicitement lors des explorations. Il faut ici insister sur le fait que nous ne pouvons ici tenir compte que des conceptions qui auront été effectivement explicitées. En effet, ce qui reste implicite dans la conduite des sujets et qui ne peut être interprété qu'en observant ses procédures ne sera analysé que dans la troisième partie.

Dans la troisième et dernière partie, notre intérêt se portera sur les procédures coordinatives. C'est-à-dire que nous nous intéresserons aux relations qui seront établies sur une base intuitive entre les différents paramètres des situations; en d'autres termes, aux p-primis. Nous espérons dresser un portrait de ces tendances intuitives auxquelles les sujets sont soumis pour construire le sens des classes de coordination particulières que sont nos situations-problèmes. Les tendances dégagées nous renseigneront sur le « sens de la mécanique » de nos sujets.

Nous en profiterons au passage pour établir le rôle des p-primis dans la construction des modèles qui auront été développés dans la première partie.

Nous avons choisi d'analyser les verbalisations des sujets sous ces trois points de vue particuliers afin d'obtenir une vision plus complète et plus globale du développement de la compréhension. Il est possible, avec ces trois « angles d'attaque théoriques », qui ont cours dans la littérature de recherche, d'obtenir non seulement des éléments explicites qui décrivent la conduite des sujets (conceptions), mais également des éléments plus intuitifs (p-primis) ainsi que des constructions plus formelles (modèles). Il est clair, dans toute synthèse, que l'intelligence scientifique ne peut se réduire à un seul éclairage. Ses ricochets entre les analogies, images, slogans, expérimentations, intuitions, formulations et formalisations et entre les avances et reculs interdisent d'en tirer un principe unique et universel. Il convient donc, pour tenter de cerner le savoir physique, d'opter pour plus d'un seul modèle théorique, comme le propose d'ailleurs Roschelle (1991, p.191).

Dans tout ce chapitre, apparaîtront plusieurs notes de bas de page donnant les adresses qui permettent de retrouver facilement les épisodes de verbalisation que nous avons jugé utile de présenter en annexe. Par exemple, la note [EMMANUEL(4) S4E3: 1034-1051] signifie qu'on peut trouver la transcription de cet épisode en annexe dans la section « EMMANUEL » présentée en 4^{ième} lieu (pour la quatrième secondaire) concernant la situation 04, durant l'entrevue 3 (S2E2) en lisant les lignes 1034-1051. De plus, lorsque nous évoquerons un sujet, nous inscrirons toujours à sa suite et entre parenthèses son année d'études au secondaire (ex : *Karl(1)* signifie que ce sujet est en première secondaire).

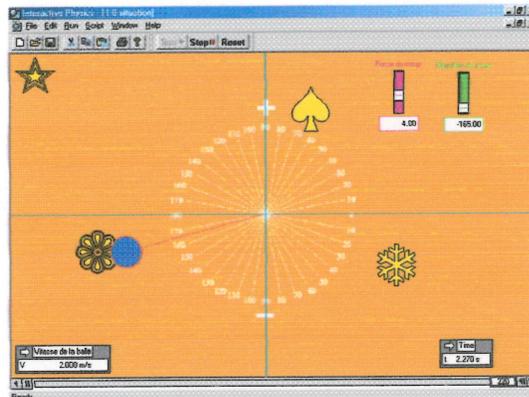
Première partie :

5.2 Les procédés et les modèles employés à travers les situations

Dans cette première partie, nous nous intéresserons principalement aux modèles que les sujets développent pour parvenir à réussir avec le plus d'efficacité possible à résoudre les défis que l'intervieweur lui propose. La frontière entre les modèles et les procédés n'étant pas toujours claire, nous choisissons de présenter ici l'ensemble de toutes les initiatives symboliques ou formelles que les sujets utiliseront pour justifier le choix des paramètres qu'ils décident d'imposer aux situations. Ainsi, certaines de ces initiatives apparaîtront comme des opérations mathématiques plutôt simples (comme c'est plus souvent le cas dans les premières situations) alors que d'autres apparaîtront comme des modèles formels très sophistiqués (comme dans les dernières situations). Il est à noter que ces modèles ne seront pas toujours appuyés sur une véritable compréhension de la mécanique. Nous reviendrons plus tard sur la contribution d'une authentique compréhension qualitative à la construction de modèles dans la deuxième et la troisième parties. Il est en effet à prévoir que des éléments de compréhension comme des conceptions ou des p-prims soient les fondements de tels modèles, mais nous réservons cette analyse pour plus tard.

5.2.1 Les sujets et la situation 01

Rappels sur la situation 01



- La direction du coup et la trajectoire sont les mêmes
- La vitesse de la balle est la moitié de la force du coup

Dans cette situation, l'intervieweur demande au sujet de faire en sorte que la balle traverse les cibles les unes après les autres, à des vitesses particulières.

L'objectif premier de cette situation, la plus simple de toutes, est essentiellement la prise de contact avec l'environnement logiciel. La plupart des sujets ne s'y sont d'ailleurs pas beaucoup attardés et sont immédiatement passés aux situations suivantes.

Néanmoins, il convient de mentionner que certains d'entre eux, spécialement les plus jeunes, ont tout de même éprouvé quelques difficultés à coordonner la force du coup avec la vitesse souhaitée. Bien que le rapport 2/1 entre les deux soit rapidement assimilé par les plus âgés, les plus jeunes ont eu tendance à hésiter avant d'en systématiser l'usage. Ainsi, certains d'entre eux ont été portés dès le départ à traiter les unités, les dixièmes et les centièmes indépendamment, comme s'il s'agissait de plusieurs problèmes différents. Dans certains cas, cela multipliait le nombre d'opérations à effectuer d'une façon telle qu'il est arrivé que ces sujets s'empêtrant dans la quantité des informations à traiter.

Ce sont cependant tous les sujets qui ont éventuellement fini par systématiser l'emploi du rapport 2/1 entre la *force du coup* et la vitesse obtenue. Pour certains, l'opération prenant la forme d'une multiplication ou d'une division par deux et pour

d'autres, celle d'associations simples; telles que « à chaque variation force de 2, on a une variation de vitesse de 1 ».

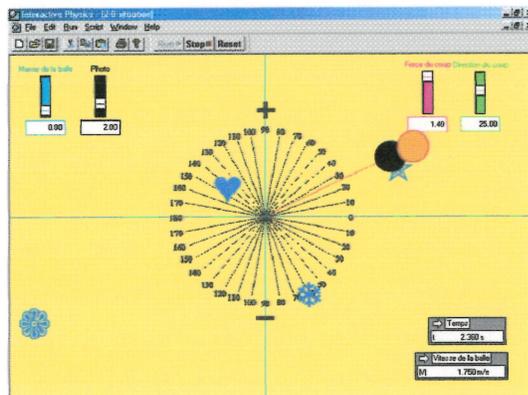
La *direction du coup*, quant à elle, n'a posé aucune difficulté aux sujets. Ces derniers sont parvenus immédiatement à saisir le rapport entre le rapporteur d'angles et la direction exprimée en degrés.

Contrairement à ce à quoi on aurait pu s'attendre en se basant sur les travaux sur les conceptions de Novak (1994), les sujets ne se sont pas formalisés du fait que la balle ne « s'arrête jamais ». Même si quelques-uns ont proposé qu'il soit possible de pousser la balle de sorte à recouvrir les cibles (plutôt que de simplement les traverser), ceux-ci se sont rapidement ravisés de sorte qu'à la fin de l'exploration de la situation 01, aucun sujet ne semblait éprouver quelque réticence à admettre que la balle continuerait son mouvement indéfiniment lorsqu'elle serait frappée.

Ici, quelques discussions avec les sujets ont été entretenues à propos de la gravité et de la friction. Ces discussions ont moins eu pour objectif de cerner leurs conceptions ou leurs points de vue sur la physique du logiciel que de clarifier certains termes de fonctionnement de la situation. En effet, on l'a dit, la situation 01 est essentiellement une initiation au fonctionnement du micromonde. Une exploration plus systématique et plus élaborée des coordinations commence avec la situation 02.

5.2.2 Les sujets et la situation 02

Rappels sur la situation 02



- La direction du coup et la trajectoire sont les mêmes
- La variable photo indique le moment où la photo (noire) est prise
- La distance D de prise de photo est en raison inverse de la masse de la balle

Dans cette situation, l'intervieweur demande au sujet de recouvrir avec la « photo » (en noir) les différentes cibles. Il demande à chaque fois une nouvelle cible en exigeant de fixer l'un ou l'autre des paramètres. Il peut demander également que l'opération se fasse en plus ou moins de temps.

Une réaction toute naturelle des sujets est, pour réussir les défis qui leur sont posés, d'utiliser toujours la même variable et d'ainsi éviter d'avoir à utiliser les autres. Afin de lutter contre cette tendance et d'ainsi pouvoir s'informer de la compréhension de toutes les variables, l'intervieweur utilise deux moyens. Le premier est inscrit dans la situation. Les variables qu'on peut y changer rencontreront des minima et maxima. Ainsi, le changement d'une seule variable rend impossible l'atteinte de toutes les cibles et force l'emploi des autres. Si les sujets persévèrent dans leur tendance à n'utiliser qu'un petit nombre de paramètres, l'intervieweur insiste alors en formulant le défi de manière plus fermée: « en ne changeant que la masse, peux-tu recouvrir le cœur avec la photo? ».

Durant les explorations, les sujets ont rapidement pu se rendre compte de l'effet qualitatif de chacune des variables sur le déroulement de la situation. C'est-à-dire que, bien que certains aient proposé dès le départ que d'une augmentation de masse puisse résulter un accroissement de la vitesse, tous ont bien pu finalement

accommoder leur compréhension des variables comme pouvant soit augmenter ou réduire la distance D de la prise de photo (la force du coup et la photo l'accroissent, et la masse la réduit). Or, s'il a été possible de comprendre rapidement le « sens » de la variation de chacun de ces paramètres, les sujets ont cependant inversé beaucoup plus d'effort pour explorer l'ampleur de ces variations.

Les plus jeunes d'entre eux se sont le plus souvent contentés de chercher à résoudre les défis posés par l'intervieweur (ex : chercher à recouvrir le flocon avec la photo) par des séries d'ajustements successifs. Ainsi, par exemple, par tâtonnement, ceux-ci vont tenter, à partir d'une position connue de la photo, d'augmenter ou de réduire une seule variable de sorte à approcher progressivement la photo de la position désirée. Au fur et à mesure que le rapprochement s'effectue, les ajustements deviennent de plus en plus fins, jusqu'au recouvrement complet de la cible. Certains de ces tâtonnements ont occupé de bonnes fractions du temps d'entrevue.

Si de telles façons de procéder laissent supposer une compréhension minimale de l'effet qualitatif du changement d'un paramètre, elles ne laissent cependant pas la place à des explications concernant la logique mathématique des variations de D .

La situation 02 n'offre pas au sujet de lecture immédiate de la distance parcourue par la balle jusqu'à la prise de photo. La situation, à moins d'employer une règle, laisse alors le sujet devant la seule possibilité de devoir estimer D . Il n'est donc pas étonnant qu'un certain nombre de sujets (parmi les plus jeunes, notamment) n'aient pas eu recours à des relations mathématiques pour expliquer les liens entre les paramètres. Tout au plus a-t-on pu entendre quelques observations à propos du caractère non linéaire de l'effet d'un changement de masse et de la possibilité, par exemple, de doubler la *force du coup* pour doubler D .

Plus les sujets sont âgés, cependant, plus ils proposent des explications mathématiques élaborées. D'abord, ils vont spontanément proposer qu'il existe de telles explications mathématiques. Par la suite, s'ils recourent parfois à quelque tâtonnement, ils le feront de façon isolée et ces épisodes de rapprochements successifs seront plus brefs et efficaces que ceux des plus jeunes. Ainsi les

relations proportionnelles entre la *force du coup* et D ainsi qu'entre la *photo* et D seront immédiatement traitées mathématiquement. Plusieurs de ces sujets iront même jusqu'à proposer de plaquer une règle de plastique sur l'écran afin d'évaluer D et de pouvoir coordonner cette variable en raison proportionnelle des deux autres. Pour ces sujets, la recherche d'une valeur paramétrique appropriée est plus brève et elle est parfois appuyée d'une raison proportionnelle appropriée.

Bien que leurs efforts pour coordonner ces deux derniers paramètres soient le plus souvent des succès intéressants, la relation inverse entre la troisième variable (la *masse*) et D , n'a pas laissé apparaître de compréhension aussi manifeste. Les étonnements concernant l'ampleur de la variation de D après un changement de la *masse* furent nombreux et c'est dans un seul cas, du moins pour cette situation, que ces résultats inattendus ont poussé un sujet à explorer explicitement et systématiquement la raison qui unit la masse à D et en venir à proposer une explication mathématique efficace. Les autres sujets plus vieux, bien qu'ils aient pu, dans certains cas, expliciter leur étonnement de voir la photo se poser beaucoup plus loin ou plus près de ce qu'ils avaient prévu, à cause, selon toute vraisemblance, de la nature non linéaire de la raison inverse, n'ont pas véritablement poussé plus loin.

Il faut comprendre ici qu'au moment de terminer les explorations de la situation 02, les sujets ont pratiquement tous maîtrisé le fonctionnement du logiciel et sont donc dès lors exposés à des défis plus quantitatifs, comme c'est le cas dans la situation 03. Certains d'entre les plus jeunes devront alors amorcer la construction d'une coordination explicite des paramètres, alors que les plus vieux seront appelés à préciser leurs intuitions qualitatives.

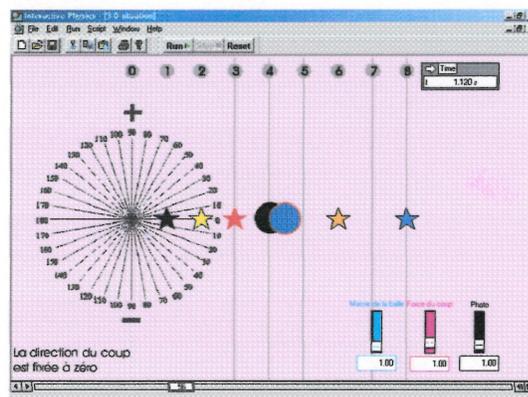
La situation 02 est cependant l'occasion pour les sujets d'approfondir leur compréhension du fonctionnement du logiciel. Son exploration a permis l'émergence de nombreuses conceptions. En effet, certains sujets ont pu illustrer leur compréhension de la logique de la situation avec des exemples tirés de leur quotidien. Certaines de ces conceptions seront examinées ultérieurement. Elles concernent principalement l'effet de la masse sur D et les raisons qui vont, dans la réalité, freiner la course d'un objet (ou d'une balle).

En résumé, les sujets, dont l'exploration a été ici principalement qualitative, n'ont généralement pas éprouvé de difficultés à coordonner les variables qui agissent proportionnellement sur D . Quelques-uns ont même proposé certaines articulations logico-mathématiques qui ne sont pas dépourvues d'intérêt. Ces articulations sont davantage spontanées pour les plus âgés que pour les plus jeunes, dont les tâtonnements par rapprochements successifs ont constitué le moyen privilégié pour répondre aux défis.

Il en est autrement, cependant, pour le paramètre *masse de la balle*, dont le rapport inverse avec D a causé nombre de surprises aux sujets, jeunes comme vieux. Un seul sujet en a d'ailleurs spontanément fait une exploration systématique. Les autres s'en sont tenus à une compréhension du « sens » de la variation, c'est-à-dire qu'une augmentation de masse va réduire D et vice-versa.

5.2.3 Les sujets et la situation 03

Rappels sur la situation 03



- La direction du coup et la trajectoire sont toujours 0
- Les lignes verticales indiquent les valeurs de distance D

Les demandes de l'intervieweur sont semblables à la situation précédente, mais on demande au sujet de faire passer l'ombre d'une étoile à une autre. L'intervieweur explore au début les rapports entiers, puis les rapports non entiers. Il interroge le sujet sur le comportement de la balle aux valeurs très grandes ou très petites.

5.2.3.1 Les variables proportionnelles à D

Ce sont tous les sujets qui ont tenu compte des valeurs de D dans leurs coordinations mathématiques entre les différents paramètres de la situation 03.

Les variables *force* et *photo* n'ont pas posé de problèmes majeurs. La plupart des sujets ont pu se construire des modèles efficaces de la relation entre ces variables et la position finale de la photo (D).

Les plus jeunes ont cherché pour la plupart à déterminer à quelle valeur de déplacement de la photo correspondait une variation d'une unité de la *force du coup* ou d'une unité de la *photo* (on entend ici par « déplacement de la photo » le déplacement que la photo va effectuer d'un essai à un autre). Par exemple, un sujet change la valeur de la *force du coup* de 1 à 2 et constate qu'au lieu de se poser sur l'étoile verte (D=4), la photo se pose sur l'étoile bleue (D=8) (toutes autres choses étant semblables). Il en déduit que tout changement de 1 dans la *force du coup* correspond à un déplacement de la photo d'une valeur de 4 et donc, que tout changement de 0,25 dans la *force du coup* lui permet de faire faire à la photo un bond d'une valeur de 1. Il devient alors possible au sujet d'atteindre n'importe quelle cible en calculant le nombre d'intervalles qu'il y a entre la position connue de la photo et la position désirée et d'ajouter ou de retrancher à la *force du coup* autant de fois 0,25 qu'il y a de ces intervalles.

Étant donnée la nature linéaire de la relation proportionnelle, ce modèle est tout à fait efficace dans de nombreux cas. Cette conception de la variation obtenue comme une « addition d'intervalles » ne fonctionne cependant que pour des ensembles de paramètres particuliers. Dès lors qu'on change la masse, qu'on la double, par exemple, la correspondance « 1 pour 0,25 » ne s'applique plus et on doit trouver la nouvelle correspondance. À chaque nouvelle combinaison des deux autres paramètres (*masse* et *photo*), les sujets ont donc dû se remettre à la recherche d'un nouveau rapport entre la force et le déplacement de la photo. Les sujets les plus jeunes n'ont pas semblé remarquer que cette correspondance se divisait par deux si, comme dans notre exemple, la masse doublait.

Les sujets les plus âgés n'ont cependant pas fait intervenir le modèle des « additions d'intervalles » pour résoudre les défis liés à la *force du coup* et à la *photo*. En effet, plus ils sont âgés, plus ils ont recours spontanément à la logique multiplicative pour cerner les problèmes posés par ces variables. Les explications du type « si je double la force du coup, la photo se posera deux fois plus loin » ou « si je divise la *photo* par trois, on recouvrira l'étoile qui est trois fois moins loin » ou même « les trois quarts de la force donneront les trois quarts de la distance » parsèment les explorations de ces sujets. L'efficacité de ce modèle est telle que les sujets plus âgés n'ont pas eu à s'attarder très longtemps sur les variables *photo* et *force du coup*. La méthode a d'ailleurs l'avantage qu'elle n'exige pas la redécouverte d'un « intervalle » pour chaque nouvelle combinaison de valeurs. Elle a donc un spectre d'applications immédiates plus large.

	Sujet de 1 ^{ère} secondaire	Sujet de 2 ^{ème} secondaire	Sujet de 3 ^{ème} secondaire	Sujet de 4 ^{ème} secondaire	Sujet de 5 ^{ème} secondaire
Tâtonnement (rapprochements successifs)	A	B	B	X	X
Addition d'intervalles	B	A	A	X	X
Multiplication- division	X	X	B	A	A

A	Employé principalement
B	Employé épisodiquement
X	Non employé

Tableau IV) Moyens employés par les sujets pour résoudre les problèmes liés aux paramètres « force du coup » et « photo »

5.2.3.2 La variable inversement proportionnelle à D

C'est lors de l'exploration du paramètre *masse de la balle* que les sujets ont éprouvé le plus de difficultés. En effet, la plupart d'entre eux ont dès le départ abordé le fonctionnement de ce paramètre avec la même logique que celle qu'ils avaient employée pour les deux autres, c'est-à-dire avec le modèle des « additions d'intervalles » transformé pour l'occasion en « soustraction d'intervalles » - pour les plus jeunes- et avec la logique « multiplication-division » (à la différence que le « sens d'application » est inversé cette fois-ci) - pour les plus âgés -.

Les premiers ont éprouvé de grandes difficultés et n'y sont parvenus que dans un tâtonnement par rapprochements successifs. En effet, le raisonnement qui s'appuie sur l'existence d'un intervalle fixe de D pour un changement d'une (1) unité dans le paramètre *masse* est inefficace; un tel intervalle fixe n'existe pas. La nature non linéaire de la relation inverse entre la masse de la balle et D implique que cet intervalle n'est jamais le même pour toute la gamme des valeurs inscrite dans la situation, toutes choses étant égales par ailleurs. Les étonnements et expressions de consternation furent nombreux pour ces sujets qui ont résolu ces défis par tâtonnements par et approximations successives.

Les sujets les plus âgés, ceux-là mêmes qui ont utilisé la logique « multiplication-division » ont, eux aussi, éprouvé des difficultés, mais certaines de leurs tentatives ont tout de même été efficaces. Celles qui impliquaient des rapports entiers entre les valeurs de D . Par exemple, si on demande à un sujet de faire passer la photo de l'étoile orange ($D=6$) à l'étoile jaune ($D=2$), le rapport est un nombre entier; rapport de 3. Même chose pour le passage de l'étoile noire ($D=1$) à l'étoile bleue ($D=8$); rapport de 8 (ou de $1/8$). Ces passages d'une étoile à une autre ont donc pu être facilement réalisés.

C'est lorsque le défi exige un passage dont le rapport n'est pas entier (ex : de l'étoile verte ($D=4$) à l'étoile rouge ($D=3$); rapport de 0,75 ou de 1,333) que les méthodes employées ont été inefficaces. La plupart des sujets ont cherché le « point milieu » entre deux valeurs connues. Par exemple, si une masse de 1 donne l'étoile verte ($D=4$) et qu'une masse de 2 donne l'étoile jaune ($D=2$), les sujets ont spontanément proposé que la valeur de masse « milieu » (1,5) corresponde à l'étoile « milieu » rouge ($D=3$), ce qui est inexact et suggère une croyance en la linéarité de la relation inverse. Tous les sujets se sont montrés surpris quant à la non efficacité du modèle du « point milieu » et peu d'entre eux ont proposé de solutions. Malgré tout, le modèle du « point milieu » est revenu constamment et périodiquement dans les tentatives des sujets de résoudre les défis et ce, malgré qu'il ait été discrédité à de nombreuses reprises. L'obstination des sujets à le ramener constamment pour justifier leurs choix est manifeste.

Après une exploration exhaustive de la situation 03, certains sujets parmi les plus vieux sont néanmoins parvenus à développer un moyen efficace pour résoudre les défis aux rapports non entiers. Il s'agit du modèle « 2 bonds en 1 ». C'est une méthode qui implique trois étapes. Dans la première, le sujet recherche une cible intermédiaire (autre que celle qu'on cherche à recouvrir) qui s'inscrirait non seulement en rapport entier avec la position (D) de départ, mais aussi en rapport entier avec la cible qu'on cherche à recouvrir. Par exemple, dans le défi « recouvre l'étoile orange (D=6) à partir de la verte (D=4) » (rapport 1,5 ou 0,666), le sujet peut choisir comme cible intermédiaire l'étoile jaune (D=2) dont le rapport avec l'étoile de départ est 2 et dont celui avec la cible finale est 3. Dans la deuxième étape, le sujet prend la valeur de masse actuelle (quelle qu'elle soit) et la multiplie par 2 pour atteindre l'étoile jaune et, finalement, dans une dernière étape, la divise par 3 afin de pouvoir recouvrir l'étoile orange. C'est donc en imaginant une combinaison de deux bonds aux rapports entiers qu'on parvient à cerner un bond au rapport non entier.

Malgré que cette méthode soit extrêmement efficace, il est indispensable, pour la mettre en branle, de faire le bon choix de la cible intermédiaire. En effet, découper un bond non entier en deux bonds non entiers ne pourrait simplifier le problème, mais le ferait plutôt reculer. Or, ce ne sont pas tous les sujets ayant employé cette méthode qui firent toujours les bons choix de « sauts ». Leurs épisodes, bien que fort intéressants, sont dès lors ponctués de signes de surcharge et l'emploi systématique du modèle « 2 bonds en 1 » fût parfois abandonné. Des retours épisodiques et temporaires à des modèles ou moyens inférieurs, comme celui du « point milieu » furent alors assez fréquents.

À travers les explorations de l'effet de la variable *masse* sur D, les sujets ont été confrontés à des asymptotes C'est-à-dire qu'ils ont pu être mis en contact avec le fait qu'il n'existe pas, dans notre relation inversement proportionnelle, de masse suffisamment grande pour que la balle ne se déplace pas lorsqu'un coup lui est donné. Également, cela signifie que de la réduction de la masse de la balle à zéro résulterait un déplacement de la balle à une vitesse infinie et donc une prise de photo à une distance infinie.

Si alors il est impossible d'atteindre ces valeurs infinies, il n'est cependant pas exclu de pouvoir s'en approcher. C'est le comportement des sujets à l'approche de ces asymptotes qui nous a donc permis de nous renseigner sur leur compréhension de cette composante de la relation inverse. Il est apparu qu'aucun sujet n'a spontanément proposé qu'une asymptote, ou quelque « phénomène » semblable que ce soit, n'existe près des axes. Tous ont proposé des valeurs de *masse* telles qu'elles soient suffisamment élevées pour clouer la balle à l'écran. De nombreuses valeurs ont été proposées et défendues. Les sujets ont dû évidemment faire reculer à répétitions ces propositions, étant donné que les résultats observés indiquaient clairement que la balle avançait toujours. La plupart des sujets ont tout de même pu en venir finalement à formuler l'idée qu'on ne puisse jamais atteindre les valeurs asymptotiques.

Quant à l'asymptote horizontale, aucun sujet n'a proposé que la balle puisse atteindre une vitesse infinie. Devant la surprenante augmentation de la vitesse de la balle lorsque la masse s'approche de 0, certains sujets ont plutôt proposé toutes sortes d'explications alternatives à la physique dont nous discuterons davantage plus tard. Ces idées impliquent l'existence d'un relief dans le premier cas (sur lequel la balle roulerait) et, dans le second, d'une hypothétique résistance de la balle à traverser les cibles (étoiles).

Un autre indice qui nous indique que les sujets n'ont pu intégrer l'idée de l'asymptote à leur compréhension de la relation inverse se manifeste quand on se rapproche graduellement de celles-ci. Par exemple, le sujet de quatrième secondaire conçoit aisément qu'il faille doubler la masse pour faire passer la photo de l'étoile bleue ($D=8$) à l'étoile verte ($D=4$), qu'il faille encore doubler pour recouvrir l'étoile jaune ($D=2$), et encore pour recouvrir l'étoile noire ($D=1$), mais hésite très longuement avant de doubler une dernière fois de sorte à faire tomber la photo entre l'étoile noire en l'origine (à $D=0,5$). Il propose alors de nombreuses autres valeurs qui se rapprochent, certes, mais n'atteignent jamais l'objectif. Des exemples de comportements semblables peuvent être identifiés chez tous les sujets. La plupart parviendront à admettre qu'il existe des valeurs qu'on ne peut atteindre, mais il est clair que les sujets les plus âgés ont mis moins de temps.

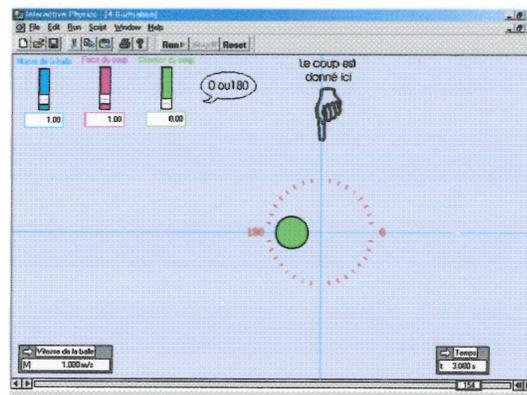
	Sujet de 1 ^{ère} secondaire	Sujet de 2 ^{ème} secondaire	Sujet de 3 ^{ème} secondaire	Sujet de 4 ^{ème} secondaire	Sujet de 5 ^{ème} secondaire
Fonctionne par tâtonnements	A	B	B	X	B
Raisonnement du « point milieu »	X	A	A	A	A
Difficultés avec rapports non entiers	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Raisonnement « 2 bonds en 1 »	X	B	X	A	B
Difficultés à reconnaître l'asymptote	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Finit par admettre la présence de l'asymptote	NON	OUI	OUI	OUI	OUI

A	principalement
B	épisodiquement
X	Non employé

Tableau V) Moyens employés par les sujets pour résoudre les problèmes liés au paramètre « masse »

5.2.4 Les sujets et la situation 04

Rappels sur la situation 04



- La balle surgit toujours de la gauche de l'écran à 1m/s (seule différence fondamentale avec les situations précédentes)
- C'est toujours à l'intersection des lignes bleues que le coup est donné
- Les sujets ne peuvent donner le coup que dans deux directions : 0° et -180°
Note : en raison du momentum initial de la balle...
- La trajectoire ne correspond plus nécessairement à la direction du coup
- La vitesse finale n'est plus proportionnelle à la force du coup

L'intervieweur demande au sujet d'obtenir que la balle rebondisse ou accélère à des valeurs de vitesses précises, ou qu'elle s'immobilise.

5.2.4.1 Prise en compte du momentum de la balle

À travers l'exploration des situations, il a été possible d'observer en quoi et comment les sujets ont tenu compte de la vitesse initiale de la balle pour cerner les problèmes qui leur ont été posés. C'est-à-dire, en fait, de chercher à savoir s'ils ont ou non tenu compte du momentum initial de la balle ainsi que la manière dont peuvent s'exercer les modèles alternatifs. C'est par l'examen attentif des erreurs des sujets, par les expressions de surprise, les verbalisations et l'observation de la qualité des modèles qu'ils ont développés que cette reconnaissance a pu s'effectuer.

Ce sont les sujets les plus jeunes qui ont eu le plus de difficultés à intégrer l'idée de l'inertie à leurs modèles. Nombre de commentaires formulés indiquent qu'ils cherchent clairement à reproduire exactement ce qu'ils ont vécu dans les situations précédentes, où la balle était initialement au repos. Malgré qu'il ne fasse aucun doute que la balle soit en mouvement au moment de recevoir le coup, ils ont, par exemple, exprimé leur surprise de voir qu'il soit possible que la vitesse de la balle augmente (d'un essai à l'autre) lors d'une réduction de la force du coup et vice-versa. Ils ont également été surpris que d'un coup donné à gauche puisse résulter une trajectoire vers la droite.

Certains ont même proposé qu'il soit possible de stopper la balle au centre... en donnant un coup de force 0! Ceci semble clairement indiquer qu'ils ne considèrent pas le mouvement initial dans le problème étant donné qu'un coup inexistant ne peut évidemment pas modifier le comportement de la balle. Dans un même ordre d'idées, certains ont d'ailleurs clairement admis qu'il leur semblait impossible dans la réalité de stopper une balle en lui donnant un coup. Pour ces derniers, il ne peut résulter d'un coup qu'une accélération.

Plusieurs des plus jeunes se sont aussi étonnés qu'à une réduction de force de moitié ne corresponde pas nécessairement une diminution de vitesse de moitié. Un tel raisonnement, s'il s'appliquait bien aux situations précédentes, n'est pas applicable ici.

	Sujet de 1 ^{ère} secondaire	Sujet de 2 ^{ème} secondaire	Sujet de 3 ^{ème} secondaire	Sujet de 4 ^{ème} secondaire	Sujet de 5 ^{ème} secondaire
Un coup de force 0 doit stopper la balle	B	B	B	X	X
On ne peut stopper une balle en lui donnant un coup	X	B	A	X	X
Une augmentation de force doit produire une accélération (d'un essai à un autre)	X	X	B	X	X
Un coup à gauche doit nécessairement faire rebondir la balle vers la gauche	B	A	A	X	X
Une réduction de la force du coup doit produire une réduction proportionnelle de la vitesse	X	A	A	X	X

A	adhésion
B	adhésion, puis abandon
X	pas de signes d'adhésion

Tableau VI) Adhésion de certains élèves à des énoncés qui négligent le momentum initial de la balle

Selon notre analyse, l'adhésion de certains sujets à un certain nombre d'énoncés du tableau précédent, indices d'un refus de considérer le momentum initial de la balle, semble avoir eu pour effet 1) d'empêcher le développement de modèles efficaces de résolution des défis et 2) de confiner les sujets dans des explications mathématiques dont le sens physique fait défaut.

Les modèles que les sujets ont par la suite proposés et testés pour résoudre les défis peuvent donc dès lors être associés non seulement au degré de leur prise en compte du sens physique (par opposition à des expressions purement numériques) mais également à leur efficacité, c'est-à-dire en fonction de leur capacité à rendre compte d'un plus grand nombre de problèmes variés et nouveaux.

Nous présentons maintenant les différents modèles qui ont été élaborés par les sujets pour tenter de rendre compte du comportement de la situation, et notamment d'intégrer l'effet du momentum initial à ces modèles.

5.2.4.2 Le modèle additif simple

Ce modèle n'a pu être élaboré qu'en début d'exploration par les sujets. Comme il a été mentionné précédemment, les premières explorations ne firent intervenir que la *direction du coup* et la *force du coup*, non la *masse de la balle*, celle-ci étant fixée à 1 par entente entre l'intervieweur et le sujet. Dans ces circonstances, un simple ajout de la vitesse initiale à la *force du coup* (dont la grandeur correspond exactement, pour l'occasion, à l'accélération obtenue), quand la *direction du coup* est 0, va permettre des prédictions efficaces. Quand la direction est inversée, on effectue plutôt l'opération de soustraction. En physique, au coup va correspondre une augmentation de vitesse. Le coup n'étant ici compris comme rien d'autre que la force (inscrite sur le bouton) appliquée durant un intervalle de temps très court. La durée de cet intervalle n'est ici d'aucune importance et le lecteur ne doit s'attarder que sur deux informations : 1) cet intervalle est le même pour tous les coups donnés et 2) cet intervalle est réglé de sorte qu'un coup d'intensité 1 sur une balle de masse 1 produise toujours une accélération de 1 (F/m). La vitesse finale de la balle peut alors être obtenue par la somme de la vitesse initiale et de l'accélération (positive ou négative) produite durant l'intervalle.

Or, ce sont les cinq sujets qui ont pu en venir à produire un raisonnement additif. Cependant, les plus jeunes s'en sont tenus à des explications numériques. Seuls les plus âgés ont exprimé ces opérations d'addition et de soustraction comme des « ajouts » (prendre) ou des « restes » (enlever), Même si parfois, ils ont expliqué le calcul en termes inverses : « on soustrait ou on additionne 1 à la force selon que le coup est donné à gauche ou à droite », seuls les plus âgés ont verbalisé l'idée que la valeur ajoutée ou réduite correspondait à la vitesse initiale.

Les plus jeunes, quant à eux, s'en sont tenus exclusivement aux valeurs finales de vitesse pour induire leur modèle, sans tenir compte de la *différence* de vitesse. Éventuellement, la méthode a dû être abandonnée par tous lorsque la masse s'est mise à changer. Cet abandon a cependant été bien plus facile pour les sujets de 4^{ième} et 5^{ième} secondaire.

5.2.4.3 Le modèle se basant sur les singularités

Les sujets remarquent rapidement que certaines combinaisons de paramètres vont donner, à l'intérieur des explorations, des résultats facilement identifiables. Par exemple, lorsque la *masse*(m)=1, que la force (F) est de 1 et la direction de 180, la balle s'immobilise au centre du rapporteur d'angles puisqu'elle y reçoit une énergie qui « neutralise » complètement son mouvement, ce qu'avait aussi observé Legendre (1995, p.492) chez ses sujets. Or, ce résultat singulier a servi, dans de nombreux cas, de point de référence à l'élaboration de modèles qui font montre d'un certain pouvoir prédictif. En effet, dès lors que l'on a remarqué ce résultat, il devient aisé de découvrir que si $F > 1$, la balle rebondit vers la gauche, et si $F < 1$, elle poursuit sa course vers la droite. Plus tard, ce modèle, pour les autres masses, peut aussi être employé de la même manière en comparant F et m , puisque ces deux valeurs, lorsqu'elles sont égales donnent l'immobilité.

Bien que les sujets qui ont employé ce modèle n'aient pas su y faire coller une explication physique, l'efficacité de la méthode est manifeste. Il est à noter aussi que cette méthode s'applique exclusivement lorsque la direction est de 180. Lorsqu'elle est de 0, la balle continue toujours sa course vers la droite. Le modèle ne permet donc pas d'unifier ce qui se passe à 0° avec ce qui se passe à 180°. Bien sûr, elle ne permet pas non plus de formuler des prédictions en ce qui concerne la valeur de vitesse qu'on cherche à obtenir et donc, l'intervieweur a cherché à pousser les sujets au-delà de la simple explication numérique. Ce dépassement a été possible pour certains sujets seulement.

5.2.4.4 Le modèle « équilibre + écart »

Un des modèles parmi les plus fructueux a été appelé le modèle « équilibre + écart » et est, en fait, un développement du modèle précédemment présenté. Proposé principalement par les plus âgés, le modèle fait, dans certains cas, intervenir la notion de « force équilibrante ». Dans tous les cas, cependant, il est question, comme précédemment, de prendre comme point de départ les combinaisons de valeurs qui stoppent la balle au centre. À partir de cette information, le sujet tente de déterminer l'influence d'une (1) unité de force sur la

vitesse. Par exemple, on sait que la balle va s'immobiliser si $D=180$, $F=1$ et $m=1$. Le sujet découvre alors que s'il augmente la force de 1 c'est-à-dire qu'il inscrit $F=2$, la balle rebondit à $V=2\text{m/s}$. Un (1) écart dans la force produit donc un (1) écart dans la vitesse. La suite est facile; chaque écart de la force à la « force équilibrante » produit un (1) écart dans la vitesse, vers la gauche comme vers la droite. Cela n'est cependant vrai que pour $m=1$. Dès que la masse change, il faut trouver le nouvel écart. Pour $m=3$, par exemple, cet écart est de $1/3$. À noter que cet écart est toujours l'inverse multiplicatif de la masse, mais aucun sujet n'a semblé remarquer cette idée, ni produire un modèle unifié permettant de connaître mathématiquement les écarts. Ces derniers ont été découverts empiriquement à chaque fois. Il est à noter, encore une fois, que le modèle ne permet pas d'unifier le comportement de la balle quand le coup est donné dans la même direction que la trajectoire initiale avec la direction 180. Ce modèle ne fait intervenir l'idée de l'inertie qu'en ce qu'il implique de devoir « équilibrer » le mouvement initial de la balle. Certains ont parlé du « feu contre le feu ». Pour le reste, aucune verbalisation sur le sens physique des découvertes effectuées n'a été produite.

5.2.4.5 Le modèle « $(F-m)/m$ »

Ce modèle, qui permet le calcul de V , n'a été développé que par un seul sujet. Il est en fait très semblable au modèle précédent puisqu'il implique un calcul qui y ressemble; la partie $(F-m)$ n'est rien d'autre, en fait, que le décompte des écarts de la force du coup à la « force équilibrante ». La division par m qui suit permet de prendre en compte la masse de la balle, ce que n'ont d'ailleurs pu faire aucun des sujets ayant développé le modèle précédent. Le calcul donne donc la vitesse finale pour toute combinaison de valeurs en $D=180$. Il devrait pouvoir se modifier en $(F+m)/m$ pour les combinaisons où $D=0$, mais cette possibilité n'a pas été proposée par le sujet qui a découvert sa méthode par simple induction. Se basant sur le souvenir de nombreux essais, il semble avoir remarqué que s'il effectuait ce calcul, il obtiendrait à chaque fois la vitesse finale de la balle. Ce mode d'apparition particulier du modèle est une des raisons pour lesquelles on a choisi ici de le présenter distinctement du modèle précédent. La seconde raison est la clarté de son articulation mathématique.

5.2.4.6 Le modèle « effet du coup +1-1 »

Ce modèle n'a été développé que par les sujets dont le souci pour le sens physique des situations était le plus apparent. Il a souvent été inscrit en compétition avec « équilibre + écart » par les sujets. Dans certains cas, le premier a remporté les faveurs, dans d'autres, il les a perdues.

Ce modèle est considéré par nous comme celui qui est le plus conforme à la réalité physique de la situation 04. Il implique premièrement un « effet du coup » qui correspond en réalité à l'accélération $a=F/m$ que le coup a pu produire sur la balle. Bien que cette accélération ne fasse pas partie explicitement de la situation, certains sujets ont bien verbalisé qu'un coup de 1 ne va pas toujours produire un changement de vitesse de 1, comme c'est le cas à $m=1$. Il a été verbalisé que plus la balle était lourde, moins la force aurait un grand effet sur la balle et donc, l'« effet du coup » (et non le coup lui-même) serait moindre. La distinction construite par les élèves est ici très claire. Certains sujets ont parlé d'un « boost » et d'autres, de « vitesse après le coup ». Nous avons choisi ici de regrouper tout cela sous l'étiquette « effet du coup » qui a aussi été verbalisée par un sujet. Notons au passage que Roth (1995) avait, dans ses recherches empiriques, lui aussi remarqué une telle convergence dans l'adoption de certains termes ou concepts, une convergence qui tendait vers les concepts scientifiquement corrects. Comme dans ses recherches, une bonne partie des discussions ont eu pour but de clarifier les concepts qu'on choisit de faire intervenir. Ces concepts ont dans notre cas été développés le plus souvent à partir d'une réflexion qualitative, mais il est arrivé que des idées erronées soient à son origine, comme dans le cas du sujet de deuxième secondaire. Dans tous les cas, cependant, ils correspondent au calcul correct F/m . Par la suite, les sujets ont tenu compte de la vitesse initiale, soit en ajoutant ou en retranchant la valeur 1 à la valeur découverte. Le modèle est donc efficace dans la direction 0 comme dans la direction 180.

Le tableau suivant présente les modèles employés par les sujets lors des explorations.

	Sujet de 1 ^{ère} secondaire	Sujet de 2 ^{ème} secondaire	Sujet de 3 ^{ème} secondaire	Sujet de 4 ^{ème} secondaire	Sujet de 5 ^{ème} secondaire
Méthode additive simple	B	B	B	B	B
Recherche de singularités	A	B	X	X	X
Équilibre + écart	X	A	X	B	B
$(F-m)/m$	X	X	X	B	X
Effet du coup +1-1	X	B	X	A	A

A	Employé principalement
B	Utilisé mais finalement rejeté
X	Non employé

Tableau VII) Modèles employés par les sujets pour résoudre les problèmes de la situation 04

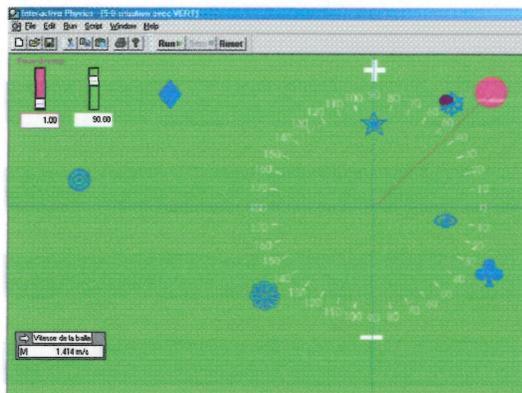
Il est nécessaire ici de mentionner que les itinéraires cognitifs des sujets n'ont que peu de traits en commun avec la démarche linéaire. Les reculs sont fréquents, les progrès partiels et hésitants, les avancées parfois longues, parfois courtes, parfois stériles. Le tableau ci-dessus ne rapporte que grossièrement les modèles qui ont été invoqués par les sujets pour expliquer le comportement de la balle.

Il est clair à ce moment de l'analyse que les sujets qui se rabattent sur des algorithmes mathématisés ne sont pas les plus aptes à trouver des pistes fructueuses. Cela est manifeste d'un sujet à l'autre, mais également d'un épisode à l'autre chez un même sujet. C'est quand ceux-ci collent de près aux considérations qualitatives qu'ils développent les meilleurs modèles. C'est aussi dans ces moments qu'ils peuvent le plus facilement appréhender les problèmes nouveaux. On peut aussi voir comment les compréhensions qualitatives, lorsqu'elles sont erronées (sujet de 3^{ème}) peuvent mener à des impasses conceptuelles.

Nous verrons plus loin à quel point les résistances à développer des modèles efficaces ne résultent pas d'une absence, mais bien de l'omniprésence de structures (p-primis) préalables à l'abord de nos situations.

5.2.5 Les sujets et la situation 05

Rappels sur la situation 05



-Même chose que la situation précédente, à la différence que les sujets choisissent librement la direction du coup (n'importe quelle valeur de -180° à 180°)

L'intervieweur demande au sujet de faire en sorte que la trajectoire traverse l'une ou l'autre des cibles pour une force du coup unitaire, puis pour d'autres valeurs de force du coup

Au début de l'exploration de la situation 05, nous avons pris la peine, d'expliquer aux sujets que la situation fonctionnait bien sur le même principe que la précédente. Cette conviction a été rendue possible par des essais qui font intervenir les deux même valeurs de direction (0 et 180) que nous laissait la situation 04. Une fois que chaque sujet en fut convaincu, nous lui avons lancé des défis qui nécessitaient d'autres valeurs de direction. Le premier défi lancé fut toujours le même : « peux-tu choisir les valeurs qui conviennent pour que la balle traverse l'étoile? » Notons que cette cible est installée à la position 90° sur le rapporteur d'angle.

Il convient ici d'indiquer que ce sont tous les sujets, les cinq principaux ainsi que les quinze autres, et ce, nonobstant leur degré de prise en compte du momentum initial dans l'exploration de la situation précédente, qui ont d'abord proposé les valeurs 90 (direction du coup) et 1 (force du coup) pour réaliser ce défi. Ce résultat, bien connu de la didactique des sciences comme une conception classique (Andre, 1999), fut généralisé à tous les sujets. Même ceux dont la prise en compte du momentum initial dans les verbalisations précédentes a été la meilleure ont

proposé cette combinaison de valeurs qui n'amène manifestement pas au résultat attendu.

Pour cette combinaison de valeurs, la balle dévie de sa trajectoire non pas d'un angle de 90° , mais bien de 45° . Il semble que la vitesse obtenue n'ait pas quant à elle monopolisé grande attention. Ce sont plutôt les considérations de trajectoire qui ont constitué l'objet des explorations subséquentes.

Face à cet échec, tous ont proposé de nouveaux modèles. Les plus âgés sont ceux qui, généralement, se sont remis le plus vite de leur surprise et qui ont proposé de nouvelles solutions. Il est intéressant de voir à quel point les réactions ont été variées. On peut identifier deux types principaux de modèles proposés immédiatement après l'échec de l'essai à $d=90$ et $F=1$: le modèle soustractif et le modèle « direction/? ».

5.2.5.1 Le modèle soustractif

Il s'agit d'un modèle où les sujets considèrent que la différence entre la direction du coup et la trajectoire obtenue est une différence au sens mathématique du terme. Les sujets qui ont proposé ce modèle ont généralement tenté d'ajouter les degrés manquants à la direction du coup. Par exemple, dans l'exemple initial, où d'une *direction du coup* de 90 a résulté une déviation de la trajectoire de 45 degrés, les sujets ont ajouté les 45 degrés manquants en tentant la valeur de *direction du coup* de 135. Bien entendu, l'échec qui résulte de cette méthode mène rapidement à son abandon.

5.2.5.2 Le modèle « direction/? »

On doit lire : « modèle *direction* divisée par quelque chose ». Il s'agit, en réalité, de tentatives visant à établir une relation proportionnelle entre la direction du coup et la déviation de la balle. Suite à l'échec dans l'exemple de l'étoile, le sujet remarque généralement que la déviation de trajectoire est la moitié de la *direction du coup*. Il s'ensuit qu'il propose que toute déviation corresponde à la moitié de la force. Toujours dans le but de traverser l'étoile, le sujet va, conformément au modèle,

proposer la valeur 180 pour obtenir une déviation de 90. Or, curieusement, cette valeur les mène à l'immobilisation de la balle (comme c'était d'ailleurs le cas dans la situation 04). La plupart des sujets ne semblent donc pas avoir établi de lien avec ce qu'ils avaient expérimenté précédemment. Ils vont alors chercher à s'approcher de la cible dans toute la mesure du possible par des tentatives impliquant des valeurs telles que 175, 178 ou 179,9 pour la direction du coup. Dans l'étude de son « schème de la moyenne », Legendre avait observé la même chose : « [...] ils choisissent tout naturellement un coup à 180 degrés du mouvement initial sans réaliser, avant de l'essayer, qu'un tel coup a pour effet, non pas de modifier l'orientation initiale de 90 degrés, mais d'arrêter le mouvement ». (Legendre, 1993, p.193)

Lorsqu'on change la force du coup, cependant, le modèle local « direction/2 » ne s'applique plus et on ne peut dès lors diviser la direction par aucune valeur unique qui puisse donner toutes les trajectoires. Les sujets verbaliseront alors qu'il y a « une nouvelle règle à découvrir pour chaque nouvelle direction ». Plusieurs ont alors dû se rendre compte de la nature asymptotique de certaines relations, entre la *force du coup* et la déviation, par exemple. D'autres qui ont plutôt choisi de doubler la force du coup pour obtenir le double de déviation, ont dû, eux aussi, découvrir un tel comportement asymptotique. L'élaboration du présent modèle et son abandon peu de temps après vont généralement ensuite mener les sujets vers toutes sortes de tentatives « algorithmisées » le plus souvent élaborées sur la base d'un seul essai.

Les sujets font alors montre d'une grande originalité et d'un sens de l'effort certain dans l'élaboration de toutes sortes de tentatives pour établir le sens des observations numériques extirpées de la situation. Malheureusement, le niveau de complexité de la situation est très grand et les sujets n'iront pas beaucoup plus loin dans leurs hypothèses coordinatives. Plus l'exploration avance, plus les sujets évacuent la raison physique et se réfugient dans les correspondances numériques de surface. De façon générale, nombreuses sont les professions de foi explicites en la mathématique pour résoudre les défis et plus rares se font les références aux raisons physiques. Il est intéressant de noter cependant, que tous ont choisi de s'attarder à une variable facilement identifiable, la déviation de la balle, pour

chercher à la coordonner avec les autres variables. En physique, le résultat qu'est la « déviation » ne peut être obtenu qu'à partir d'une série complexe d'opérations et ne constitue pas une variable primaire pour la compréhension du problème. Sans proposer que la situation, dans sa présentation, ne constitue un piège, nous pouvons faire remarquer que c'est sur une variable dont l'apparence est manifeste que les sujets ont choisi de s'attarder.

Malgré que les sujets se soient quelque peu égarés dans des tentatives « chiffrées » visant à expliquer le problème et qu'ils se soient, par exemple, mis à la recherche de symétries simples, de « beaux chiffres » ou qu'ils aient proposé des explications purement numériques dont les résultats peuvent être aussi absurdes que des déviations de 1000 degrés, on peut reconnaître que certains d'entre eux ont tenté de faire intervenir le momentum initial dans leurs explications. Par exemple, on tente de rapprocher la situation d'une partie de billard, ou on explique certaines variations de vitesse comme des « pertes de vitesse ». Il semble cependant évident que le niveau de complexité de la situation a eu dès lors raison de nos sujets

	Sujet de 1 ^{ère} secondaire	Sujet de 2 ^{ème} secondaire	Sujet de 3 ^{ème} secondaire	Sujet de 4 ^{ème} secondaire	Sujet de 5 ^{ème} secondaire
Le sujet propose initialement que la direction du coup équivaille à la trajectoire	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Modèle soustractif	A	X	X	X	A
Modèle « direction/? »	A	A	X	A	A
Le sujet finit par proposer des explications numériques plutôt que physiques	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Prise en compte explicite du momentum dans les explications	NON	OUI	OUI	OUI	OUI

A	Proposé puis abandonné
X	Non proposé

Tableau VIII) Comportement des sujets dans la situation 05

5.2.6 Résumé des analyses de la première partie

On peut remarquer un certain nombre de tendances générales qui se dégagent des analyses et des tableaux présentés dans cette partie de la thèse. Ces tendances générales sont au nombre de trois.

La première donne principalement un aperçu du rôle du raisonnement qualitatif dans la compréhension des situations. Ainsi, bien qu'on puisse remarquer que les sujets plus âgés ont plus souvent et mieux recours aux raisonnements qualitatifs, aucun sujet ne s'engage dans cette voie d'une façon rigoureusement systématique. Les compréhensions qualitatives vont sembler baliser épisodiquement le développement des modèles. Les sujets vont et viennent entre le développement mathématique de leurs modèles et les éléments de raisonnement qualitatif qui y contribuent.

Néanmoins, il est clair que les moments où les raisonnements qualitatifs occupent le terrain sont les moments les plus fructueux des entrevues. Quand ce sont plutôt les algorithmes qui gouvernent les initiatives exploratoires des sujets, que ce soit à l'échelle d'un épisode, d'une entrevue ou de l'ensemble du travail d'un sujet, on enregistre de moins bons résultats.

Ainsi, lors des épisodes qu'on peut associer à des compréhensions qualitatives,

- 1) le taux des essais réussis est beaucoup plus important (près du double),
- 2) les sujets sont plus efficaces dans la résolution de problèmes nouveaux,
- 3) ils reconnaissent plus facilement si leurs hypothèses sont falsifiées,
- 4) ils produisent des modèles moins locaux et au pouvoir explicatif et prédictif plus universel,
- 5) ils peuvent attribuer un sens physique à des découvertes inattendues sur la logique des nombres dans la situation,
- 6) Ils ont plus souvent des solutions à proposer lors d'impasses (même si elles ne s'avèrent pas toujours efficaces en bout de ligne) et
- 7) Ils sont beaucoup moins facilement en proie au découragement lors d'impasses.

Il semble clair ici que lorsqu'un raisonnement qualitatif est évoqué au cours des explorations et qu'il est associé à la construction d'un modèle, ce dernier a de bien

meilleures chances d'être prospère, non seulement en prédictions ponctuelles mais en possibilités d'évolution.

Il faut admettre cependant qu'une compréhension qualitative ne semble pas être suffisante pour le développement des modèles. En effet, non seulement les prédictions deviennent plus efficaces, comme nous avons pu le voir lorsque les sujets passent de la situation 02 à la situation 03, mais cela enrichit également le développement des modèles. Par exemple, dans l'exploration de la situation 02, de nombreux sujets semblent avoir esquivé la prise en compte du caractère asymptotique de la raison inverse. Ce n'est que lorsque les évaluations de D deviennent nécessaires (dans la situation 03), que cette propriété a été explicitement remarquée.

Un deuxième constat majeur qui ressort des analyses est que la relation inverse pose problème aux sujets. Ces derniers ont éprouvé les plus grandes difficultés lors de son intégration aux modèles. Ainsi, c'est lors des épisodes d'exploration de l'effet de la masse sur la vitesse ou sur D que les sujets éprouvent les plus grandes difficultés. Ils s'étonnent constamment de ce qui se passe lorsqu'on utilise des valeurs faibles ou élevées de masse.

Les sujets qui ont le plus de difficultés à intégrer la raison inverse sont ceux qui traitent la raison proportionnelle comme une « addition d'intervalles ». Tandis que ceux qui opéraient la raison proportionnelle comme une relation multiplicative ne vont, quant à eux, éprouver des difficultés que lorsque le rapport inverse n'est pas entier. Dans tous les cas, cependant, la raison inverse est problématique et semble contre-intuitive

Troisièmement, on peut remarquer que les sujets éprouvent des difficultés majeures à tenir compte du momentum initial de la balle dans leurs modèles. Bien que les sujets les plus vieux le fassent le mieux et que les épisodes de raisonnement qualitatif sont les plus fructueux, la prise en compte du momentum, tant pour la trajectoire finale que pour la vitesse finale, s'est avérée difficile.

Les sujets qui sont finalement parvenus à l'intégrer à leurs modèles (qui ont souvent été, il faut le dire, fort sophistiqués), n'ont pu le faire qu'au prix de très nombreux reculs temporaires, remises en questions, intervalles de réflexions et mises à l'essai d'hypothèses. Il faut cependant admettre que les modèles qui ont été les plus efficaces ont laissé apparaître clairement, dans les équations qui les décrivent, la place du momentum. Dans certains cas, il s'agissait du « +1 » (puisque la vitesse initiale est de 1). Dans d'autres, à l'intérieur d'une « force équilibrante ». Les auteurs de ces modèles ont bien explicité cette présence.

Deuxième partie :

5.3 Les conceptions rencontrées lors de l'exploration des situations

Les conceptions, bien qu'elles aient effectivement été présentes à quelques reprises dans les entrevues, ne sont apparues qu'occasionnellement dans les verbalisations. Il est aussi, bien entendu, possible de penser qu'un plus grand nombre d'entre elles aient été mises en branle de manière plus implicite et plus discrète, mais une analyse de telles conceptions peut sembler périlleuse et nous choisirons donc de nous en tenir à celles qui ont été explicitées. Elles sont considérées ici comme des éléments de raisonnement qualitatif et sont prises en compte qu'elles soient scientifiques ou non.

En premier lieu, il convient d'indiquer que les conceptions que nous avons pu observer dans l'exploration du micromonde n'ont pas semblé occuper un rôle de premier plan. Il semble davantage recevable que les conceptions décrites par les sujets dans les verbalisations aient été formulées par ceux-ci essentiellement pour marquer des instants-clés des explorations plutôt que pour servir de véritable base de raisonnement. Il peut sembler aussi davantage admissible que leur existence et leur emploi aient été, en fait, subordonné à autre chose. Un certain nombre d'indices nous permettent d'appuyer cette hypothèse. Outre leur emploi plutôt anecdotique, aucune d'entre elles n'a jamais été défendue très âprement. Tout au plus semblaient-elles détenir un statut d'hypothèse, qui peut, tout comme n'importe quelle hypothèse, être réfutable, démontable et expérimentalement rejetable. Des conceptions qui sont apparues dans les discours des sujets, la plupart sont généralement apparues au début des explorations ou à la fin, quand elles correspondaient à des slogans populaires (ex : « action-réaction », « tout ce qui monte redescend », etc.), ce qui laisse penser qu'elles n'ont pas souvent été le produit authentique des explorations, mais qu'elles faisaient plutôt partie d'une certaine intuition initiale, les sujets n'en faisant habituellement plus mention dès que celles-ci se retrouvaient en conflit.

Les conceptions qui ont été verbalisées ont ainsi davantage semblé être des balises temporaires pour les sujets, permettant de mettre au clair l'état des connaissances à un point donné de l'exploration. En tout cela, les conceptions ont

semblé malmenées et bousculées par des principes de compréhension plus forts et plus fondamentaux bien que plus implicites.

Bien entendu, d'emblée, les conceptions classiques habituellement rencontrées chez les individus en physique, particulièrement, ne sont pas nombreuses et, bien sûr, les situations considérées, restreintes à quelques variables, ne permettent pas nécessairement l'émergence d'un large spectre de conceptions. Néanmoins, il paraît clair que les itinéraires cognitifs de nos sujets, en situation d'induction, ne leur attribuent pas une place de premier plan. C'est d'ailleurs surtout le cas des sujets les plus jeunes, ceux dont l'emploi d'algorithmes constitue une voie d'exploration plus courante que les explications physiques. Pour ces derniers, il a tout de même été possible d'en identifier quelques-unes.

Il semble important d'indiquer que les conceptions évoquées ne seront pas systématiquement associées avec les conceptions qu'on retrouve dans les répertoires. Bien que toutes s'en rapprochent effectivement, nous considérerons leur formulation par nos sujets comme les conceptions elle-mêmes.

5.3.1 Analyse des conceptions rencontrées

Ainsi, à propos du mouvement Marco(2), indique que:

« plus la balle est lourde, plus elle va arrêter proche, parce que c'est comme quand tu lances quelque chose qui est lourd, une <..?..> si vous le lancez assez fort, il va arrêter à une place, si vous le lancez moins fort, avec la même masse, il va arrêter un peu avant parce qu'il est plus lourd ».

Parfois, Marco(2) propose aussi qu'au lieu de la distance, ce soit la vitesse qui dépend de la masse¹. Dans tous les cas, il semble clair que la vitesse et la masse sont très liés. De plus, on semble ici adhérer à une certaine conception de l'épuisement de la force initiale:

« C'est parce tout ce qui est en mouvement... bien... tout ce qu'on lance va s'arrêter de toute façon... je ne sais pas pourquoi... mais c'est comme ça ».

¹ [MARCO(2) S2E2: 108-113]

Comme nous l'avons indiqué précédemment, ces conceptions se sont cependant inscrites en incompatibilité avec les phénomènes de l'écran. Dans les situations, en effet, la friction est absente. Il n'y a donc aucune compatibilité entre ce qui est observé et ces conceptions. C'est peut-être la raison qui a contraint le sujet à se rabattre sur les explications mathématisées pauvres en raison physique. C'est d'ailleurs peut-être aussi ce qui s'est produit pour le sujet de première secondaire, Karl(1), à l'exception que la rupture soit pour lui si profonde qu'elle a peut-être inhibé la verbalisation d'éventuelles conceptions. Karl(1) n'a en effet verbalisé aucune conception.

Des observations concernant le mouvement de la balle ont aussi été mises en mots par Emmanuel(4). Ce sujet est celui qui investit le plus d'énergie à construire le sens qualitatif des situations et à le comparer aux réalités usuelles. Il n'est donc pas étonnant de le voir souscrire plus clairement à un ensemble de conceptions. Ainsi, il est indéniable que celui-ci adhère à une conception temporelle du mouvement, c'est-à-dire qu'une force peut-être absorbée par un objet, l'habite durant le mouvement, et finit par s'épuiser pour imposer l'immobilité. Emmanuel(4) dira, par exemple, dans la première entrevue:

Emmanuel(4) : Il faut dire aussi que c'est à cause de la forme... il y a aussi, il faut le dire, des courants d'air, des choses comme ça, peut-être que ça va ralentir la balle... ou, s'il n'y a pas d'air du tout, c'est vrai que la balle de ping-pong, à cause de sa masse qui est basse, ne pourra pas conserver la force aussi longtemps que la balle de golf.

I : Conserver la force.

Emmanuel(4) : La force qu'on met dedans... là, nous n'avons pas de balle de ping-pong... mais, si on pousse sur la balle de ping-pong, la force qu'on a mise dedans devrait être ressentie peut-être moins longtemps, mais, si on prend la balle de golf, comme vous l'avez dit, si on la lance, elle va rouler plus longtemps, à cause du fait qu'elle est plus lourde... alors, elle peut peut-être conserver la force plus longtemps, la force que l'on a mise dedans, elle va peut-être rouler plus longtemps.

I : Parce qu'elle est plus lourde, elle conserverait ça plus longtemps.

Emmanuel(4) : Oui.

Un peu plus tard, dans la même entrevue, Emmanuel(4) indique une certaine conception de l'effet de l'air sur la balle:

Emmanuel(4) : J'ai pensé à une autre chose aussi... la balle de ping-pong, elle est vide... elle contient de l'air... donc, elle aurait peut-être plus tendance à suivre l'air... donc, puisque l'air est plus présent à l'intérieur de la balle, la balle sera davantage portée à se diriger vers une direction moins précise... donc, elle devrait rouler moins longtemps aussi, parce que l'air qu'il y a à l'extérieur et à l'intérieur de la balle fait que la balle s'arrêtera avant.

I : Ok, c'est l'air qu'il y a à l'intérieur.

Emmanuel(4) : S'il n'y a pas d'air dans la balle de golf, s'il n'y a pas d'air à l'intérieur, donc l'air à l'extérieur ne devrait pas l'arrêter, ne devrait pas avoir le même effet que sur la balle de ping-pong.

Tout cela ressemble aux analogies évoquant des images concrètes décrites par Larochelle & Désautels (1992). Pour mettre cette conception en conflit, l'intervieweur cherche à insister sur la différence de masse plutôt que sur le rôle de l'air:

I : Et si on avait, par exemple, pour la balle de ping-pong, si elle était pleine de plastique.. et puis, si on avait une autre balle de ping-pong, mais pleine d'acier... il n'y a pas d'air dans ni l'une, ni l'autre... pourtant, il y en a une plus lourde que l'autre... tu es d'accord que la balle d'acier sera plus lourde... à ce moment, il n'y a pas d'air dans l'une, ni dans l'autre... si on donne un coup de force égale sur les deux...
Emmanuel(4) : Il n'y a pas d'air dans l'une, ni dans l'autre... mais, l'air, en voulant dire la gravité ou l'air si vous voulez, aura quand même un effet plus grand sur la plus petite, parce qu'elle est moins lourde... celle qui est plus lourde combattra plus l'air et la gravité pour continuer son chemin.

Il semble ici que le sujet admette que la force qui est à l'intérieur de la balle s'épuise effectivement, mais que cet épuisement puisse s'accélérer ou se ralentir, dépendamment de la masse de la balle et contre la résistance de l'air.

La première entrevue a aussi été une belle occasion de laisser apparaître une conception intéressante:

« ... comme je disais, si on prend deux balles, une balle plus légère et une plus lourde, sur le relief, la balle la plus lourde descendra plus vite... c'est comme le principe des petites voitures en carton... si tu mets un gros poids en avant de ton auto, elle descendra plus vite que la petite auto en carton qui est vide et qui a quelqu'un de moins lourd aussi dedans ».

Il est intéressant ici de noter que le sujet affecte cette conception à l'existence d'un plan incliné seulement. En effet, pour une chute libre, il avait affirmé, quelques lignes avant², que deux masses différentes devaient toucher le sol en même temps. Dans une ambiance détendue, il admet avoir « appris cela à la télévision ».

Les entrevues avec Marie(5) ont aussi permis de mettre en lumière une conception de l'effet de la masse sur le mouvement :

« Oui, parce que si c'est moins lourd, ça va aller... ben... avec la même force... quand c'est moins lourd, ça va plus vite... ».

² [EMMANUEL(4) S2E1: 801-810]

Cette conception est appuyée de l'exemple du carrosse.

« Si j'essaie de pousser mon père sur son carrosse ou un petit bébé, j'ai l'impression que ça va être plus facile de pousser le petit bébé »

Il est manifeste, à ce niveau de l'analyse, que les conceptions évoquées ou employées par les sujets ne le sont pas de façon égale. C'est-à-dire que certains sujets vont y recourir assez abondamment, mais il apparaît que la plupart du temps, ces conceptions sont inscrites en conflit avec les événements simulés par l'ordinateur. Dans certains cas, donc, ils ont permis quelque progrès, mais c'est surtout lorsque ces conceptions sont bien explicitées que ce progrès s'accomplit plus facilement. Dans d'autres cas, il apparaît que la verbalisation de ces conceptions a, au contraire, découragé les sujets d'avoir recours à des raisons physiques pour décrire les situations. Une dissonance cognitive trop grande entre les conceptions actuelles et les conceptions proposées peut donc malencontreusement paver la voie aux algorithmes mathématisés qui évacuent la raison physique. Dans les cas de Karl(1) et, plus clairement de Marco(2), la rupture est évidente. Pour le sujet de troisième secondaire, les conceptions ne sont pas clairement verbalisées. Il semble alors délicat de les étiqueter de conceptions. Pour les sujets plus âgés, Emmanuel(4) et Marie(5), l'emploi des conceptions est bien plus courant. Il est évident cependant, en raison des discordances entre ces conceptions et les situations, que celles-ci n'aient pas suffi pour réussir les défis. Elles ont cependant fourni un point de départ à la discussion, un « objet-pour-penser-avec » (comme les appelait Papert [1980]) et un support de réflexion intéressant. Il semble clair cependant que leur verbalisation est apparue comme une condition préalable à leur surpassement.

Une dernière conception semble avoir été manifestée par tous les sujets, qui, la plupart du temps, sans vraiment verbaliser le conflit que leurs essais ont dû susciter, n'en ont pas moins exprimé de la surprise lors de l'exploration. Il s'agit de la conception voulant que l'effet d'une force soit toujours dans le sens qu'elle a été appliquée, et, ce, indépendamment de son mouvement initial, ce qui constitue, il faut le dire, une incompatibilité avec la pensée newtonienne.

Ce sont effectivement tous les sujets (les vingt sujets) qui ont choisi, dans la situation 05, d'imprimer une direction de coup de 90 pour faire dévier la balle d'un même angle (voir le résultat en figure 7). Le plus étonnant de ce résultat est que la plupart des sujets avaient pourtant développé, dans la situation précédente, une certaine habitude de prendre en compte le momentum initial pour le calcul de la vitesse résultante. Malgré cela, tous sont « tombés dans le panneau » historiquement répertorié par nombre de didacticiens pour la direction de la balle. Il faut mentionner aussi, cependant, que tous les sujets se sont ravisés très rapidement, certains de manière explicite, d'autres, moins clairement, et d'autres, enfin, sans jamais pouvoir associer une explication autre que numérique à ce phénomène. Une chose reste cependant, nous insistons: tous les sujets ont manifesté cette conception.

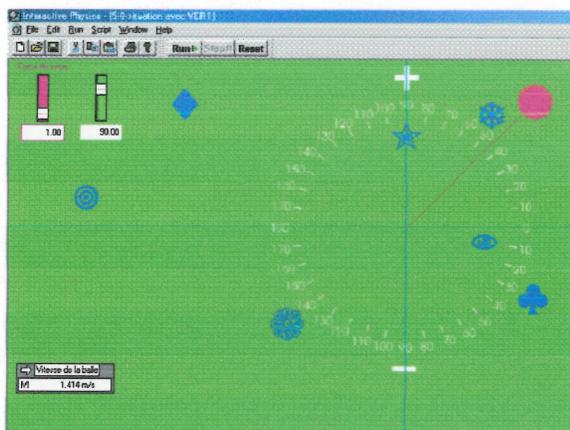


Figure 8) Un exemple de conception : la balle se déplace dans le sens où elle est frappée

Nous nous heurtons ici aux frontières de l'analyse conceptuelle. En effet, il apparaît hasardeux de pouvoir présumer que l'interprétation pourrait être plus fructueuse avec les conceptions qu'avec les coordinations. La tendance des sujets à ajuster promptement leurs modélisations subséquentes nous incite à questionner -pour l'occasion- l'hypothèse conceptuelle parce que celle-ci présente habituellement dans la littérature les conceptions comme étant pratiquement incassables. Or, cela n'a pas été confirmé par nos observations.

Il apparaît, à la lumière de l'analyse des conceptions, que celles-ci sont surtout évoquées par les sujets en des moments bien précis et ponctuels de leur

exploration. Elles constituent donc des balises intéressantes pour décrire l'état *actuel* d'une compréhension, un peu comme une photographie instantanée. Cependant, dès lors que la conception se met à se transformer, à évoluer, les conceptions ne sont plus évoquées par les sujets. Elles ne tiennent plus lieu d'« objet-pour-penser-avec ». Elles ne sont pas non plus des objets théoriques intéressants pour le chercheur, car elles ne tiennent pratiquement jamais le rôle de « modèle transitoire » dans les verbalisations. Parfois, elles reviennent à la fin d'un discours ou en un point bien précis, comme au début d'une entrevue (insérée dans une séquence d'explorations graduelles), mais pendant que le processus d'évolution conceptuelle est en marche, il semble que le cadre interprétatif « p-prims » autorise, au contraire des conceptions, une interprétation et une interpolation de la conduite des sujets entre deux conceptions.

Nous choisissons par conséquent de nous tourner vers l'analyse des coordinations qui ne sont pas basées sur des conceptions explicites, autant que sur des intuitions. La dernière conception mentionnée est d'ailleurs très semblable à la p-prim « force as a mover » dont il sera question un peu plus loin. Le passage à l'analyse de l'intuition et du « sens de la mécanique » en semble donc facilité. Cependant, avant de passer à l'analyse des p-prims, un résumé des analyses s'impose.

5.3.2 Résumé des analyses de la deuxième partie

Une première observation à propos des conceptions est que leur apparition dans les verbalisations ne semble pas occuper toute la place que lui accorde souvent la littérature sur le changement conceptuel. Il nous paraît fragile de considérer que les conceptions qui ont été évoquées par nos sujets constituent la base de la réflexion sur la logique des situations.

En effet, non seulement n'apparaissent-elles pas souvent, mais leur explicitation est difficile, hésitante. Elles semblent être construites sur-le-champ. De plus, elles sont clairement « jetables » et ne semblent guère posséder de statut plus important que celui d'hypothèses dans l'épistémologie personnelle des sujets. Il semble facile en effet non seulement de les rejeter en bloc (du point de vue des sujets) dès

qu'elles ne correspondent pas aux prédictions, mais aussi de les modifier très facilement, d'en garder certains morceaux et d'en rejeter d'autres, comme dans l'exemple d'Emmanuel(4) à propos de l'effet de l'air sur la balle de ping-pong.

Il semble donc que les conceptions ne soient pas les objets atomiques, monolithiques, inaltérables et indestructibles que certains textes de la littérature sur le changement conceptuel nous présentent si souvent.

Même si la connaissance des conceptions explicitées peut être, dans certains cas, fort instructive à propos de la compréhension des sujets, il semble que leur prise en compte comme unité de base de la compréhension paraît hasardeuse et que leur nature se rapproche davantage du phénotype que de l'explication fondamentale

Enfin, comme elles n'apparaissent pas dans les verbalisations des sujets pendant que des évolutions conceptuelles ont lieu, elles ne permettent pas de s'intéresser au changement conceptuel en tant que processus. Elles ne sont cependant pas à négliger comme outils de diagnostic afin d'évaluer un *état* actuel de compréhension plutôt qu'un *processus*.

Troisième partie :

5.4 Analyse des p-prims rencontrées lors de l'exploration des situations

Lorsque les explications des sujets sont qualitatives, elles semblent, le plus souvent, s'appuyer sur des p-prims. Ces dernières, lorsqu'elles apparaissent, restent le plus clair du temps implicites et assez généralement non verbalisées. Elles se distinguent d'ailleurs des conceptions en partie parce qu'elles sont inexplicitées. Elles répondent systématiquement, en effet, à des principes d'« évidence » et d'« impénétrabilité ». Les sujets parviendront néanmoins à les décrire en termes d'opérations effectuées, mais leur valeur, leur origine, leur justification ne font jamais objet de discussion. Certains sujets verbaliseront même que « c'est comme ça »³ ou que « ça paraît évident »⁴. Ils décriront leurs choix d'opérations en faisant souvent précéder l'emploi de p-prims du commentaire: « je me suis dit que... »⁵, sans véritablement développer davantage leur idée, comme si leur choix allait de soi. C'est donc principalement à travers l'aspect procédural des actions des sujets que se manifestent indirectement les p-prims.

Il arrive tout de même, cependant, que les sujets décrivent si bien leurs procédures qu'elles semblent apparaître presque explicitement dans le discours.

Nous avons identifié l'emploi de cinq (5) p-prims présentes dans les conduites des sujets. Nous les aborderons de la plus accidentelle (la plus rare) à la plus systématique. Les deux dernières seront présentées comme celles qui sont susceptibles d'interférer avec le principe canonique d'inertie.

5.4.1 P-prim « violence »

L'emploi de cette p-prim attribue des propriétés spéciales aux phénomènes violents, un peu comme s'il était soudain impossible d'interpréter ceux-ci avec les modèles qui décrivent habituellement les événements de même nature physique, mais de moindre intensité. Ainsi, par exemple, un coup de marteau (phénomène

³ [MAXIME(3) S1E1: 687]

⁴ [MAXIME(3) S1E1: 1431-1438]

violent) pourrait effectivement casser une planche de bois. Par contre, la chose semblerait impossible pour le cas où on appuierait plus doucement sur le même morceau de bois avec le même marteau. Pour le sujet souscrivant à la p-prim « violence », une telle « force » ne pourrait qu'induire une déformation dans la planche dont l'amplitude dépendrait de la force investie, alors que le coup de marteau, brutal, ne répondrait pas aux mêmes lois, puisque la planche se brise alors.

Nous n'avons pu observer l'emploi de cette p-prim qu'à une seule occasion. Cela s'est produit lorsque Karl(1), dans son exploration de la situation 05, choisit d'augmenter graduellement la force du coup en cherchant pourquoi la vitesse finale de la balle est plus faible quand la trajectoire obtenue est plus « haute », c'est-à-dire plus près du 90°. C'est alors qu'il décide de monter subitement la force au maximum (20) et s'aperçoit que, contrairement à ce qui se passe aux valeurs de force plus faibles, la trajectoire obtenue correspond alors exactement à la direction du coup⁶. Bien entendu, il n'y a pas ici d'équivalence. Il y a plutôt un rapprochement asymptotique, mais à l'œil, il est bien difficile de l'affirmer. Karl(1), décide plutôt du caractère particulier de cette force « maximale ». Bien que des vérifications de la véracité de cette observation eurent été particulièrement faciles, le sujet se refuse à toute précaution supplémentaire et décrète son principe : « quand la force du coup est au-dessus de la valeur six(6), la direction du coup correspond exactement à la trajectoire ». Il ne questionne pas davantage la valeur de cette « loi ».

On peut faire remarquer que Legendre (1995) avait remarqué quelque chose de semblable chez ses sujets alors qu'ils éprouvaient le besoin, pour réussir à augmenter la vitesse au delà de la vitesse initiale, de donner un « grand coup » . (p.493)

Pour expliquer l'apparition peu fréquente de cette p-prim, on peut avancer qu'il n'est pas évident ici que les autres sujets aient pu trouver pertinent de l'employer. En effet, le fait que les paramètres à modifier rencontrent des limites (inhérentes au

⁵ [MARCO(2) S2E1: 57; S3E2: 176-177; MAXIME(3) S3E3: 1151; EMMANUEL(4) S3E2: 149, 319; 1256; MARIE(5) S2E1: 239-243; S2E2: 84; S3E2: 394-400, 454; S3E3: 783-786; S4E5: 1096; S5E5: 450]

⁶ [S5E5: 152-188]

design des situations) ne placent pas clairement les sujets dans une situation de violence, ou d'intensité. La force ne peut être induite au-delà de la valeur 20, dans la plupart des cas et dans d'autres (comme la situation 02), son maximum est de 1,4. Il n'est donc pas étonnant, que les sujets n'aient pas eu très souvent recours à cette p-prim, puisque les extrêmes sont virtuellement absents de la situation. Pour conduire une étude plus systématique « violence », il eut probablement fallu enlever les limites des situations.

5.4.2 P-prim « symétrie »

Dans les circonstances les plus diverses, les sujets ont parfois une tendance toute spontanée à rechercher les symétries. L'axe de cette symétrie et les paramètres (ou les combinaisons de ces paramètres) qu'on cherche à prospecter comme étant réciproques peuvent être -à peu près- n'importe lesquels. Il est cependant plus courant de voir que l'axe et les paramètres sont généralement des objets bien concrets qui apparaissent à l'écran. Ainsi, on n'observe jamais une utilisation de la p-prim « symétrie » autour d'un axe imaginaire. Non plus que les paramètres qu'on s'attend à retrouver de chaque côté de cet axe ne soient abstraits. Les symétries recherchées sont souvent bien simples.

Dans les situations considérées, il n'existe que peu de symétrie en soi, si ce n'est celle qui ressort de la division haut/bas de l'écran. En effet, que l'on donne un coup dans les « positifs » ou dans les « négatifs », c'est-à-dire vers le haut ou le bas, les trajectoires vont toujours laisser apparaître des déviations égales, à l'exception près que le sens de cette déviation, qu'on peut lire sur le rapporteur d'angles, correspond au côté du coup donné.

Cette symétrie ne fait cependant pas souvent office d'objet de discours, sauf peut-être pour Emmanuel(4)⁷. Il est possible que, étant donné que les inscriptions sur le rapporteur d'angles (semblables en haut et en bas) décrivent la même chose en haut qu'en bas et peuvent donc suggérer cette idée de symétrie, les sujets y adhèrent plus facilement. Quoiqu'il en soit, plusieurs sujets ne vont s'intéresser

⁷ [EMMANUEL(4) S5E5: 161-175]

qu'aux valeurs positives et, généralement sans hésitation, employer les mêmes logiques pour la partie négative. On n'enregistre qu'une seule mention d'un sujet (Marco(2)) n'ayant pas supposé dès le départ l'existence d'une telle symétrie⁸.

Les symétries qui nous intéressent ici sont cependant d'un autre ordre. Elles concernent le plus souvent les autres conduites qui tendent à inscrire une similitude gauche-droite dans les explorations. Par exemple, le sujet de troisième secondaire, Maxime(3), dans la situation 04, décide spontanément de simplement changer la direction du coup (0 plutôt que 180) pour obtenir la même vitesse résultante à gauche qu'à droite⁹. Or, dans ce problème, la balle a une vitesse initiale non nulle, ce qui implique qu'il ne résulte pas une vitesse finale identique à ce qui s'est produit de l'autre côté. Cette symétrie fonctionnait bien pour les cas où la balle partait du repos (situation précédente), mais pour la situation 04, cela ne fonctionne pas. Devant la manifestation de cette différence à l'écran, la surprise du sujet¹⁰ est claire : la balle, malgré un coup à gauche, va encore à droite... À partir de ce moment, il abandonne l'idée de symétrie pour ce problème, mais le premier réflexe a manifestement été celui de rechercher une telle symétrie.

Le sujet ayant le plus souvent eu recours à la p-prim « symétrie » est sans conteste Marie(5). À un moment de l'exploration de la situation 03, le sujet semble quelque peu dépassé par la complexité des événements et propose alors une explication assez inattendue.

Jusque là et depuis plusieurs minutes, Marie(5) pouvait assez facilement passer d'une étoile à l'autre en changeant n'importe quelle variable. Les difficultés ont commencé quand le sujet tente de changer la masse pour faire passer la photo de l'étoile verte à l'étoile orange (rapport de distance non entier de 1,5). Or, elle ne parvient pas à saisir le sens mathématique de l'inverse de 1,5. C'est alors¹¹ qu'elle tente d'appliquer un principe de symétrie: ce qu'on avait réussi à gauche de l'étoile verte, on peut aussi le réussir à droite. Elle se met alors en projet de compter les distances (dont on examine les rapports entre elles) non pas à partir de l'origine

⁸ [MARCO(2) S5E6: 466-488]

⁹ [MAXIME(3) S4E5: 176-194]

¹⁰ [MAXIME(3) S4E5: 252]

(endroit où le coup est donné), mais à partir de l'étoile bleue, qui est, il faut le dire, aussi distante de l'étoile verte que l'origine, mais dans l'autre sens. Le sujet applique donc ici un principe de symétrie parfaite. Elle tente à d'autres reprises de le valider¹². Évidemment, ce principe ne fonctionne pas puisqu'il ne respecte pas la réalité physique de la situation. En effet, le coup n'est jamais donné à la balle à partir de l'étoile bleue, mais toujours à partir de l'origine.

Dans une autre situation (04), où il est question, à un moment donné, de vérifier si le modèle qu'on avait développé à gauche fonctionne aussi à droite, le sujet applique encore une fois le principe de symétrie. Jusque là, Marie(5) avait bien vu, dans le cadre du modèle « effet du coup +1-1 » que l'effet du coup devait être compris comme le quotient de la force sur la masse. Cependant, pour vérifier le fonctionnement du modèle dans l'autre sens (direction du coup = 0), le sujet choisit plutôt, puisqu'on est « de l'autre côté », de diviser la masse par la force! Cette réaction est particulièrement étonnante venant d'un sujet ayant développé un modèle si efficace. Quand l'intervieweur lui demandera:

« Qu'est-ce qui t'a porté à faire l'opération inverse?.. de prendre la masse puis de la diviser par la force... il y a sûrement quelque chose en particulier puisque tu l'as fait... »

Marie(5) répondra: « l'instinct! »

I : l'instinct?... comment ça?

Marie(5) : Ben, vu que j'avais fait ça<force> par ça<masse>, je me suis dit: peut-être l'autre bord <vers la droite> ça va être ça<masse> par ça<force>... »¹³.

Il est tout de même intéressant de noter que Marie(5) fait habituellement référence à cette p-prim principalement lors des épisodes où la logique semble lui échapper. Durant les épisodes où sa maîtrise est plus grande, elle n'y a jamais recours.

L'emploi de la p-prim « symétrie » ne semble pas aussi généralisé à tous les sujets que d'autres p-prim. Cependant, il est intéressant de voir que plusieurs d'entre eux vont la tester, principalement en début d'exploration et dans les moments de détresse. Dans la plupart des cas, elle a été abandonnée rapidement. Cependant, il est raisonnable de penser qu'elle a été appliquée à d'autres aspects sans être

¹¹ [MARIE(5) S3E3: 566-583]

¹² [MARIE(5) S3E3: 492-503, 524-546]

¹³ [MARIE(5) S4E5: 1082-1097]

verbalisée. En effet, quand un principe est employé avec succès, il n'est pas évident qu'il occupe une place importante dans la prise de conscience et dans les verbalisations. C'est surtout quand il y a discordance entre les prédictions et les résultats que se manifesteront explicitement les p-prim.

5.4.3 P-prim « canceling »

L'idée que certaines influences puissent en faire littéralement disparaître d'autres est une p-prim très courante en mécanique. Que son emploi relève d'une réalité physique canonique ou non, il est frappant à quel point elle fût présente dans les verbalisations de nos sujets. Tous les sujets ont laissé des indices de sa présence à un moment ou à un autre des entrevues. Elle fût également le point de départ de nombreuses modélisations. En effet, le nœud de la stratégie « équilibre + écart » consiste d'abord en une « neutralisation », une « extinction » ou une « annulation ». C'est autour de cette considération, alors centrale, que le reste du modèle a pu s'échafauder. L'idée de « neutralisation » avait également été évoquée par les sujets de Legendre (1993, p.245)

Il est nécessaire à ce niveau de la distinguer de la p-prim « équilibre » dont les paramètres vont généralement pouvoir être associés à une situation statique. Dans cette dernière p-prim, les variables d'une situation vont avoir une tendance naturelle à ramener un système vers un point d'équilibre, qui correspond généralement à l'immobilité ou à un autre état concret et tangible. La p-prim qui nous intéresse ici est plus facilement associée, du moins au départ, à du mouvement. Ce mouvement finit par être « annulé » par l'action de deux influences opposées. C'est donc une influence initiale qui va pouvoir être compensée. À une exception près, on ne voit alors la p-prim apparaître qu'à partir de la situation 04, où une influence initiale (le momentum de la balle) se manifeste pour la première fois.

Le sujet de première secondaire, par exemple, en a fait effectivement mention dans la quatrième entrevue. Après quelques tâtonnements, il découvre qu'il

« faut que la masse de la balle et la force du coup soient égales pour que ça s'arrête au milieu »

Ces remarques n'ont cependant pas pavé la voie à des modélisations plus efficaces ou explicites. Elles sont restées au niveau des indications intéressantes. Il faut plutôt s'intéresser au travail de Marco(2) pour voir à quel point ces considérations ont ouvert la voie à une construction de modèles intéressants. En effet, c'est à partir de l'emploi de cette p-prim que le sujet construit alors le modèle « équilibre + écart ».

Dès le début de l'exploration de la situation 04, quand on s'intéresse à ce qui se passe lorsque la masse de la balle est fixée à 1, il se met à clarifier ses idées à partir de et en fonction de la position immobile de la balle, c'est-à-dire à partir de la combinaison de valeurs qui vont induire un coup tel que la balle s'immobilise (ex : force 1, direction 180)¹⁴. Ainsi, quand on fait varier la masse de la balle, le sujet échafaude ses idées sur sa découverte que la masse et la force doivent être égales pour obtenir l'immobilisation. Son système semble alors assez bien fonctionner¹⁵, du moins, qualitativement (ralentir ou accélérer, rebondir ou continuer). Ce n'est que plus tard que ces découvertes lui permettront de produire un modèle efficace pour évaluer les vitesses finales (le modèle « équilibre + écart »). Dans une conclusion, il insiste encore sur l'importance conceptuelle de cette immobilisation¹⁶.

Maxime(3), quant à lui, est le seul à employer la p-prim dans un contexte différent. Pour ce sujet, l'idée de devoir annuler une influence par une autre s'applique aux changements de variables qu'il impose lui-même à la situation 02. Ainsi, quand il induit un changement à une variable, il cherche à expliquer ce qui pourrait bien « annuler ce changement ». Dans la seconde entrevue, il dira :

« Bien, je pense que plus la masse est élevée et que plus qu'elle est lourde et qu'on veut... ça va demander une plus grande force de coup que si on voulait... bien si on voulait l'envoyer à la même vitesse que si elle était moins lourde »

Un peu plus tard, dans la situation suivante, il verbalise que, plus la masse est élevée, plus il faut une grande force pour compenser. Cette réflexion lui permet plus tard de comprendre que cette « grande force pour compenser » ne doit pas

¹⁴ [S4E4: 593-595, 644-645]

¹⁵ [MARCO(2) S4E4: 1381-1395]

¹⁶ [MARCO(2) S4E4: 1651-1667]

varier par une addition, mais plutôt en multipliant¹⁷. La p-prim, ici, sans servir de point de départ d'une modélisation systématique, a néanmoins servi de support de réflexion. Plus tard, Maxime(3) fait aussi mention de l'importance d'« annuler le mouvement initial » dans la situation 04¹⁸, mais ces observations se font « au passage » et ne constituent pas le point de départ d'une modélisation plus explicite.

C'est tout de même Emmanuel(4) qui verbalise le mieux la nature de cette annulation:

« C'est comme le feu contre le feu ou quelque chose dans ce genre... ok, peut-être physiquement, oui... dans une balle, une force de 10kg, moi, quand je vais la recevoir à 10kg, je vais donner un coup de 10kg aussi... la balle s'arrêtera... les deux choses vont s'arrêter et ça va être neutralisé... la balle arrive à 10kg et le coup que je donne dessus est de 10kg, alors elle s'arrête automatiquement sans rebondir ».

Il exprime aussi cette idée que les kilogrammes doivent s'annuler dans les entrevues suivantes¹⁹. C'est d'ailleurs probablement cette tendance à évaluer les antagonistes qui est à l'origine de l'élaboration d'une idée mécaniquement très intéressante : celle du « boost » ou de l'« effet du coup », duquel il faut d'ailleurs retrancher ou ajouter le momentum initial, donc, qu'il faut évaluer et qu'on peut employer dans le modèle « effet du coup +1-1 ». Il est intéressant de voir ici que, bien que la même p-prim soit mentionnée par plusieurs sujets, elle ne soit pas à l'origine du même itinéraire de modélisation.

Le sujet de cinquième secondaire, Marie(5), quant à elle, a aussi fait mention de cette p-prim de façon remarquable. Premièrement, dès le début de la quatrième entrevue, elle fait une réflexion qui met en scène ce qu'elle appelle plus tard la « force équilibrante » : Marie(5) parle alors d'annulation quand elle cherche à décrire l'immobilisation de la balle²⁰. Cependant, elle n'en fait plus mention pour tout le reste de l'entrevue puisqu'elle développe un modèle efficace qui n'est pas basé sur cette constatation, mais plutôt sur une idée semblable à celle de Emmanuel(4) d'« effet du coup » (Marie(5) utilise l'expression « ajout ») où la masse de la balle constitue la résistance contre laquelle on doit lutter (on en tient compte en opérant F/m).

¹⁷ [MAXIME(3) S3E3 1151-1164]

¹⁸ [MAXIME(3) S4E5: 1100-1122, 1550-1559]

¹⁹ [EMMANUEL(4) S4E4: 149]

Cependant, elle réutilise l'idée de la force équilibrante dès le début de l'entrevue suivante. Incapable alors de se rappeler du modèle qu'elle avait précédemment développé, elle tente d'en reconstruire un nouveau et met alors la « force équilibrante » au centre de son propos. Elle explique qu'on doit d'abord équilibrer la force qui a été donnée à la balle initialement, pour ensuite effectuer des ajustements. La masse de la balle n'est même plus le facteur contre lequel on doit compenser pour arrêter la balle; c'est plutôt le coup initial²¹ qui l'est. Un peu plus tard, insatisfaite de l'efficacité de son modèle, elle revient à son idée d' « effet du coup », mais pendant plus d'une heure, ses raisonnements efficaces auront dérivé sous l'influence manifeste de la p-prim « canceling ».

À la lumière des épisodes d'entrevue décrits précédemment, on peut suggérer que la p-prim « canceling », qui concerne ici l'annulation du mouvement, constitue, du moins du point de vue de nombreux sujets, une balise épistémologique des plus intéressantes. C'est-à-dire que la tendance à axer leurs raisonnements et leurs modélisations sur cette p-prim et à en faire le point de départ chronologique et logique de leur compréhension est généralisée à tous les sujets. On consacre en général beaucoup de temps et d'énergie à développer des raisonnements qualitatifs sur la base de cette balise et, quand la confusion s'installe, on y revient.

Que les modèles qui en découlent soient très efficaces, qu'ils le soient un peu moins, ou même qu'ils entraînent les sujets à la dérive, la p-prim « canceling » est un appui qui revient constamment.

La compréhension des principes canoniques de mécanique est souvent bien éloignée des intuitions qui guident l'action et imprègne les échanges verbaux communs. Bien que l'inertie soit un des principes contre lequel le « bon sens » s'inscrit, il ne suffit pas d'en marquer et d'en reconnaître la difficulté pour dès lors pouvoir l'aborder utilement. Une analyse plus avancée des itinéraires exploratoires permet de comprendre la nature des tendances de l'intuition à adhérer à des parcours alternatifs. On peut alors identifier la signature de deux p-prim principales

²⁰ [MARIE(5) S4E4: 705-816]

dont l'influence ne semble pas sans conséquence sur la compréhension de l'inertie. Ce sont la p-prim « force as a mover » et la p-prim « d'Ohm ».

5.4.4 P-prim « force as a mover »

Cette p-prim, plus spécifique que les premières à cause des circonstances plus particulières dans lesquelles elle s'applique, s'adresse exclusivement et directement à la mécanique des phénomènes. Elle concerne la force et ses effets. Bien loin d'indiquer, comme son antagoniste newtonien, qu'une force implique une accélération, la p-prim « force as a mover » suppose qu'une force (direction X, intensité Y) va toujours impliquer un mouvement, c'est-à-dire un déplacement à vitesse constante (plutôt qu'une accélération), proportionnel à son intensité (pour une intensité de force Y, une vitesse proportionnelle Y_1) dans le sens même de l'application de la force (direction Y \rightarrow trajectoire Y), et ce, peu importe le mouvement initial de la balle. La p-prim pouvait, jusqu'à la situation 03, être impliquée efficacement, et donc subtilement, dans la compréhension des situations. C'est lors de l'introduction d'un mouvement initial (situation 04 et 05) que la p-prim, alors en conflit, se manifeste explicitement. Ces manifestations ont été nombreuses.

D'abord, sur la direction, nous observons, comme Legendre (1993, p.152 & 187) qu'il est fréquent de voir les sujets donner des indices de leur adhésion à l'idée que la trajectoire de la balle doit nécessairement correspondre à la *direction du coup*. Nous avons déjà mentionné, par exemple, que tous les sujets avaient tenté sans succès la *direction du coup* 90 pour atteindre, dans la situation 05, une cible (l'étoile) se trouvant au bout de cette direction. Ces sujets, qui ont alors mis en œuvre des intuitions qui, manifestement, n'intègrent pas le mouvement de la balle, avaient pourtant, pour la plupart, développé des modèles assez efficaces dans la situation 04. Or, on s'en souvient, cette dernière impliquait une balle dont le mouvement initial n'était pas nul. Même si la plupart des sujets ont découvert des moyens de tenir compte de la vitesse initiale de la balle sur une trajectoire rectiligne

²¹ [MARIE(5) S4E5: 103-111]

pour trouver la vitesse finale, ils se sont tous engagés dans une toute autre voie pour la trajectoire.

Certains sujets n'ont jamais pu aller au-delà du simple constat que la direction du coup et la trajectoire ne s'équivalent pas.

« ça ne va pas nécessairement être 90, j'ai marqué 90, mais ça ne veut pas dire que ça va donner ça »²²

Cependant, d'autres, qui ont aussi réagi de cette façon, ont mieux géré la difficulté et en ont profité pour amorcer une réflexion qui tient compte du momentum initial:

« Oh... ce qui est arrivé, c'est que la balle - je n'y avais pas pensé -, quand elle arrive, elle s'en va vers la droite... même si tu lui donnes un coup de palette dans la direction 90... mais, si on envoie une balle vers la droite et que tu donnes un coup dans la direction 90, elle ne s'en ira pas dans la direction 90 comme cela <Le sujet suit la ligne horizontale vers la droite, puis, rendu au milieu, se déplace vers l'étoile en suivant la ligne du 90>... elle va dévier de sa trajectoire, c'est tout »²³.

D'autres indices laissent croire que certains sujets adhèrent à « force as a mover » d'une façon plus puissante encore. En effet, Marco(2), étonnamment, semble suggérer que si la balle ne change pas de trajectoire dans la même direction que la *direction du coup* (même si celle-ci ralentit, s'immobilise ou dévie), c'est donc qu'elle ne subit pas de coup²⁴. Dans ce cas, non seulement faut-il qu'une force se traduise obligatoirement en un mouvement dans la direction imprimée sur un objet, comme l'avaient déjà remarqué Finegold & Gorsky (1991) mais on peut aussi aller jusqu'à affirmer que si le résultat ne correspond pas à la déviation attendue, alors, l'influence inscrite dans l'ordinateur n'a simplement pas existé. Ainsi, le sujet semble si enclin à adhérer à « force as a mover », qu'il semble incapable de reconnaître quelque résultat contre-intuitif que ce soit; il nie alors l'existence même de l'influence du coup.

On observe aussi la surprise des sujets en de nombreuses occasions quand leurs prédictions basées sur « force as a mover » s'avèrent incorrectes. Par exemple, Karl(1) s'étonne clairement de voir que la balle puisse poursuivre sa course alors

²² [MAXIME(3) S5E5:136-137]

²³ [EMMANUEL(4) S5E4: 134-141]

²⁴ [MARCO(2) S4E4: 1661-1669]

que la direction du coup est fixée à 180²⁵. Le sujet de troisième secondaire s'en étonne aussi²⁶ dans des circonstances très similaires. Dans son cas, cela va à l'encontre de prédictions très explicites. Ses réflexions suivantes ne semblent pourtant en rien intégrer le momentum initial de la balle. Il exprime à nouveau sa surprise plus tard :

« Pourquoi que quand c'est marqué 180, elle continue? Pourquoi elle continue là? J'ai aucune idée »²⁷.

Et même au-delà d'une séance très étendue d'explorations de cet effet, il admettra:

« Ça, je trouve ça bizarre... je ne sais pas si c'est comme... s'il y a un lien... parce que j'étais sûr que quand tu marquais 180, elle allait vraiment vers la gauche »²⁸.

En faisant référence à la réalité des phénomènes du quotidien, il affirme même que, si la balle va à droite (dans un cas précis), c'est nécessairement qu'un coup est donné vers la droite²⁹.

Toutes sortes d'explications peuvent être inventées par les sujets pour tenter d'expliquer pourquoi la direction du coup ne correspond pas toujours à la trajectoire. Évidemment, ces explications, qui ne font pas intervenir le momentum initial, vont nécessairement être des erreurs, mais elles sont intéressantes en ce qu'elles permettent d'illustrer la résistance des sujets à « faire coller » l'intuition à l'expérience. Maxime(3) suggérera, par exemple, que c'est peut-être parce que le coup n'est pas donné depuis le centre, mais depuis la fleur (une autre cible située à gauche) : « c'était juste décalé »³⁰, dira-t-il. Il tente aussi d'explicitier les raisons de son malaise; pour lui, quand la balle rebondit, c'est qu'elle s'est nécessairement arrêtée, et qu'elle marque alors un temps d'arrêt très court avant de repartir :

« Puis avec 0, elle allait vers la droite... euh... parce que dans le fond... si quand elle vient par la gauche et qu'elle repart vers la gauche, elle arrête un moment à 0,00, mais pas longtemps... comme, elle arrête puis elle repart... c'est pour ça que quand elle repart à 0,00... vu qu'il y a un coup qui est donné, quand il n'y en a pas, elle continue, donc elle reste à 1... quand un coup est donné, elle tombe à 0,00 et elle augmente tout de suite... vu qu'il y a un coup... »³¹

²⁵ [KARL(1) S4E4: 251-257]

²⁶ [MAXIME(3) S4E5: 184-190]

²⁷ [MAXIME(3) S4E5: 255-256]

²⁸ [MAXIME(3) S4E5: 1474-1476]

²⁹ [MAXIME(3) S4E5: 1497-1514]

³⁰ [MAXIME(3) S5E5: 326-335]

³¹ [MAXIME(3) S4E5: 1480-1487]

Pour lui, c'est la raison pour laquelle il est étonnant qu'un coup à gauche puisse donner une trajectoire à droite. Sa perception du coup ne reconnaît pas le concours du momentum à un point tel qu'il est contraint d'imaginer une immobilisation de la balle pour rendre compte de l'effet du coup.

Quant à Marie(5), le sujet de cinquième secondaire, dont les analyses avancées ne semblent d'aucun secours pour résoudre ce problème, elle va même jusqu'à douter que le coup se donne véritablement dans la direction demandée³², en d'autres termes, que le logiciel « triche ».

La p-prim « force as a mover » inclut également l'idée que la vitesse résultante doit être proportionnelle à la force qui a été imprimée à l'objet. À propos de l'emploi de cette p-prim, de nombreuses observations ont été enregistrées.

Par exemple, dans plusieurs cas, les sujets ont adhéré à l'idée qu'une balle ne puisse pas ralentir à la suite d'un coup. L'idée de la force comme inhibiteur de mouvement plutôt que comme générateur ne semble pas passer facilement. C'est le cas notamment de Karl(1), qui, dès la quatrième entrevue, éprouve une certaine consternation quant au fait que la balle ralentisse quand on lui donne un coup (faible) à 180 degrés³³. C'est également le cas de Marco(2) qui ne parvient pas à s'expliquer ce même phénomène³⁴. Il explicite clairement qu'un coup ne peut pas ralentir une balle. Quand l'intervieweur lui demande: « Si on voulait, par exemple, arrêter une balle de rouler, il faudrait lui donner un coup? »³⁵, Marco(2) répondra: « Non, il faudrait l'arrêter ». Pour lui donc, arrêter une balle n'est pas une opération qui a le même statut physique que l'accélérer. Il ajoute alors : « Lorsqu'on lance une balle ou un ballon et que l'on frappe du côté qu'il arrive, ce n'est pas la même chose que si on le frappait du côté qu'il va »³⁶, indiquant que, pour lui, il y a une différence fondamentale entre les deux opérations. Pour appuyer ses réflexions, il

³² [MARIE(5) S5E6: 888-908]

³³ [KARL(1) S4E4: 302-317]

³⁴ [MARCO(2) S4E5: 446-455]

³⁵ [MARCO(2) S4E5: 991-994]

³⁶ [MARCO(2) S4E5: 1001-1003]

fait une analogie avec le billard où une boule qui en frappe une autre ne pourra jamais la ralentir ou la faire reculer³⁷.

On peut observer aussi cette réticence chez Maxime(3) qui indique que pour ralentir une balle, il faudrait donner un coup « dans les négatifs »³⁸ jusque là tout semble physiquement correct, mais il propose juste après que...

« c'est plus un concept que d'autre chose...ça voudrait dire que tu rattrapes la balle à la place de la lancer... il me semble que ça ne se fait pas »³⁹

Il admet aussi que ralentir la balle à l'aide d'un coup est impossible⁴⁰. Le sujet s'oppose encore à cette idée à d'autres occasions en indiquant que pour réussir à le faire, il faudrait « changer le programme »⁴¹. Quand finalement il remarque que ralentir la balle est possible, il déclare: « Ça, je trouve ça bizarre »⁴². Il s'étonne aussi lorsqu'il constate que la balle peut avoir une vitesse finale plus grande que lors d'un essai précédent lorsqu'on lui donne un coup de moindre intensité⁴³.

Les sujets les plus âgés, bien qu'ils s'en étonnent eux aussi, tenteront tous les deux d'expliquer le ralentissement comme le résultat d'un « coup de vent ». Emmanuel(4), par exemple, affirme:

« C'est étrange à expliquer, mais c'est comme cela que ça se passe dans cette situation... admettons qu'il y aurait du vent qui pousse vers (la gauche) et cela ralentit la balle, parce qu'elle tombe (se réduit)... »⁴⁴

Il est fort intéressant de noter ici que dans tous les cas, les sujets ont manifesté une certaine surprise et/ou une réticence à considérer le ralentissement de la balle, bien que les plus vieux vont alors se défaire plus facilement de l'adhésion à la p-prim telle qu'elle apparaît au début des explorations.

Un réflexe fort intéressant dans le cadre de cette problématique semble pouvoir nous signaler la présence de la p-prim « force as a mover ». Celui-ci s'inscrit dans

³⁷ [MARCO(2) S5E6: 650-659]

³⁸ [MAXIME(3) S4E5: 541-542]

³⁹ [MAXIME(3) S4E5: 554-560]

⁴⁰ [MAXIME(3) S4E5: 561-609]

⁴¹ [MAXIME(3) S4E5: 1336-1344]

⁴² [MAXIME(3) S4E5: 1474-1476]

⁴³ [MAXIME(3) S4E4: 130-135]

⁴⁴ [EMMANUEL(4) S4E3: 360-363]

le prolongement de l'idée qu'une force doit produire un mouvement. Deux de nos sujets ont donc exprimé l'idée que, pour immobiliser la balle, c'est-à-dire faire passer sa vitesse de 1 à 0, il suffisait simplement de... lui donner un coup de force nulle! Le sujet de première secondaire, Karl(1), a tenté, par exemple, de réussir l'immobilisation de la balle de cette façon⁴⁵ par un coup nul dans le sens de la trajectoire initiale. Il lui faut de nombreux essais pour se convaincre que cette éventualité est impossible. Dans cette même ligne de pensée, le sujet de deuxième secondaire, Marco(2), verbalise l'idée fort intéressante que la balle, vu qu'elle s'arrête au centre en une occasion, n'a pas reçu de coup...⁴⁶. Il fait aussi un peu plus tard la même tentative que Karl(1) (décrite plus haut⁴⁷). Le sujet de troisième secondaire, Maxime(3), semble aussi, du moins au début des explorations, adhérer à cette idée: « Ok, je vais essayer une force de zéro, mais d'après moi, ce n'est pas sensé repartir (c'est-à-dire ici continuer) »⁴⁸. Cela réussit cependant. Il est fort intéressant de noter ici que de tels résultats avaient déjà été observés pas Legendre (1993, p.151).

Faire rebondir la balle rapidement d'un côté comme de l'autre ne laisse jamais les sujets perplexes. C'est au moment d'évaluer et de prédire cette vitesse que les difficultés s'accumulent. En effet, quand la balle part du repos, la relation entre la force du coup est une relation proportionnelle de type $y=mx$ (où y est la vitesse et m la force). Cependant, quand la balle a une vitesse initiale non nulle (de 1, par exemple, comme c'est le cas dans les situations 04 et 05), la relation est plutôt de type $y=mx+1$. Or, nos sujets, qui adhèrent facilement à « force as a mover » appréhenderont la situation 04, on l'aura compris, comme une relation de type $y=mx$, c'est-à-dire qu'ils n'admettront pas l'idée de l'inertie (du +1) dans leur compréhension des problèmes. Bref, ils chercheront à traiter la situation 04 comme la situation 03, ce qui laisse encore une fois sur l'impression que l'inertie ne peut être intégrée facilement. De nombreuses observations nous laissent alors reconnaître la présence de la p-prim.

⁴⁵ [KARL(1) S4E4: 493-525]

⁴⁶ [MARCO(2) S4E4: 19-31]

⁴⁷ [MARCO(2) S4E4: 878-882]

⁴⁸ [MAXIME(3) S4E5: 1247-1248]

Par exemple, les sujets vont très souvent chercher, comme ils l'avaient fait efficacement dans la situation 03, à simplement diviser la force du coup en 2, en 3 ou en 4 pour réduire la vitesse jusqu'à sa moitié, son tiers, son quart, respectivement. Si Marco(2) et Maxime(3) ont clairement manifesté cette adhésion et que celle-ci fût omniprésente durant toutes les entrevues de tous les sujets, on peut observer que les sujets les plus âgés furent ceux qui abandonnèrent le plus facilement cette logique. Ceux-ci, constatant l'inefficacité de l'idée, ont rapidement cherché autre chose.

Il faut cependant mentionner que les conflits et surprises issus de l'exploration des situations ont permis à plusieurs sujets de développer une certaine conception de l'inertie. Étant donné que les intuitions conformes à la p-prim « force as a mover » ont constamment été remises en question étant donné leur continuelle et manifeste contradiction avec les événements observés à l'écran, cela a forcé quelques sujets à imaginer des moyens de tenir compte du momentum initial de la balle.

Il faut ici constater que, peu importe que ce soit « contre » ou « à partir de », les sujets, dans tous les cas où des modèles ont été élaborés (situations 04 et 05) ont eu à négocier cette idée qu'une force conduit toujours à un mouvement proportionnel à son intensité dans la direction où elle a été imprimée.

5.4.5 P-prim d'Ohm

Étant donnée la nature du micromonde employé, il n'est pas étonnant de voir les sujets faire intervenir la p-prim d'Ohm dans leurs explications. En effet, celle-ci, qui implique une relation proportionnelle entre l'AGENT et le RÉSULTAT ainsi qu'une relation inverse entre la RÉSISTANCE et le RÉSULTAT, peut être employée pour interpréter les relations entre la FORCE DU COUP et la VITESSE FINALE et entre la MASSE et la VITESSE FINALE, respectivement. Bien que les sujets aient la plupart du temps spontanément associé AGENT à FORCE DU COUP, RÉSISTANCE à MASSE et RÉSULTAT à VITESSE FINALE (ou DISTANCE, quand on prend une photo), il y a quelques cas où des associations alternatives ont été proposées. Par exemple, c'est le cas de Karl(1), qui propose dès le départ

qu'une masse plus grande va permettre à la balle d'aller plus vite⁴⁹, ou d'Emmanuel(4), qui finit par admettre qu'il a

« augmenté la masse et la balle est allée moins vite, au lieu de ce que j'avais dit: c'est comme une balle en caoutchouc, si elle est plus lourde, elle va rebondir plus rapidement... vous savez, comme une super balle »⁵⁰

À l'image de ce commentaire, les sujets dont l'association des variables de la situation aux composantes de la p-prim d'Ohm n'a pas été, dès le départ, source de prédictions efficaces, ont rapidement adapté leurs réflexions et effectué les associations décrites plus haut.

Il ne sera donc pas question ici de discuter de l'adhésion ou de la non adhésion à la p-prim d'Ohm par les sujets; celle-ci est en effet omniprésente tout au long des explorations (on ne compte pas moins de 239 segments d'entrevues codés pour l'emploi possible de cette p-prim). Il sera davantage question de comprendre la nature de la relation proportionnelle entre l'AGENT (la force du coup) et le RÉSULTAT (la vitesse finale) dans un premier temps et, dans un deuxième temps, de la relation inverse entre la RÉSTISTANCE (la masse) et le même RÉSULTAT. On verra que ces relations, spontanément établies par les sujets, n'ont pas nécessairement la même essence que celle qu'un professeur pourrait espérer voir émerger en se bornant à les enseigner.

5.4.5.1 La raison proportionnelle entre l'AGENT et le RÉSULTAT

Pour tous les sujets considérés, l'exploration de cette relation a mené vers la compréhension d'une relation multiplicative. C'est-à-dire que les sujets ont tous fini par comprendre qu'il était possible d'obtenir des prédictions efficaces en ce qui concerne la vitesse finale de la balle par le produit de la force du coup et d'une valeur constante. Cependant, malgré l'apparente évidence d'application de cette relation aux situations proposées, ce ne sont pas tous les sujets qui ont abordé la relation entre la force du coup et la vitesse (ou, parfois, la distance parcourue jusqu'à la photo) avec cette idée.

⁴⁹ [KARL(1) S2E2: 113]

⁵⁰ [EMMANUEL(4) S4E3: 865-868]

À l'image de la proposition « plus on augmente X, plus Y augmente », qui semble intégrer, avec l'emploi du mot « plus », l'idée de la somme plutôt que celle du produit, certains sujets, les plus jeunes, ont d'abord cherché à inscrire cette relation dans une logique additive. C'est le cas, par exemple, de Marco(2), qui propose, dès les premières entrevues, « d'augmenter la *force du coup* de 1 pour obtenir une augmentation de force de 1 »⁵¹. Il se rend rapidement compte, cependant, que cela ne fonctionne que pour le cas particulier où la force du coup passe de 1 à 2. Pour les autres cas, comme pour celui où une augmentation supplémentaire de 0,5 ne correspond pas toujours à une augmentation de 0,5 de la photo, il doit faire le constat de l'inefficacité de la méthode et il opte progressivement pour la logique multiplicative. Il est tout de même intéressant de voir que le premier réflexe interprétatif de Marco(2) ne fut pas la logique proportionnelle.

Il se rabat alors sur un modèle assez efficace bien que local : il établit des correspondances numériques entre les positions décimales respectives de l'AGENT et du RÉSULTAT. Ainsi, par exemple, à une variation de force de 4 correspond une variation de vitesse de 2, à une variation de force de 0,2 correspond un changement de vitesse de 0,1, etc. Cette technique s'avère efficace bien que lourde, mais le problème principal vient du fait qu'elle exige une recherche de nouvelles correspondances sitôt qu'on change la masse. Marco(2) se construit ainsi de véritables tableaux de valeurs, mais sans véritablement procéder à leur unification. Ce n'est qu'un peu plus tard qu'il ressent le besoin de multiplier quand l'intervieweur lui propose le défi de « doubler la vitesse ». Il semble alors graduellement ajuster son idée de la raison proportionnelle sur l'idée de la multiplication et y adhère de plus en plus jusqu'à en venir à employer des relations fort intéressantes comme « les 3 quarts de la vitesse donnent la force », etc.

Le sujet de troisième secondaire, Maxime(3), utilise spontanément une technique en quelques points semblable à celle de Marco(2). Il insistera, par exemple, sur le découpage des valeurs de vitesse à obtenir en ses unités, dixièmes, centièmes, etc. Pour lui, chaque problème devient autant de problèmes qu'il y a de décimales dans la vitesse recherchée. Il indiquera, par exemple, « je multipliais cette vitesse-

⁵¹ [MARCO(2) S1E1: 103-119]

là par deux pour que ça donne le nombre d'unités qu'il fallait que je mette à la force du coup »⁵², et n'aborde la question des décimales que par la suite. Il insiste également sur une certaine conception additive de la relation. Pour Maxime(3), à masse fixe: « ça marche par bonds de 0,25 »⁵³. Il insiste là-dessus à de nombreuses reprises, et, tout comme Marco(2), il doit trouver la nouvelle correspondance pour chaque valeur de masse. Il n'emploie véritablement la multiplication que pour les cas simples où il faut « diviser la vitesse par deux », par exemple. Il est intéressant de voir que ce sujet alterne constamment entre la logique additive et la logique multiplicative de la relation entre l'AGENT et le RÉSULTAT, sans aucun scrupule apparent.

Quant aux sujets les plus âgés, ils semblent avoir établi dès le départ la nature multiplicative de la relation. Les deux sujets considérés ont même proposé cette correspondance avant même qu'il leur ait été demandé de produire des évaluations. Malgré que ces sujets emploient fréquemment la formulation commune pour décrire les relations proportionnelles: « Si elle est *plus* lourde, elle va rebondir *plus* rapidement », ils ne semblent pas pour autant souscrire à l'idée additive de la relation. Pour ces sujets, il ne fait aucun doute que les proportions et non l'addition sont au cœur de leur compréhension de la relation entre l'AGENT et le RÉSULTAT. Ces sujets n'éprouvent d'ailleurs aucune difficulté quand vient le temps de changer de masse.

Il est fort intéressant de voir, en conclusion, que les sujets, en contexte inductif, ne vont pas nécessairement associer un AGENT et son RÉSULTAT par un lien multiplicatif. Il est en effet commun pour les plus jeunes, de ne pas la faire intervenir spontanément et d'impliquer plutôt des processus additifs ou associatifs (ex: variation de coup de 1 donne variation de vitesse de 3) dans leur compréhension de cette relation. Il est tout de même intéressant de voir qu'ils finissent assez rapidement par adhérer à une raison proportionnelle assez orthodoxe, étant donné les échecs et les inefficacités qui se manifestent rapidement par l'exploration inductive du logiciel. Il semble que malgré tout, le

⁵² [MAXIME(3) S1E1: 1517-1518]

⁵³ [MAXIME(3) S3E3: 658, 959-964]

professeur de première et de deuxième secondaire peuvent s'attendre à un emploi de la logique additive pour l'abord des problèmes de proportions.

5.4.5.2 La raison inversement proportionnelle entre la RÉSISTANCE et le RÉSULTAT

La relation établie entre la MASSE et la VITESSE finale est celle qui, de loin, a causé le plus de problèmes à tous nos sujets. Celle-ci, comprise comme une raison inverse, c'est-à-dire de la forme $1/x$, a été abordée par les sujets lors de l'exploration de la situation 02, où on découvre l'influence de la masse. C'est cependant dans l'exploration de la situation 03, où les distances doivent être évaluées, que la plupart des anomalies se sont manifestées explicitement. La logique avec laquelle les sujets ont généralement choisi d'aborder la raison inverse est particulièrement intéressante. Elle s'est révélée en rupture constante avec les observations du comportement de la situation et les surprises ont été nombreuses. Les résultats obtenus ici sont inédits en ce qu'ils font intervenir l'effet inverse d'une variable sur une autre, ce qui n'avait pas été tenté dans les expériences précédentes (Legendre, 1994, 1995, 1997).

L'explication de cette erreur des sujets est plus aisée à travers la représentation graphique de la relation inverse. Celle-ci, dans les problèmes qui nous préoccupent, prend la forme suivante:

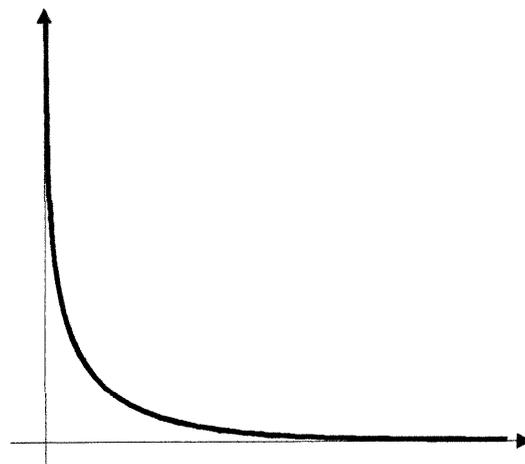


Figure 9) La logique de la raison inverse

Ainsi, les exemples particuliers suivants...

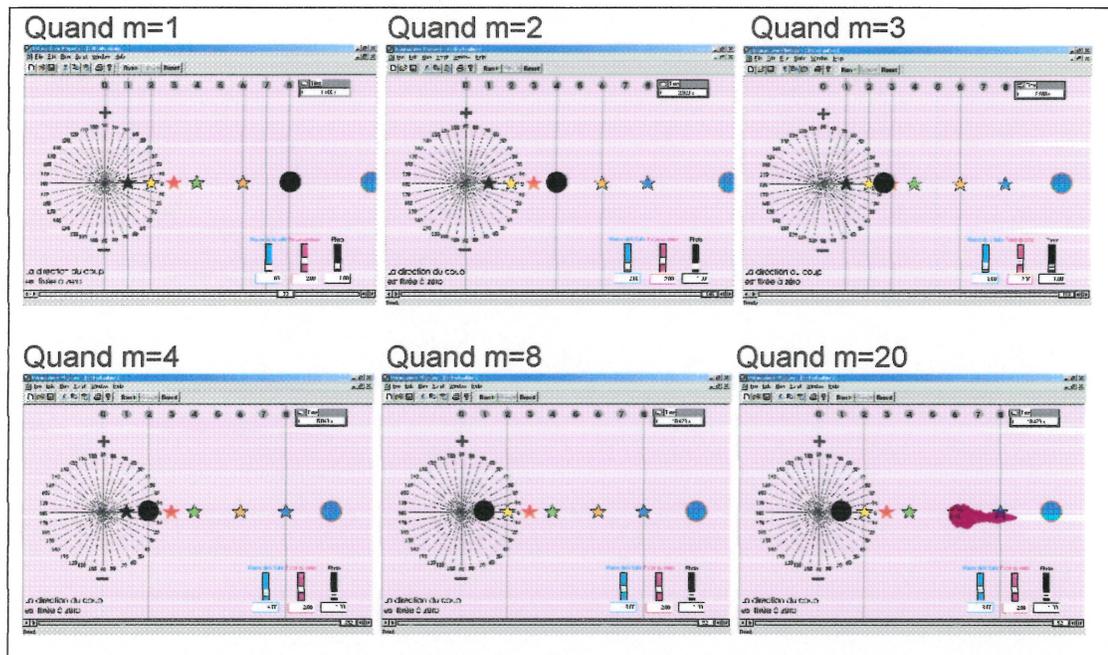


Figure 10) Variations de masses quand la force du coup et la photo sont fixées

On peut voir assez clairement dans la figure 9 qu'une augmentation linéaire de la masse (quand $m=1$, $m=2$ et $m=3$) n'entraîne pas une réduction linéaire de la distance (D) du dépôt de la photo. Il faut augmenter considérablement la masse (quand $m=4$, $m=9$ et $m=20$) pour se rapprocher sensiblement de l'origine. Il n'y a pas de valeur de masse telle que le déplacement de la photo est nul; c'est l'asymptote.

À la lumière de nos observations, nous soutiendrons ici que les sujets vont spontanément se faire une représentation de la relation inverse qui prendrait plutôt la forme suivante :

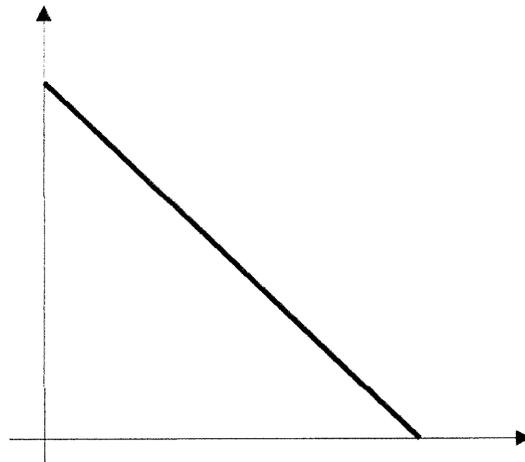


Figure 11) Hypothèse du fonctionnement de la raison inverse

Ainsi, au lieu de concevoir la relation comme ce qu'elle est, c'est-à-dire comme une relation dépourvue de caractère linéaire qui comprend d'ailleurs des asymptotes (confondues aux deux axes), les sujets vont plutôt la comprendre comme une relation proportionnelle négative. Bien qu'il n'ait pas été demandé aux sujets de représenter graphiquement une telle conception de la relation inverse, de nombreux indices nous permettent de proposer une telle explication. Nous présenterons ici les réactions des sujets dans les explorations d'une raison inverse. Nous terminerons par un commentaire général sur ces réactions en une tentative d'explication.

5.4.5.2.1 La non linéarité

Que ce soit dans les situations 02 ou 03, la variable masse est toujours présente et sa variation est en relation inverse avec la vitesse. Cela implique, par exemple, que doubler, tripler ou quadrupler la force du coup donné a pour effet de réduire de moitié, des deux tiers ou des trois quarts la vitesse incidente de la balle après le coup. Réciproquement, réduire la force du coup de moitié ou jusqu'au dixième de sa valeur initiale a pour effet d'augmenter la vitesse finale du double ou de la multiplier par dix. Cependant, si cette logique a pu être découverte rapidement et manipulée efficacement par tous les sujets (ex: faire passer la balle de l'étoile bleue ($D=8$) à l'étoile jaune ($D=2$, pour un rapport de 4) ou à la verte ($D=4$, pour un rapport de 2)), ceux-ci se sont tous butés à une difficulté majeure : celle qui

implique les rapports de vitesse non entiers (par exemple, passer de l'étoile verte (4) jusqu'à l'étoile orange (6), pour un rapport de $2/3$). Ce sont tous les sujets qui ont éprouvé de grandes difficultés ou de l'étonnement quant aux résultats relativement aux essais impliquant ces rapports.

C'est, par exemple, le cas de Karl(1), qui, bien que très à l'aise avec les rapports entiers, se rabat sur le tâtonnement pour les rapports non entiers⁵⁴, ou de Marco(2), qui, aussi habile que Karl(1), se cantonne également au le tâtonnement et marque clairement ses hésitations⁵⁵. Après un certain temps, il ne tente même plus de raisonnements pour ces rapports et opte pour le tâtonnement sitôt que ceux-ci se présentent.

Même pour les sujets les plus vieux, l'étonnement concernant leurs échecs à trouver les « bonnes » masses est manifeste⁵⁶. Maxime(3) verbalise son aisance pour les bonds « d'une étoile à l'autre » aux rapports entiers mais...

« ...sauf (pour) la rouge et la orange, on dirait que je ne peux... que je les manque »⁵⁷

Emmanuel(4), quant à lui, explique :

« ...dès qu'on arrive dans les chiffres plus complexes, autre que les multiples de 0,25, 0,5, 1, 2 et 3, ça devient plus difficile... on ne peut pas y arriver... bien, moi, je n'y arrive pas mathématiquement »⁵⁸

Lorsque se présentent les rapports non entiers, on voit ce sujet se rabattre sur des raisonnements complètement inusités; il utilise alors plutôt sa connaissance des essais précédents, le tâtonnement et d'autres stratégies. Il propose même une explication physique intéressante pour ses observations, celle de la « pente »⁵⁹, dont il sera question un peu plus loin.

⁵⁴ [KARL(1) S3E3: 726-759]

⁵⁵ [MARCO(2) S3E2: 679-689]

⁵⁶ [MAXIME(3) S3E3: 385-529]

⁵⁷ [MAXIME(3) S3E3: 1559-1560]

⁵⁸ [EMMANUEL(4) S3E2: 1387-1396]

⁵⁹ [EMMANUEL(4) S3E3: 286]

Même le sujet de cinquième secondaire, Marie(5), pendant de longues périodes, ne peut résoudre les problèmes des étoiles orange et rouge que par le tâtonnement. Pour elle, ces étoiles seront sources de grandes vexations et même d'irritations⁶⁰.

Dans l'exploration des relations inverses, il est intéressant de remarquer que tous les sujets ont spontanément proposé, pour les rapports non entiers, une hypothèse que nous choisirons d'identifier comme l'hypothèse du « milieu ». Ainsi, s'il est vrai, par exemple (voir la figure 11), toutes autres variables fixées, qu'une masse de 1 porte la photo de la balle jusqu'à une distance de 4 et que son double mène la même photo à une distance de 2, il n'est pas vrai que le point milieu entre les deux masses (1,5) mène la balle jusqu'à une distance-milieu de 3. Il faudrait pour cela avoir plutôt une masse de $4/3$, puisque cela correspond à l'inverse du rapport des distances des étoiles. Les sujets n'ont cependant pas bien perçu cette logique. Étant plutôt inscrits dans le prolongement de l'idée que le double donne la moitié, le triple donne le tiers et le quadruple le quart, il ne leur a pas été possible, par exemple, de voir ce que peut donner en distance de rapports comme « une fois et demie ».

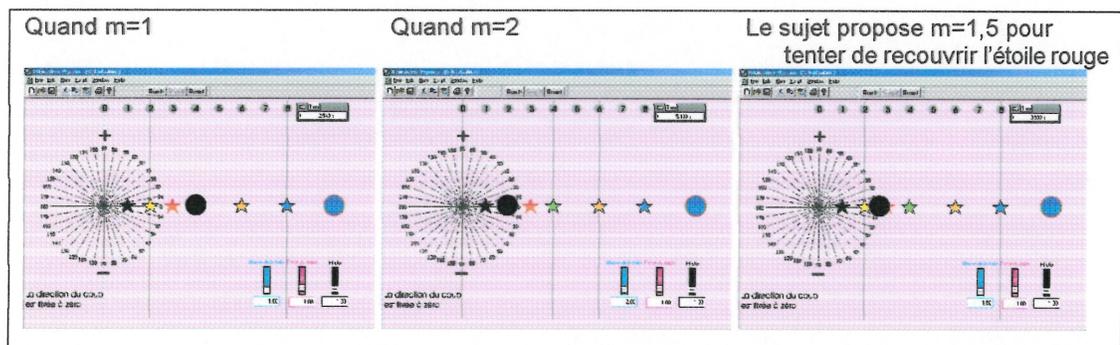


Figure 12) Hypothèse du « milieu »

L'hypothèse du « milieu » a été très souvent employée pour les cibles que sont les étoiles orange (6) et rouge (3) et pour lesquelles sont plus souvent impliqués des rapports non entiers. Or, la nature non linéaire de la relation invalide cette méthode.

⁶⁰ [MARIE(5) S3E2: 533, 707; S3E3: 339, 659; S4E4: 728-738]

Il est clair que les sujets ayant proposé cette hypothèse ont tenté de reproduire ce qui avait été efficace pour la raison proportionnelle à la raison inverse, à la différence près que le « sens » de cette variation change. Une réponse de Maxime(3) à l'intervieweur est, à ce sujet, assez frappante. Malgré une exploration exhaustive des manifestations de la relation inverse et le constat de nombreux échecs, ce sujet verbalise qu'il n'y a pas de différence essentielle entre l'effet de la force et celle de la masse sur la vitesse finale « sauf le sens d'application » et que, à part cela, « ça s'équivaut à peu près. »

Les exemples de propositions de l'hypothèse du « milieu », sont nombreux. Celle-ci a d'ailleurs été proposée par tous les sujets en de nombreuses occasions⁶¹. On a aussi souvent assisté à de nombreuses récurrences (malgré de nombreux échecs) par Marco(2), Maxime(3) et Marie(5). Cette hypothèse constitue le premier indice que la relation inverse a été traitée par les sujets comme une raison proportionnelle négative.

Une autre indication, cette fois indirecte, de l'adhésion à cette hypothèse a été fournie par Marco(2) dans la troisième entrevue où, toujours pour atteindre une des cibles problématiques (l'étoile rouge), il choisit de trouver la fraction correspondant au rapport entre les deux cibles impliquées (celle du départ et celle de l'arrivée), la calcule (pour l'obtenir en décimales) et SOUSTRAIT le résultat obtenu de l'emplacement de la cible de départ. C'est la présence de cette soustraction qui suggère, encore une fois, une croyance en la linéarité de la relation inversement proportionnelle.

La non linéarité a, en de nombreux cas, produit des surprises explicitées. Marco(2) est le premier à décrire cette non linéarité :

« Plus la masse augmente, plus il faut de lignes... euh... moins il faut de lignes (intervalles entre les étoiles) »

⁶¹ [MARCO(2) S3E2: 463-567, MAXIME(3) S3E2: 481-482, 622; S3E3: 494-495, 1560-1596, EMMANUEL(4) S3E2: 367-372, 537-541]

Quant à Maxime(3), au terme d'une exploration longue et peu fructueuse, il affirmera, au sujet de la valeur des « bonds » qu'on peut effectuer d'une étoile à l'autre;

« C'est toutes des valeurs différentes »

« Ce n'est pas une suite nécessairement constante »

« Bien, pour partir de la verte pour aller à la jaune, il faut que je double la masse de ma balle, mais pour partir de la verte à la orange, il ne faut pas que je divise par 2... si je divise par 2, ça donne la bleue »

« Ce n'est pas directement... proportionnel »

« ... (d'habitude) ça a toujours le même taux de variation... mais ça ne semble pas être le cas ici »

Il n'est d'ailleurs ainsi pas le seul à s'étonner que ce qui se passe à gauche de l'étoile verte n'est pas semblable à ce qui se passe à droite, en d'autres termes que les deux asymptotes n'ont pas le même comportement; Marie(5) cherchera, quant à elle, à expliquer la différence absolue des « bonds » selon que la masse est plus grande ou alors plus petite que 1^{62} . Emmanuel(4), quant à lui, met de nombreuses minutes à élucider la logique derrière le fait que les « bonds » (d'une étoile à l'autre) ne sont pas « réguliers ».

Certains sujets ont tenté d'expliquer la non linéarité de la relation inverse par des raisons étrangères à sa nature propre. C'est-à-dire qu'ils ont proposé des explications qui ne font pas appel à la raison physique ou mathématique des phénomènes, mais plutôt à des raisons extérieures qu'ils ont superposées au problème pour, en quelque sorte, « excuser » le comportement de la balle. Par exemple, pourquoi la balle accélère-t-elle autant pour des variations de masses si petites (lorsque la valeur de masse est très faible)?

On a ainsi pu observer deux de ces explications qu'il convient d'exposer ici. La première est fournie par Maxime(3) qui, étonné de voir la balle accélérer autant lorsque la masse passe de 5 à 0,2 (alors que sa vitesse n'augmente pas d'autant lorsque la masse passe de 10 à 5, ce qui est pourtant une variation absolue plus importante), propose une explication fort intéressante. Il commence par faire

⁶² [MARIE(5) S3E2: 374-405]

remarquer que sur l'écran, on trouve des cibles (les étoiles) à toutes les valeurs de distance, sauf à $D=5$ et $D=7$. Il formule alors la proposition que la balle, quand elle traverse une cible, va quelque peu ralentir parce que cette cible va en quelque sorte induire une résistance au mouvement de la balle.

C'est donc pourquoi celle-ci, selon Maxime(3), va aller moins vite dans la partie gauche de l'écran et plus vite dans la partie droite, où il y a moins d'étoiles. « Ça demande un effort, de traverser les étoiles ». Bien entendu, les cibles ne s'opposent en rien au mouvement de la balle. Elles semblent traversées par celle-ci simplement parce qu'elle passe devant elles. Bien que cet exemple soit dénué de sens physique, il illustre bien à quel point la considération de la non linéarité de la relation inverse peut-être contre-intuitive.

Un second exemple d'explication étrangère est fourni par le sujet de quatrième secondaire, Emmanuel(4). Il propose que, si la balle va plus vite vers la droite de l'écran (c'est-à-dire lorsque la masse est faible et que la distance (D) de prise de photo révèle alors la vitesse de la balle), c'est parce que la balle ne roule pas sur une table plate, mais sur un plan incliné que le point de vue (puisqu'on regarde la situation « du dessus ») ne nous permet pas de voir. Cela explique, pour lui, pourquoi la balle va si vite quand elle se rend le plus à droite de l'écran (c'est-à-dire en bas du plan incliné). Pour Emmanuel(4) « ça ne joue pas comme si c'était plat ». Cette explication étrangère à la logique intrinsèque de la relation inverse indique, encore une fois, à quel point il est difficile d'admettre son caractère non linéaire. Pour le sujet, à qui on demande à maintes reprises de tester son hypothèse, de la verbaliser et de la clarifier, la balle se comporte comme si elle roulait à l'horizontale pour des variations de *force de coup* et de *photo*, mais plutôt comme sur un relief pour les variations de masse⁶³. Il ne parvient d'ailleurs pas à expliquer le fait qu'il puisse en même temps y avoir et ne pas y avoir de pente et l'hypothèse de l'existence d'un plan incliné se révèle alors être davantage pour lui une excuse sèche de ses échecs plutôt qu'une véritable considération physique ou même mathématique. Il parvient tout de même un peu plus tard à développer un modèle (le modèle « 2 bonds en 1 ») qui explique les variations.

⁶³ [EMMANUEL(4) S3E2: 894-897]

Il semble, à la lumière des deux derniers exemples, que sitôt que les intuitions ne permettent pas d'approcher les problèmes, des explications étrangères à la logique de la raison inverse occupent les verbalisations. Le conflit ne semble donc pas dans le présent cas mener à des développements physiquement intéressants.

5.4.5.2.2 L'étude des asymptotes

Nombreux sont les étonnements des sujets en ce qui concerne ce qui arrive à la vitesse de la balle et, par conséquent, à la distance de dépôt de la photo, quand les masses sont très élevées. Tout comme pour les moments où les masses faibles produisaient des vitesses élevées conformément à la logique de l'asymptote, les masses élevées ont été sources de grandes surprises. Passant des étonnements les plus simples, jusqu'aux plus consternants, les sujets ont eu de grandes difficultés à admettre la présence de l'effet asymptotique de m sur D .

Une asymptote, par exemple, ne croise jamais les axes du graphique. Mathématiquement, cela signifie notamment qu'il n'existe pas de masse suffisamment élevée pour que le mouvement de la balle soit nul lorsqu'on lui donne un coup. Cependant, ce n'est pas ce que les sujets ont semblé proposer. En effet, quand il leur fut demandé quelle était la masse suffisante pour que la balle n'avance aucunement, les hypothèses furent nombreuses et elles furent toutes très spontanées.

Marco(2), par exemple, suggère que cette valeur corresponde au double de la valeur qu'il lui a fallu pour atteindre l'étoile noire ($D=1$). Sa surprise de voir la balle avancer est manifeste. Il propose ensuite comme valeur suffisante la valeur maximale permise par la situation, c'est-à-dire 20. Cela ne fonctionne toujours pas. L'intervieweur lui propose alors de modifier le programme afin qu'il puisse inscrire la valeur de son choix. Celui-ci tente le 32 : échec. Ce n'est qu'après qu'il propose qu'une telle valeur n'existe pas. Il ajoute cependant « je n'en suis pas sûr sûr ». Son obstination à admettre l'existence d'une valeur de masse telle qu'elle puisse « figer la balle » est une bonne indication de sa croyance en la linéarité de la raison inverse, puisqu'elle implique que la relation croise l'axe.

Ce sujet n'est pas le seul à proposer de telles valeurs. Emmanuel(4) propose, lui aussi, la valeur « 20 » (puisqu'elle correspond au maximum autorisé par la situation). Suite à un essai, il se ravise rapidement et propose que, dans le logiciel, il ne soit pas possible d'atteindre une telle valeur et que c'est aussi le cas dans la réalité, sauf pour les objets fixés (comme une montagne), puisque ces objets, peu importe la force qu'on leur applique, vont nécessairement rester immobiles. Toutes ces propositions illustrent clairement que la relation inverse, telle qu'abordée par l'intuition du sujet, ne comprend pas l'asymptote.

Seul le sujet de cinquième secondaire, Marie(5), propose spontanément, sans faire d'expérimentations, qu'une masse maximale n'existe pas et qu'il y a une asymptote⁶⁴.

On peut tout de même remarquer que les explorations des sujets ont pu mener à des remises en question intéressantes. En effet, Karl(1) finit par admettre, dans la situation 05, que le centre de l'étoile est impossible à atteindre. Marco(2) finit, lui aussi, par formuler de semblables commentaires en s'appuyant sur l'exemple du billard et Emmanuel(4), quant à lui, finit par dire :

« On dirait que la balle doit bouger peu importe le poids (...) que je mets dedans... elle va bouger très lentement, mais il faut qu'elle bouge »

Marie(5) finit aussi par verbaliser ces impossibilités en les illustrant d'exemples philosophiques (ex. celui de la matière qui se divise à l'infini).

On a aussi pu observer certaines hésitations de la part de certains des sujets lorsque se présentent les propriétés asymptotiques des relations inverses. En effet, quand vient le temps de s'approcher graduellement des asymptotes, comme par exemple, pour tenter d'atteindre l'étoile noire ou le point milieu entre cette dernière cible et l'origine, les sujets font montre d'une prudence extrême. Une telle prudence n'apparaît jamais aussi clairement que lors de ces épisodes. Les sujets, bien qu'ils se soient souvent montrés à l'aise avec l'idée de doubler la masse pour passer de la bleue(8) à la verte(4), de la verte(4) à la jaune(2), ou de la jaune(2) à la noire(1), se montrent clairement farouches et circonspects quand vient le temps de

⁶⁴ [MARIE(5) S3E2; 574-589]

s'approcher davantage de l'origine, comme si, soudain, leur compréhension atteignait une limite de l'intuition. Ainsi, on voit Karl(1) augmenter successivement la masse à ces valeurs: 3, 5, 6, 8, 9, 19 et 20. On voit aussi Marco(2) faire prudemment passer la masse par les valeurs 3, 4, 8, 16, 20, et 32, en mettant chacune d'elle à l'essai. Maxime(3), quant à lui, se méfie également à l'approche de l'origine. Pour faire passer la balle de la jaune(D=2) à la noire(D=1), il teste toutes ces valeurs: 2,5; 3; 3,4; 3,5; 3,55; 3,57; 3,6; 3,7; 3,8; 3,85; 3,95 et finalement 4. Il admet d'ailleurs qu'il trouve ce dernier épisode de tâtonnement fort long. Cette dernière expérience semble quelque peu l'échauder, et peu plus tard, quand vient le temps de refaire l'expérience, sa méfiance désormais accrue le fait encore hésiter, mais cette fois, pour des problèmes plus faciles et plus simples; pour réduire d'un facteur 2 la distance à parcourir, il passe par les valeurs de masse 1,25; 1,5; 1,75; 1,8; 1,85; 1,88; 1,9; 1,92; 1,93; 1,94; 1,95 et finalement 2, alors que tout ce qu'il avait à faire est de doubler, opération qu'il effectuait pourtant facilement auparavant. Il admet, en chemin, « je suis un peu confus ». Un peu plus tard, on le voit faire la même chose pour atteindre la cible située à 90 degrés de la trajectoire initiale, dans la situation 05. On voit aussi le sujet de quatrième secondaire hésiter de la sorte, alors même qu'il résolvait facilement les problèmes impliquant des rapports entiers. On le voit faire passer la masse de 2 à 3, puis à 3,25; 3,5; 3,75 et finalement 3,9 pour simplement diviser la distance parcourue par 2. Seul le sujet de cinquième secondaire, qui a déjà admis la présence de l'asymptote, ne tombe pas dans de si prudents tâtonnements.

Toutes ces si lourdes hésitations laissent à penser, encore une fois, que la prise en compte du caractère non linéaire de la relation inverse à l'intérieur de la p-prim d'Ohm n'est absolument pas intuitive : la p-prim d'Ohm répond à une logique linéaire non seulement dans l'effet de son AGENT, mais aussi dans celui de sa RÉSISTANCE. Cela peut suggérer l'idée que les sujets, au lieu de voir la résistance comme une influence passive, vont lui attribuer un rôle tout aussi actif que celui de l'AGENT.

5.4.5.3 La nature de la relation inverse dans la p-prim d'Ohm

À l'image de ce qui a déjà été proposé pour les conceptions, il est possible que l'emploi de la raison inverse par les sujets réponde à une logique dont les fondements relèvent de la faible étendue de leur spectre expérientiel. En effet, les individus ne peuvent généralement qu'appliquer avec leurs muscles ou percevoir avec leurs organes sensoriels des forces qui ne sont ni trop grandes ni trop faibles. Cela a peut-être pour effet d'empêcher les sujets de constater ce qui se produit aux environs des asymptotes. Dans un tel contexte, il est plausible que l'emploi de la raison proportionnelle négative apparaisse comme une bonne approximation de la relation inverse telle qu'illustrée dans la figure 12.

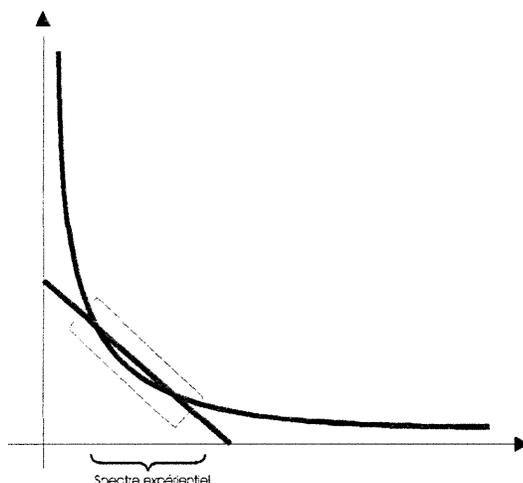


Figure 13) Approximation de la raison inverse en raison proportionnelle négative pour un intervalle expérientiel borné

Il n'est pas non plus exclu que l'expression « plus X augmente, plus Y diminue » contribue à entretenir l'idée que les problèmes qui répondent à la raison inverse peuvent être résolus par une suite d'additions, comme cela peut être le cas pour la relation proportionnelle. Dans tous les cas, cependant, on peut s'attendre, en contexte inductif, à ce que les élèves se construisent spontanément une idée de la relation inverse comme une raison proportionnelle négative, et ce, pour n'importe quelle année du secondaire ou qu'ils l'abordent intuitivement comme tel.

Il faudra également se méfier de la nature des paramètres que les sujets choisiront d'inscrire dans la p-prim d'Ohm pour chercher à décrire le mouvement. Il a été particulièrement évident ici que les sujets ont très facilement adhéré à l'idée fausse que la masse peut nuire au mouvement.

5.4.6 Résumé des analyses de la troisième partie

Il s'avère, à la lumière de cette troisième et dernière partie de l'analyse, qu'il soit possible, avec l'utilisation du cadre proposé par DiSessa, d'expliquer un grand nombre d'observations dans la conduite des sujets. En effet, de nombreuses p-prim peuvent être invoquées pour rendre compte de plusieurs modèles décrits dans la première partie. Par exemple, la p-prim « force as a mover » peut être considérée comme étant à l'origine du modèle « effet du coup +1-1 ». La p-prim « d'Ohm », peut, quant à elle, susciter les modèles additif et soustractif ainsi que le modèle « $(F-m)/m$ » et « direction/? ». Finalement, il est clair que la p-prim « canceling » est partie intégrante du modèle « équilibre + écart ».

L'analyse à l'aide des p-prim permet également de proposer des explications à certaines surprises des élèves. Par exemple, pour les surprises relatives à la présence d'asymptotes ainsi qu'aux rapports inverses non entiers, la p-prim d'Ohm offre un cadre d'analyse très fructueux. Finalement, l'analyse « p-prim » permet d'expliquer certains comportements, comme la tendance à rechercher « à droite de l'origine » ce qu'on retrouve à gauche ou celle des comportements de la balle aux paramètres élevés (p-prim « violence »).

De plus, d'après l'analyse de la relation inverse et l'interprétation qui en a été faite, il semble plus évident que les p-prim, comme l'avait suggéré DiSessa (1993), ont une origine expérientielle. En effet, étant donné que les sujets possèdent une vision de la relation inverse comme d'une raison proportionnelle négative, il est raisonnable de penser que cette idée provient de leur expérience physique quotidienne des mouvements. En effet, même si cette idée est fausse, elle n'en est pas moins efficace dans les contextes usuels.

Bref, il semble que la conduite des sujets ainsi que leur « sens de la mécanique », qu'elle soit canonique ou délinquante, efficace ou erratique, ait pu être représentée de manière complète et satisfaisante par le cadre théorique privilégié. On peut également affirmer que plusieurs observations sur les réactions de surprise des sujets et qui permettent de caractériser l'emploi de certains p-prims, concordent tout à fait avec les observations effectuées par Legendre en 1993.

5.5 Résumé de l'ensemble des analyses

Il nous a été possible, au cours des entretiens d'explicitation, d'analyser les verbalisations de nos sujets de sorte à identifier et caractériser les objets, qu'ils soient explicites ou implicites, dont la prospection avait été annoncée dans les différentes questions de recherche du troisième chapitre. Ces questions étaient :

- 1) Quels sont les **modèles**, symboliques ou formalisés, transitoires ou définitifs, que les sujets vont développer pour construire leur compréhension des situations?
- 2) Quelles sont les **conceptions**, généralement formulées explicitement, qui joueront un rôle d'obstacle ou de « tremplin » dans la compréhension de la logique des situations?
- 3) Quelles sont les **p-prims** employées par les sujets, ayant possiblement un rôle à jouer dans l'élaboration des modèles précédemment mentionnés ainsi que dans la coordination des variables, qu'elles soient employées fautivement ou avec succès?
- 4) Quelles sont les autres considérations relatives aux p-prims qui pourraient se manifester lors de l'examen de la coordination des paramètres des situations? (cette question est en fait une sous-question de la question 3)

1) les modèles. À travers les explorations des sujets, il y eut une tendance manifeste de ceux-ci à chercher les règles qui leur permettraient d'expliquer le comportement de la balle. Ces règles, plus ou moins complexes, plus ou moins employées systématiquement, ont parfois joué le rôle d'hypothèses et parfois celui d'aboutissements. Elles ont généralement été des « objets-pour-penser-avec » ainsi que le nœud de la plupart des échanges. Elles ont permis l'analyse des réflexions en identifiant clairement, d'une part, les paramètres jugés pertinents et, d'autre part, les relations que ces derniers entretiennent entre eux. À la lumière des analyses, il est clair que les modèles construits à partir d'une compréhension qualitative ont été plus prospères. Ils ont permis notamment de mettre en lumière les difficultés des sujets à intégrer correctement l'idée de la relation inverse. Ils ont aussi permis de remarquer la résistance des sujets à prendre en compte le momentum initial de la balle. Cette résistance avait déjà été identifiée par de

nombreux auteurs dont Roschelle (1991, p.186) et Legendre (1993, p.162, 1995, 1997) . Il apparaît également que les outils employés par les élèves pour construire le sens des situations ont été les mêmes pour les constructions efficaces que pour celles qui se sont avérées stériles.

2) Les conceptions. Par définition plus explicites, mieux articulées et très robustes, les conceptions qui sont apparues lors des entretiens, n'ont pas, contrairement à ce à quoi l'on pourrait s'attendre, occupé de place centrale dans les discussions. Bien entendu, il en est apparu, mais leur statut n'est jamais bien longtemps celui d'« objet-pour-penser-avec ». En effet, dès lors que la situation ne se comporte pas comme la conception (verbalisée) l'aurait prévu, on s'intéresse immédiatement et sans regret à d'autres possibilités de coordinations qui n'ont parfois plus rien à voir avec la conception. Bien loin de suggérer que les sujets ont définitivement abandonné ces conceptions, il nous semble toutefois qu'elles ne soient pas si difficiles à attaquer, comme la littérature sur le changement conceptuel le suggère si souvent. La tendance à tenir compte de ses conceptions dans l'exploration des situations a été, dans tous les cas, subordonnée tout naturellement à l'autre tendance, celle qui consiste à rechercher des coordinations efficaces.

3) Les p-primis. L'entretien d'explicitation est une technique qui favorise le dévoilement des articulations entre les paramètres d'un problème que les individus vont juger pertinents. Il est ainsi proposé, dans la perspective de DiSessa, que ces relations se conforment à certaines habitudes, des p-primis, que les sujets entretiennent de manière empirique, par des interactions avec la *physis* de leur environnement.

L'analyse du matériau de recherche a donc permis de mettre en lumière que plusieurs de ces habitudes, de ces tendances, telles que décrites par DiSessa, vont effectivement canaliser et aiguiller la construction des coordinations.

Plusieurs p-primis peuvent également être étroitement associées à la construction de nombreux modèles apparus dans la première partie de l'analyse. Il semble qu'elles puissent également nous permettre d'interpréter l'itinéraire cognitif de nombreuses réflexions fautives. Il semble également qu'il soit plus facile de rendre

compte de l'ensemble des raisonnements des élèves par l'examen des p-primis que par celui des conceptions, les analyses permettant non seulement d'approcher les compréhensions efficaces, mais aussi les initiatives « novices ».

L'étude de la p-prim d'Ohm, des autres p-primis et des différentes relations dressées entre les variables qu'elles impliquent nous a permis de voir en quoi il est bien difficile pour les sujets de reconnaître le caractère parfois asymptotique des phénomènes. Nous faisons l'hypothèse que cela résulte de la limitation du spectre expérientiel des individus dans des environnements particuliers. Sur cette base, on peut déduire que les p-primis sont donc effectivement générées empiriquement. Il semble également évident que l'étude des p-primis à travers les explicitations des sujets permet d'atteindre le niveau implicite de leur compréhension. C'est en effet à travers l'étude des actions, des prédictions et des choix (plutôt que des seules explicitations) qu'il a été possible d'accéder, du moins en partie, à leur compréhension intuitive des mouvements.

Chapitre 6
Conclusion

Chapitre 6 : Conclusion

6 Conclusion

Dans cette conclusion, nous présenterons brièvement : a) les contributions générales de la thèse au monde des connaissances didactiques, b) ses limites au point de vue théorique et au point de vue de la recherche et en c) les perspectives qu'elle autorise. Enfin, en d) un commentaire général concernant l'enseignement de la physique.

a) Contributions

Les entretiens d'explicitation ont permis d'aborder la compréhension des situations-problèmes d'une façon plus fondamentale que le simple examen des verbalisations. En effet, celui-ci donne lieu à la seule prise en compte des conceptions telles qu'elles sont habituellement explicitées et formulées par les sujets. Or, une telle analyse ne rend pas compte des intuitions des sujets dans des itinéraires cognitifs de modélisation parfois longs et tortueux (première question de recherche). L'entretien d'explicitation a donc permis de répondre aux questions de recherche qui concernent non seulement les aspects explicites (deuxième question de recherche), mais aussi les intuitions liées à la compréhension (troisième et quatrième question de recherche). Il propose également un riche éclairage de l'apprentissage inscrit dans la continuité plutôt que la rupture.

L'analyse a permis de montrer assez clairement que les conceptions ne sont pas des objets solides difficiles à altérer. Les coordinations qu'elles décrivent semblent relever de considérations plus déterminantes. Étant donné qu'elles nous ont permis de traduire efficacement les explorations des sujets, il nous apparaît que les p-prim sont des candidates intéressantes pour jouer ce rôle. Elles semblent, de plus, être au cœur de la construction de nombreux modèles. En effet, si on s'en tient à une description statique et ponctuelle de la connaissance, à une « photo », en quelque sorte, il est clair que des conceptions peuvent se dégager, mais dès lors qu'on doit décrire une évolution conceptuelle, ou un itinéraire cognitif, il est clair que l'analyse des « p-prim » offre de meilleures possibilités. Ces p-prim

deviennent alors aisément identifiables (troisième question de recherche). Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec ceux de Roschelle (1991), qui avait pu aisément identifier tout un arsenal de p-prims présents dans les compréhensions qualitatives en physique-mécanique.

L'analyse des verbalisations avec la « lunette » proposée par DiSessa a également permis de procéder à une analyse des « bonnes » intuitions autant que des « mauvaises ». Il a également été mis en évidence que non seulement les p-prims constituent effectivement les points nodaux des intuitions correctes comme de celles qui sont non scientifiques, mais aussi des intuitions susceptibles de mener vers la bonne réponse mais dont les fondements sont erronés. Il devient alors possible de comprendre ce qui est susceptible d'aider l'élève dans sa démarche d'exploration des connaissances scientifiques autant que ce qui y fait obstacle. La présente recherche a également permis d'illustrer une certaine convergence du nombre de p-prims qui peuvent apparaître dans une même classe de coordination, ce que la perspective du changement conceptuel semble incapable de faire avec ses propres objets que sont les conceptions.

Il est par ailleurs ressorti de ces analyses que la relation inverse, appliquée à des problèmes de physique, semble poser problème pour à peu près tous les élèves. Il semble également que les réflexions qui entourent la raison proportionnelle soient déterminantes sur l'efficacité des explorations qui seront effectuées dans la poursuite de la compréhension des situations.

Finalement, il apparaît clairement que la compréhension qualitative, omniprésente tout au long des explorations, soit déterminante sur la qualité et l'efficacité des prévisions, des explications et du développement des modèles en mécanique.

L'emploi d'un micromonde, élaboré ici à l'intérieur d'un logiciel de génie mécanique, a permis aux sujets de construire leur compréhension sans s'empêtrer dans la lourdeur d'expériences réelles. Le nombre de tests d'hypothèses a ainsi pu être très élevé sans laisser le sujet « décrocher » des problèmes qui lui sont soumis. Il est intéressant de voir à quel point, comme dans certaines expériences de DiSessa (1991 & 1993), de Legendre (1995 & 1997) et de Roth (1995), les sujets ont passé

beaucoup de temps à définir les concepts évoqués et à préciser la nature des relations entre les paramètres, ce qui les rapproche manifestement de la nature fondamentale de l'activité scientifique. Nous croyons que la logique de fonctionnement de nos situations a pu fournir un excellent « objet-pour-penser-avec », pour emprunter l'expression de Papert (1980), et ont alors permis, comme dans les recherches de Sherin (1993) et de Roth (1995), de servir de mobile à la construction de véritables connaissances physiques à travers des échanges. Nous croyons que, indirectement, la présente recherche constitue un plaidoyer pour l'emploi des laboratoires virtuels dans l'enseignement de la physique.

b) Limites

La limite principale de la thèse se situe, bien entendu, au niveau de sa généralisabilité. Le nombre restreint de sujets ne permet pas de prétendre à une très large représentativité, même si le nombre des échanges avec chacun de nos sujets est très élevé. La recherche présente donc des exemples d'itinéraires possibles, plutôt que des itinéraires représentatifs.

La thèse ne tient pas compte non plus des différences garçons-filles. L'échantillon des cinq sujets choisis n'est pas basé sur une telle représentativité. Le fait qu'il y ait plus de garçons que de filles restreint donc encore davantage la représentativité. Bien entendu, le fait que les sujets proviennent tous de la même école et que leur histoire individuelle n'ait pas été « fouillée » restreint aussi les ambitions d'universalité des résultats. En effet, étant donné que nous ne connaissions pas le « bagage » de conceptions ou les habiletés en proprioception des élèves, il est difficile de prétendre que chaque sujet fût représentatif de son groupe d'âge. Le « portrait du secondaire » obtenu et donc bien davantage un « portrait d'échantillon ». Les généralisations basées sur la différence entre les sujets des premières années du secondaire *versus* ceux des dernières années sont, dans ce contexte, tout aussi hasardeuses.

Une autre limite de la recherche se situe au niveau du comportement affectif des sujets. Bien que nous ayons retiré du jeu ceux dont le désir de plaire à l'intervieweur fut le plus manifeste, Il reste que les véritables effets de contrat

demeurent impossibles à estimer. Les réponses et verbalisations des élèves sont donc sujettes à être soumises à des contraintes autres que celles d'une véritable exploration libre. Ce problème ne nous semble cependant pas très important étant donné la cohérence des séquences d'exploration que nous avons obtenues. De plus, les considérations logiques nous ont semblé être dans presque tous les cas le seul nœud des verbalisations. Il eut peut-être été intéressant de chercher à comprendre la nature de l'engagement de nos sujets par des tests conduits en parallèle.

Finalement, il peut sembler quelque peu artificiel de prétendre que les modèles élaborés durant les explorations aient produit d'authentiques compréhensions physiques. En effet, l'exploration de situations à l'intérieur d'un logiciel de simulation, si ressemblant à la réalité soit-il, ne peut engendrer que des connaissances à propos de cette simulation et non de la réalité. Il n'est pas évident, en effet, que le sujet puisse se sentir en droit de transposer les modèles développés aux véritables problèmes physiques. Il ne va pas de soi non plus que ce soit véritablement leur « sens de la mécanique » qui ait participé à la construction des modèles. Il est envisageable en effet, que ce soit plutôt une sorte de « sens de la coordination informatique » qui régisse ici le développement des modèles. Les intelligences des situations ne seraient alors que le produit d'interactions avec la machine, vides du sens physique que la situation cherche à reproduire. À ce chapitre, la ressemblance frappante du logiciel avec la réalité physique, bien que celui-ci ne soit qu'en deux dimensions, nous rassure. Les exemples et illustrations que les élèves ont tirées du quotidien et de leurs expériences perceptives nous rassurent également, mais il ne fait aucun doute que de plus amples recherches à cet égard sont nécessaires; en quoi les élèves considèrent-ils la valeur représentative de simulations? Une mesure comparative de la valeur épistémique de deux expériences semblables, une simulée et une authentique constitue une perspective de recherche intéressante.

c) Perspectives

Dans la continuité de cette thèse, certaines pistes de recherches sont apparues. D'autres se sont confirmées. Bien entendu, par exemple, au niveau méthodologique, il serait fort intéressant, avec davantage de moyens, de reproduire la recherche à plus grande échelle, avec davantage de sujets, mais d'autres possibilités, des alternatives théoriques, se dessinent également. Il serait par exemple, possible de concevoir des situations avec de fausses lois physiques, de sorte à pouvoir vérifier quel est la véritable influence du « sens de la mécanique » initial et de la connaissance préalable du vocabulaire scientifique dans la construction du sens de situations simulées. Il serait aussi possible, pour ce faire, de simplement masquer, dans les situations, les noms des paramètres (*force du coup, masse, direction du coup*, etc.). Cela permettrait de voir si les sujets sont en mesure de construire de véritables définitions physiques de ces paramètres.

Au niveau théorique, un certain nombre de perspectives intéressantes s'ouvrent également. La reconnaissance de l'importance de la compréhension qualitative étant fortement appuyée par les résultats de la thèse, comme d'ailleurs par les recherches de DiSessa (1993) et de Legendre (2001), on peut envisager la conception de modèles d'apprentissage et d'enseignement basés non seulement sur les p-prims, mais aussi sur les « expériences de pensée » dont parlait Mach (1908) et dont parle encore Matthews (1994).

Il devient alors possible, avec les outils analytiques que sont les p-prims, d'imaginer aussi des méthodes ou des pensées pédagogiques basées sur l'étude non seulement des différences entre les intelligences novices et expertes, mais aussi sur les ressemblances. Cette perspective d'évolution conceptuelle plutôt que de changement conceptuel, inscrite dans la continuité autant que dans la rupture, permet d'envisager l'abord des « problèmes nouveaux » avec des outils, des « sites actifs », qui donnent prise sur le problème de l'intelligence scientifique.

d) Commentaire général sur l'enseignement de la physique

Au terme de toutes ces analyses, il apparaît que les sujets, dans l'exploration de nos situations, ont rencontré toutes sortes de difficultés. Ces difficultés sont apparues en très grand nombre et elles ont souvent été complètement inattendues. Elles ont parfois été rencontrées dans la définition de l'un des paramètres, dans l'emploi des mathématiques, dans l'explicitation des apprentissages ou dans la coordination des variables.

Il est clair pour nous que toutes ces difficultés, qu'elles soient liées à la modélisation, à l'emploi de conceptions ou de p-primis ou même de toute autre chose, auraient complètement passé inaperçues dans un contexte scolaire traditionnel, où le professeur « enseigne » et où l'élève « absorbe ». En effet, dans un tel contexte, les élèves n'ont pratiquement jamais la possibilité d'épuiser ou de valider toutes les hypothèses qui leur viennent à la conscience. Au lieu de pouvoir le faire, ils sont le plus souvent imprimés d'une pensée unique et déductive; celle du professeur. Dans de telles classes, où les conceptions des élèves sont parfois complètement ignorées, il n'est pas du tout évident que ces derniers puissent véritablement faire évoluer leur compréhension. En effet, si les difficultés personnelles ne peuvent pas être mises en évidence et « adressées » systématiquement, elles ne pourront pas être surmontées. Les activités scolaires peuvent alors devenir bien autre chose que des activités d'apprentissage; elles peuvent devenir des tâches dont l'objectif est d'imiter le professeur ou simplement de le satisfaire. L'apprentissage et la réussite deviennent alors des choses bien différentes.

Il est à souhaiter qu'une approche inspirée de la méthodologie retenue dans cette recherche puisse voir le jour à l'école. Nous croyons que les difficultés rencontrées par nos sujets peuvent être, avec le temps, surmontées par des approches personnalisées qui laissent place non seulement aux erreurs en physique, mais aussi aux « errances », qui sont, elles, parfois longues, laborieuses et coûteuses, mais desquelles émergent d'authentiques compréhensions.

RÉFÉRENCES

LISTE DES RÉFÉRENCES

Andre, Thomas et al. (1999). Impact of a prior conceptual change simulation on learning about motion, *conference at AERA*, Montreal, 1999.

Astolfi, Jean-Pierre (1997). *L'erreur, un outil pour enseigner*, ESF Éditeur, 117 pages.

Astolfi, Jean-Pierre et al. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences*, DeBoeck-Université, 193 pages.

Bachelard, Gaston (1963). *Le nouvel esprit scientifique*, Presses universitaires de France, 179 pages.

Bachelard, Gaston (1967). *La formation de l'esprit scientifique*, Librairie Vrin.

Baruk, Stella, (1973). *Échec et Maths*, Éditions du Seuil, Paris, 306 pages.

Bertrand, Yves (1998). *Théories contemporaines de l'éducation*, Éditions Nouvelles, 306 pages.

Boujouade B. Saouma (1991). A study of the nature of students' understandings about the concept of burning, *Journal of research in science teaching*, Vol.28, No.8, p689-704.

Boutin, Gérald (1997). *L'entretien de recherche qualitatif*, Presses de l'université du Québec.

Brousseau, Guy (1998). *Théorie des situations didactiques, la pensée sauvage* (éditions), 395 pages.

Caverni, Jean-Paul (1988). La verbalisation comme source d'observables pour l'étude du fonctionnement cognitif, *Psychologie cognitive: modèles et méthodes*, Presses universitaires de Grenoble, 472 pages.

Cervera, Daniel (1997). Élaboration d'un environnement d'expérimentation en simulation incluant un cadre théorique pour l'apprentissage de l'énergie des fluides, Thèse de doctorat, Université de Montréal, 151 pages

Clark, R. E. (1983). Reconsidering research on learning from media, *Review of Educational Research*, 53, p445-459.

Clark, R. E. (1984) in Petkovich & Tennyson, (1984). Clark's "learning from media": a critique, *ECTJ*, vol.32, No.4, p233-241.

Confrey, Jere (1990). A review of research on student conceptions in mathematics, science, and programming, *Review of research in education*, Courtney B. Cazden, editor.

Couture, Marc & Francis, Alexandre (2000). *Realism and credibility in a simulation-based virtual physics laboratory (VPLab) : an empirical study*, poster-demo presented at the ED-MEDIA 2000 conference, Montréal, June 29, 2000.

De La Garanderie, Antoine (1995). *L'intuition, de la perception au concept*, Bayard Éditions, 101 pages.

Demastes S. Sherry et al. (1995). *Students' conceptual ecologies and the process of conceptual change in evolution*, *Science education*, Vol. 79 No. 6, 637-666.

Dewey D. et al. (1992). *Studying conceptual change in learning physics*, *Science education*, Vol 76 No 6, p615-652.

DiSessa, Andrea A (1991). Computers and explanatory Learning: setting the scene, *Proceedings of the NATO advanced research workshop on the design of computational media*, p1-11.

DiSessa, Andrea A. (1993). Toward an epistemology of physics, *Cognition and instruction*, 10(2 &3), p105-225.

DiSessa, Andrea A. (1996). What do "just plain folk" know about physics, *Handbook of education and human development*, p709-730.

DiSessa, Andrea A. et al. (1998). What changes in conceptual change ?, *International journal of science education*, vol.20, No.10, p1155-1191.

Driver, Rosalind (1983). *The pupil as scientist ?*, The open university press.

Driver, Rosalind & Guesne, Edith & Tiberghien, Andrée (1985). *Childrens' ideas in science*, The open university press.

Dreyfus Amos, Jungwirth EHUD & Elioitch, Ronit (1990). Applying the « cognitive conflict » strategy for conceptual change- Some applications, difficulties and problems, *Science education*, Vol.74, No.5, p555-569.

Eckstein S. et al. (1993). *Development of children's ideas on motion: Impetus, the straight-down belief and the law of support*, *School, Science & Mathematics*, Vol. 93 No6, p299-305.

Edwards, Laurie (1993). Microworlds as representations, In A. DiSessa, C. Hoyles, R. Noss & L .D. Edwards, *Computers and exploratory learning*, p127-154.

Finegold, M. & Gorsky, P. (1991) *Students' Concepts of Force as Applied to Related Physical Systems: A Search for Consistency*. *International Journal of Science Education*; Vol. 13, No.1, p.97-113

Gardner, Martin (1997). Un canular désopilant du physicien Alan Sokal, *Les cahiers rationalistes*, Vol.20 No.6, p13-19.

- Giordan, André** (1999). *Apprendre!*, Belin, 250 pages.
- Giordan A. et De Vecchi G.** (1987). *Les origines du savoir*, Delachaux, Neuchatel.
- Glaserfeld, Ernst von** (1994). Pourquoi le constructivisme doit-il être radical?, *Revue des sciences de l'éducation*, Vol.20, No.1, p21-27.
- Gould, S.J.** (1987). *Time's arrow, time's cycle*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Green P.R. et al.** (1985). *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*, London, Lawrence Erlbaum
- Guedj, Denis** (2000). *Rendons les mathématiques aimables*, L'Express, 07/12/2000, p10-13
- Hagler P. & Knowlton, J.**(1987). Invalid implicit assumption in CBI comparison research. *Journal of computer-based instruction*, Vol.14, No.3, p84-88.
- Hammer, David** (1996). Misconceptions or p-prims...?, *The journal of the learning sciences*, 5(2), p97-127.
- Hewson, Peter** (1984). A conceptual change approach to learning science, *European journal of science education*, Vol.3, No.4, p383-396.
- Hewson, Peter W. & Hewson, Mariana G.** (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction, *Instructional Science*, Vol.13, p1-13.
- Hynd, Cynthia R. et al.** (1994). The role of instructional variables in conceptual change in high school physics topics, *Journal of research in science teaching*, Vol.31, No.9, p933-946.
- Johsua, Samuel et Dupin, Jean-Jacques** (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Presses universitaires de France, 422 pages.
- Koumaras, P. et al.** (1996). Pupils' conceptions as a factor for the development of experiments- the case of simple electricity, *School & Science Review*, mars 1996, 4 pages.
- Kafai, Y., Resnick, M. et al.** (1996). *Constructionism in practice: designing, thinking, and learning in a digital world*. Mahwah, N.J, L. Erlbaum Associates.
- Kelly, Gregory & Crawford, Teresa** (1996). Students' interaction with computer representations : analysis of discourse in laboratory groups, *Journal of research in science teaching*, Vol.33, No.7, p693-707.
- Kozma, R. B.** (1991). Learning with media, *Review of Educational Research*, Vol.61, p179-212.

Kuhn, Thomas S. (1970). *La structure des révolutions scientifiques*, Champs Flammarion, 285 pages.

Laplante, Bernard. (1997). Le constructivisme en didactique des sciences, dilemmes et défis, *Éducation et francophonie*, volume XXV, no. 1, (publication web).

Larochelle, Marie & Désautels, Jacques (1992), *Autour de l'idée de science*, Presses de l'université Laval, 314 pages.

Larochelle, Marie & Désautels, Jacques (1998), *About the epistemological posture of science teachers*, in *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*. An I.C.P.E. Book International Commission on Physics Education.

Larochelle et Bernarz (1994). *À propos du constructivisme et de l'éducation*, *Revue des sciences de l'éducation*, vol.20, No.1, p5-19.

Legendre-Bergeron, Marie-Françoise (1993). *Étude du développement d'une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile dans le contexte d'un micromonde de mouvement*, Les publications de la faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 333 pages.

Legendre, Marie-Françoise (1994) *Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire: un état de la question*, *Revue des sciences de l'éducation*, Vol. 20, No. 4, p. 657-677.

Legendre, Marie-Françoise (1995) *Analyse d'une activité d'apprentissage en physique à l'aide du modèle de l'équilibration*. *Revue des sciences de l'éducation*, Vol. 21, No. 3, p. 473-503.

Legendre, Marie-Françoise (1997) *Task Analysis and Validation for a Qualitative Exploratory Curriculum in Force and Motion*. *Instructional Science*, Vol.25, No. 4, p.255-305.

Legendre, Marie-Françoise (2002) *Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement*. Dans *Changement conceptuel et apprentissage des sciences : Recherches et pratiques* (p. 177-203) ouvrage collectif sous la direction de Rodolphe Toussaint. Éditions Logiques.

Mach, Ernst (1908). *La connaissance et l'erreur*, Flammarion, 367 pages

Mallinckrodt, John (1999). The asymmetrical « sticking » behavior of two balls on an incline, *The physics teacher*, Vol.37, Nov. 1999, p463-467.

Marton, Ference (1993). Our experience of the physical world, *Cognition and instruction*, 10(2 & 3), p227-237.

- Matthews, Michael R.** (1994). *Science teaching, the role of history and philosophy of science*, New York, Philosophy of education research library, Routledge, 287 pages.
- Morin, Edgar** (1977). *La méthode: 1. La nature de la nature*, Paris, Seuil, 399 pages.
- Morin, Edgar** (1999). *La tête bien faite*, Paris, Seuil, 153 pages.
- Novak, Joseph D. et al.** (1994). Chapitre 5: Research on alternative conceptions in science, *Handbook of research on science teaching and learning*, National science teacher association.
- Nussbaum & Novick** (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation : toward a principled teaching strategy, *Instructional science*, Vol.11, p183-200.
- Orange, Christian** (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*, Paris, Presses de l'université de France.
- Pagonis, Vasilis** (1999). Modeling forces of the human body, *The physics teacher*, Vol.37, p469-474.
- Papert, Seymour** (1980). *Jaillissement de l'esprit*, Flammarion, 297 pages.
- Palmer, David et Flanagan, Ross** (1997). Readiness to change the conception that "motion implies force": a comparison of 12-year-old and 16-year-old students, *Science education*, Vol.81, p317-331.
- Piaget, Jean** (1967). *La psychologie de l'intelligence*. Éditions du prisme, 190 pages.
- Petkovich, M. & Tennyson, R.D.** (1984) Clark's "learning from media": a critique, *ECTJ*, Vol.32, No.4, p233-241.
- Posner, George J.; Hewson, Peter W.; Strike, Kenneth A. & Gertzog, William A.** (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change, *Science education*, Vol.66, No.2, p211-227.
- Potvin, Patrice** (1998). *État de la question de la problématique du conflit cognitif en sciences au secondaire*, mémoire présenté pour l'obtention de la maîtrise en éducation, UQAM, 173 pages.
- Potvin, Patrice** (2000). *La "condition humaine" et l'apprentissage de la physique*, *Spectre*, Vol.29, No.3, p11-13.
- Roschelle, Jeremy** (1991). *Students' construction of qualitative physics knowledge: Learning about velocity and acceleration in a computer microworld*, thèse de doctorat, University of Berkeley, 212 pages.

- Roschelle, J.; Mason, J.** (1995). *Sketching a multidisciplinary microworld: A collaborative exploration in Boxer*. In A.A. diSessa, A.A., C.M. Hoyles, R. Noss (Eds.), *Computers and exploratory learning*. New York, p289-304.
- Ross, S.M. & Morrison, G.R.** (1996). Experimental research methods, *Handbook of Research for Educational Communications and Technology*, New York, Macmillan, p1148-1170.
- Roth, Michael Wolff** (1995). Affordances of computers in teacher-student interactions : the case of Interactive Physics™, *Journal of research in science teaching*, Vol.32, No.4, p329-347.
- Roth, Michael Wolff et al.** (1996). Affordances and constraints of computers in science education, *Journal of research in science teaching*, Vol.33, No.9, p995-1017.
- Schwarz, Cindy** (1995). The not-so-simple pendulum, *The physics teacher*, Vol.33, p225-228.
- Sherin, Bruce** (1993). Dynaturtle revisited: Learning physics through collaborative design of a computer model, *Interactive learning environments*, 3(2), p91-118.
- Smith, DiSessa et al.** (1993). Misconceptions reconcieved: a constructivist analysis of knowledge in transition, *The journal of the learning sciences*, 3(2), p115-163.
- Thouin, Marcel** (1996) *Introduction aux sciences de la nature*, Multimondes, 189 pages.
- Thouin, Marcel** (1997) *La didactique des sciences de la nature au primaire*, Multimondes, 456 pages.
- Thouin, Marcel** (1999) *Problèmes de sciences et de technologie pour le préscolaire et le primaire*, Multimondes, 664 pages.
- Varda Bar, Barbara Zinn & Rivka Goldmuntz** (1994). Children's concepts about weight and free fall, *Science education*, Vol.78 No.2, p149-169.
- Vermersh, Pierre** (1994). *L'entretien d'explicitation*, Paris, ESF éditeur, 182 pages.
- Viennot, laurence** (1979), *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Hermann, Paris
- Viennot, Laurence** (1996). *Raisonnement en physique, la part du sens commun*, Paris, De Boeck Université, 246 pages.
- Villani, A.** (1992). Conceptual change in science and science education, *Science education*, Vol.76 No.2, p223-237.

Vygotski, Lev (1934). *Pensée et langage*, Paris, La dispute/Snédit, 535 pages.

White, Barbara (1984). Designing computer activities to help physics students understand Newton's laws of motion, *Cognition and instruction*, Vol. 1, 69-108.

Wilkinson, Ladye (1995). Physics academy software : Graphs & tracks, *The physics teacher*, Vol.33, p254-255.

Wu, C. (1997-98). Using articulate virtual laboratories in teaching energy conversion at the US naval academy, *Journal of educational technology systems*, Vol.26 No.2, p127-136.

ANNEXES

ANNEXE 1

Quelques épisodes de transcriptions

Les épisodes de transcription présentés dans cette annexe sont classés en ordre de niveau. Ainsi, ce sont les transcriptions du sujet de première secondaire qui apparaissent en premier et celle du sujet de cinquième en dernier. Les numéros de situation et d'entrevue constituent les critères secondaires de classement des épisodes et sont ordonnés de façon croissante. Il est clair que ces transcriptions ne constituent qu'une fraction de toutes celles qui ont été analysées. Cependant, elles présentent de nombreuses tendances significatives de l'ensemble du matériau.

Quelques transcriptions du sujet de première secondaire, KARL

Karl, situation 02, entrevue 2

113: KG1 : Le plus lourd un objet est, le plus vite ça va, alors si je la fais plus légère, je pourrais le faire en moins que 6 secondes, alors je vais changer la masse de la balle.

Karl, situation 03, entrevue 3

77: KG1 : Faudrait que je le mette un petit peu plus lourd, juste à 2, je vais essayer ça

80:

81: Masse de la balle : 2

82: Force du coup : 1

83: Photo : 1

84:

85: KG1 : Trop lourd

86: I : Trop lourd ! ?

87: KG1 : Je crois que oui, oui trop lourd, alors on va aller essayer juste enlever à peu près la moitié de la moitié, qui est 1.5, on va essayer ça

89:

90: Masse de la balle : 1.5

91: Force du coup : 1

92: Photo : 1

93:

94: KG1 : Presque, encore un peu

95: (5 secondes)

96: I : Est-ce que ça peut te donner des indices sur la masse ça ?

97: KG1 : Je suis en train de penser, c'est pas eh, il faut que je la fasse plus légère, un petit peu plus

155: I : Bon bien on va essayer, va-y donc... On pourrait essayer 2 pour la masse de la balle 1 pour la force du coup et 1 pour photo.

174: j'étais trop lourd, peut-être si on faisait point 5...

726: Masse de la balle : 0.75

727: Force du coup : 1

728: Photo : 1

729:

730: KG1 : Hum

731: I : À quoi tu penses présentement?

732: KG1 : Hum

733:

734: Masse de la balle : 1.22

735: Force du coup : 1

736: Photo : 1

737:

738: KG1 : Presque

739:

740: Masse de la balle : 1.20

741: Force du coup : 1

742: Photo : 1

743:

744: I : À quoi tu penses dans ta tête?

745: KG1 : Je penses, je vais faire

746:

747: Masse de la balle : 1.1

748: Force du coup : 1

749: Photo : 1

750:

751: KG1 : Oups, ok, ..., l'étoile rouge

752: I : On était sur l'étoile orange avec 0.66 sous la masse

753:
 754: Masse de la balle : 1.3
 755: Force du coup : 1
 756: Photo : 1
 757:
 758: I : Pourquoi as-tu mis 1.3?
 759: KG1 : Juste pour essayer

Karl, situation 04, entrevue 4

251: Masse de la balle: 1
 252: Force du coup: 0.1
 253: Direction du coup: 180
 254:
 255: KG1 : Hey !? ça je ne comprends pas .
 256: I : Comment tu savais que ça n'allait pas rebondir?
 257: KG1 : Parce que c'est plus petit que 1, à 1 ça ne bougeait pas, mais je ne savais pas que ça allait dépasser.

302: KG1 : Ah rien, je voulais juste voir combien de ligne il y avait, mais ça ne donne pas ce que je veux savoir...
 305: I : Qu'est-ce que tu veux savoir au juste?
 306: KG1 : Pourquoi ça dépasse quand ça va moins que 1
 307: I : Parce que tout à l'heure on a mis 1, 1, pis c'est quoi, c'était 180,
 308: KG1 : Oui
 309: I : Pis là la balle a arrêté, c'est ça qui est arrivé?
 310:
 312: Masse de la balle: 1
 313: Force du coup: 0.2
 314: Direction du coup: 180
 315: <run>
 316:
 317: KG1 : Pourquoi ça fait ça?

493: I : Tout à l'heure on a fait arrêté la balle dans le centre, tu as dit qu'il fallait utiliser l'angle 180, pour la faire
 arrêter, ...
 496: KG1 : Oui, mais peut-être avec 0
 497: I : Est-ce qu'on peut le faire avec 0?
 498: KG1 : On va voir, peut-être
 499:
 500: Masse de la balle: 1
 501: Force du coup: 1
 502: Direction du coup: 0
 503: <run>
 504:
 505: KG1 : oui (la balle n'est pas arrivée au centre), non
 506: I : Tu penses que non?
 507: KG1 : Peut-être que oui? Non, je ne sais pas pourquoi pour l'instant mais ça va continuer
 509:
 510: Masse de la balle: 1
 511: Force du coup: 1
 512: Direction du coup: 0
 513: <run>
 514: <Stop>
 515:
 516: KG1 : Ah oui c'est parce que au lieu que ça diminue, ça fait plus, alors ici il faudrait mettre 0 (force du coup),
 peut-être, ah non ça ne bouge pas
 519:
 520: Masse de la balle: 1
 521: Force du coup: 0
 522: Direction du coup: 0
 523: <run>
 524:
 525: KG1 : Non, c'Est encore la même chose, mais 1 ça ne marcherait pas parce que ici ce n'est pas comme 180,
 ça donne 1 point au lieu d'en enlever 1 alors au lieu que ce soit 1 et ça ne bougerait pas, ce serait 2, la
 vitesse de la balle qui est ici, ..., mais quand même à 0 ça ne bouge pas aussi, mais ça bouge mais...

Karl, situation 05, entrevue 5

152: I : Ça monte, tu as remarqué la vitesse
 153: KG1: Oui, le plus haut on le met, le plus lent ça va
 154: I : Le plus haut on le met
 155: KG1: Le moins vite ça va...
 156: I : Est-ce que tu as un moyen présentement pour toi pour que...
 157: KG1: ... pour que ça aille plus vite?
 158: I : Oui
 159: KG1: Il faut changer la force du coup
 160: I : Ok
 161: KG1: On pourrait dire que c'est un mélange de tous les exercices que l'on a fait.
 163: I : hum, hum
 164: KG1: Seulement il n'y a pas la photo et la masse de la balle, sinon se serait comme tricher
 166: I : Ha ha
 167: KG1: Ça va toucher
 168:
 169: Force du coup: 20
 170: Direction du coup: 178
 171: <run>
 172:
 173: I : Tout à l'heure c'était quoi la vitesse...
 174: KG1: Hum 35 quelque chose, eh non, 0.35
 175: I : 0.035
 176: KG1: oui, hum...
 177: I : Il y a quelque chose qui ne va pas
 178: KG1: Ah, hum, (frappe et frotte dans ses mains), quand on met la vitesse à 20, ça va au degré 178, alors que si maintenant on était à 90
 181:
 182: Force du coup: 20
 183: Direction du coup: 90
 184: <run>
 185:
 186: KG1: Yeah!!
 187: I : C'est quoi ta théorie?
 188: KG1: Force du coup plus haut que 6, si tu mets la force du coup à 20, ça va aller dans la même direction que tu as mis dans la direction du coup ça ne va pas diviser à 2...

293: I : Qu'est-ce que je pense qui va arriver?
 294: KG1: Je ne sais pas pour l'instant, non ça ne fait rien, ça touche encore l'œil. Je voulais juste voir quelque chose.
 297: I : Qu'est-ce que tu voulais voir?
 298: KG1: Hem, rien, ici c'est 33, ici, c'est 44

321: KG1: Ça va encore rester
 322: I : Tu es loin du flocon là
 323: KG1: Hum, hum
 324: (20 secondes ~ joue avec le curseur de direction du coup)
 325: I : À quoi tu penses?
 326: KG1: Je réfléchis à quoi réfléchir
 327: I : Tu n'as aucune idée...
 328: KG1: Laisse moi, je ne veux pas de trucs, je veux juste mes trucs à moi tout seul
 330: I : Tes trucs à toi tout seuls, c'est correct ça Karl, essaye de les partager avec moi par exemple...
 332: KG1: Ok 66×2 ça donne 132×2 , je peux m'en servir (calculatrice)
 333: I : Oui vas-y, attends tiens (calculatrice de windows)
 334: KG1: Ok, $66 \times 2 = 132 \times 2 = 264 \times 2 = \dots$
 335: I : Ça c'est quoi?
 336: KG1: Ça c'est 1256...
 337: I : Si on pouvait avoir cet angle là...
 338: KG1: J'aurais probablement le flocon. C'était $528 + 2 = 530$
 339: I : Ajouter 2 points pour...
 340: KG1: Pour que ça touche le flocon, puis il faut que je trouve un nombre qui peut rentrer là dedans
 342: (Retour à Interactive Physics)

343: (Retour à la calculatrice)

344: (45 secondes)
345: <Long calculs avec la calculatrice>
347: KG1: Encore moins que 100
348: I : Je ne comprends pas ce que tu essayes de trouver
349: KG1: J'essaie de trouver quelque chose...

641: I : Ok, Est-ce que ça ressemble à quelque chose qu'il y a dans la réalité?
642: KG1: Le jeu
643: I : Est-ce que tu utilise des situations de la vie de tous les jours pour solutionner ce problème?
645: KG1: Non, plutôt les maths
646: I : Plutôt les maths
647: KG1: Sûrement pas le verbe être, je suis, tu es, non...
648: I : Ça ne ressemble à rien de ...
649: KG1: Non, c'est en maths que l'on utilise ces choses, c'est de la géométrie...
650: I : Tu vois de la géométrie toi.
651: KG1: Oui

Quelques transcriptions du sujet de deuxième secondaire, MARCO

Marco, situation 01, entrevue 1

- 103: P : Tu choisis de mettre la force du coup à 3?
 104: MC2 : Oui, parce qu'à 2, ça donnait 1,00m/s, alors j'ai essayé 3 et ça marquera 2,00.
 106: P : Alors un de plus?
 107:
 108: Force du coup: 3,00
 109: Direction du coup: 150,00
 110: <RUN>
 111:
 112: P : Pour la direction, ça va. On touche à la pointe de l'étoile.
 113: MC2 : C'est par un pour la force du coup, ça donne 500m/s. On peut la mettre à 4.
 115:
 116: Force du coup: 4,00
 117: Direction du coup: 150,00
 118:
 119: MC2 : Je vais la mettre encore plus au milieu, alors je change la direction.

Marco, situation 02, entrevue 1

- 57: MC2 : C'est parce que tantôt j'ai vu que ça arrêta environ ici <M pointe à gauche du zéro>. Alors, je me suis dit que la balle arrêterait là <M pointe à droite du zéro> avec le deux.

Marco, situation 02, entrevue 2

- 108: P : 2,5 ?
 109: MC2 : Il faut qu'elle soit plus lourde et elle va aller moins vite.
 110: P : Est-ce que ça se passe comme ça dans la réalité ? Est-ce que les objets auxquels on donne un coup, un coup pareil, quand il sont plus lourds, ils vont moins loin ?
 113: MC2 : C'est comme les <...?..> au Kin-ball.

- 176: P : Et, tu as choisies 0,7 pour une raison particulière ?
 177: MC2 : Non, c'est un essai.

Marco, situation 03, entrevue 2

- 679: Masse de la balle : 1,34
 680: Force du coup: 2,00
 681: Photo : 0,99
 682:
 683: M : Si on arrive à l'étoile jaune avec 0,33 <M pointe l'étoile jaune>, bien, c'est le triple. C'est 2 ici <M pointe l'étoile jaune> ; ici, c'est 6 <M pointe l'étoile orange>. C'est le triple, alors on multiplie par 3.
 687: P : OK, pourrais-tu nous changer la force du coup pour arriver sur la verte ?
 689: <...10secondes...>

Marco, situation 04, entrevue 4

- 19: Masse de la balle : 1,00
 20: Force du coup: 1,00
 21: Direction du coup : 180,00 [Initialement, elle était à 0,00.]
 22: <RUN>
 23: [Après le coup, la balle reste au centre.]
 24:
 25: Masse de la balle : 1,00
 26: Force du coup: 2,00
 27: Direction du coup : 180,00
 28:
 29: P : Est-ce que tu peux faire comme la dernière fois et m'expliquer au fur et à mesure ce que tu choisis de faire, s'il te plaît ?
 31: MC2 : J'ai fait un essai pour commencer et, avec 1, la balle ne reçoit pas de coup. Alors, je vais essayer 2.

- 878: Masse de la balle : 2,00

879: Force du coup: 0,00
 880: Direction du coup : 180,00
 881: <RUN>
 882: [Après le coup, la balle se déplace à 1,000m/s vers la droite.]

1381: P : Si, par exemple, on plaçait la masse à 4 en laissant la force du coup à 3, qu'est-ce qui arriverait à la balle ?
 1383: MC2 : Elle irait vers la droite.
 1384: P : À quelle vitesse ?
 1385: MC2 : Je ne sais pas.
 1386: P : Est-ce que ça serait rapide ou lent ?
 1387: MC2 : Lent.
 1388: P : Est-ce que ça serait en bas de 1 ?
 1389: MC2 : Oui.
 1390:
 1391: Masse de la balle : 4,00
 1392: Force du coup: 3,00
 1393: Direction du coup : 180,00
 1394: <RUN>
 1395: [Après le coup, la balle se déplace à 0,250m/s vers la droite.]

1651: P : Pas facile à faire. [?] Je vais te demander : dans la situation, ça a quel effet de changer la masse ?
 1653: MC2 : Ça change tout.
 1654: P : Ça change tout.
 1655: MC2 : Oui, parce que plus la masse augmente... Bien, comme la masse... Si la masse est égale à la force du coup, la balle s'immobilise, si on est à 180. Si on est à 180 et si la force du coup est plus petite que la masse de la balle, elle va aller à droite. Si on est à 180 et que la force est plus grande que la masse de la balle, alors elle va rebondir.
 1661: P : La balle va rebondir. Peux-tu me répéter ? Je vais noter.
 1662: Quand...
 1663: MC2 : Quand on est à 180...
 1664: P : À 180, oui.
 1665: MC2 : Si la masse et la force sont égales...
 1666: P : Si la masse égale la force. Alors quoi ?
 1667: MC2 : La balle s'immobilise au centre.
 1668: P : Immobilisation. OK, ensuite.
 1669: MC2 : Si, encore à 180, la masse est plus grande que la force du coup, la balle va continuer ; elle ne subira pas de coup.

Marco, situation 04, entrevue 5

175: P : La balle sort à une vitesse de 0,99. Est-ce qu'il serait possible de la faire sortir à droite de l'écran plus vite que ça ?
 177: MC2 : Juste en augmentant la masse.
 178: P : En augmentant la masse ?
 179: MC2 : Oui.
 180:
 181: Masse de la balle : 5,00
 182: Force du coup: 0,01
 183: Direction du coup : 180,00
 184:
 185: P : Si on augmente la masse, qu'est-ce qu'il devrait se produire ?
 186: MC2 : Elle va aller plus vite.
 187: P : Elle va aller plus vite, plus vite que 0,99 ? À quelle vitesse crois-tu que la balle va se déplacer ?
 189: MC2 : Je ne le sais pas. Il faudrait que je fasse un essai.
 190:
 191: Masse de la balle : 5,00
 192: Force du coup: 0,01
 193: Direction du coup : 180,00
 194: <RUN>
 195: [Après le coup, la balle se déplace à 0,998m/s vers la droite.]
 196:
 197: P : Elle est allée un peu plus vite. Est-ce qu'il y aurait moyen d'aller plus vite que ça encore ?
 199: MC2 : Non, parce qu'à 1...
 200:

201: Masse de la balle : 1,00
 202: Force du coup: 0,01
 203: Direction du coup : 180,00
 204:
 205: MC2 : ...la plus grande vitesse, c'est... On soustrait la force du coup de la vitesse initiale de la balle. Ça fait 1 moins 0,01. Ça fait 0,99. Si on met 5 ; 5, la balle s'immobilise.
 208:
 209: Masse de la balle : 5,00
 210: Force du coup: 5,00
 211: Direction du coup : 180,00
 212: <RUN>
 213: [Après le coup, la balle s'immobilise.]
 214:
 215: P : Si on voulait que la balle se déplace vers la droite, il faudrait réduire la force du coup, c'est ce que tu fais depuis tantôt, c'est ça ?
 218: MC2 : Euh, non, il faudrait l'augmenter.
 219: P : Il faudrait l'augmenter.
 220:
 221: Masse de la balle : 5,00
 222: Force du coup: 5,88
 223: Direction du coup : 180,00
 224: <RUN>
 225: [Après le coup, la balle se déplace à 0,176m/s vers la gauche.]
 226:
 227: MC2 : Il faut la réduire.
 228:
 229: Masse de la balle : 5,00
 230: Force du coup: 3,54
 231: Direction du coup : 180,00
 232: <RUN>
 233: [Après le coup, la balle se déplace à 0,292m/s vers la droite.]
 234:
 235: MC2 : Quand la force du coup est plus basse que la masse, la balle continue. Puis, l'inverse, la balle ralentit...

446: P : Là, la balle a ralenti. Qu'est-ce qui pourrait faire ralentir une balle dans la réalité ? La balle avance jusqu'à ce qu'à un moment donné elle ralentisse. Ça ressemble un peu à ce qu'on vient de discuter. Mais, cette fois, la balle a ralenti de façon importante par rapport au coup que tu as donné. Qu'est-ce qui pourrait faire qu'un balle ralentirait ?
 452: MC2 : Si on ne la lance pas fort.
 453: P : Si on ne la lance pas fort. Le coup que l'on donne ici, il a une influence sur la vitesse ?
 455: <...5 secondes... sujet semble très confus>

942: P : 2,66. Tu avais dit 0,66. Qu'est-ce que tu avais pensé à ce moment ?
 944: MC2 : Parce que tantôt, j'avais que pour 1... Quand la masse de la balle est 1, chaque 1 de force du coup, c'est 1. Ça augmente de 1m/s. Quand la masse de la balle est 2, à chaque 1 de la force du coup, ça donne 0,5 pour la vitesse. Je me suis dit que pour 3, ça serait 1 divisé par 3, c'est-à-dire 0,33.
 949: P : OK, mais nous avons augmenté de 2 échelons, c'est pour ça que tu as dit 0,66. Par exemple, si on met 3 et 3 avec la direction 0,
 951: qu'est-ce que ça va donner ?
 952: MC2 : 4.
 953: P : Ça va donner 4.
 954: MC2 : Oui.
 955: P : Qu'est-ce que tu t'es dit quand tu as dit 4 ?
 956: MC2 : La vitesse initiale est de 1 plus le coup qui est donné de 3, ça fait 4.
 958: P : Avec une masse de 3, c'est ça ?
 959: MC2 : Euh...
 960: P : La masse n'est de 1. On avait que l'on faisait ça, pas avec une masse de 1, mais pour une masse <...?...>.
 962: <...10 secondes...>
 963: MC2 : 1,33.
 964: P : 1,33. Qu'est-ce que tu as calculé sur la calculatrice ?
 965: MC2 : J'ai fait 4, parce que j'avais dit 3+1, divisé par... Parce que la masse a triplé. Donc, j'ai fait 4 divisé par 3... Ça m'a donné 4,33.

Marco, situation 05, entrevue 6

183: MC2 : Parce que, si à 90, ça va à 45 et à 110, ça va à 55, j'ai vu qu'il y a une différence de 10 entre les deux pour 20 de la direction. Ça veut dire que si j'augmente de 40 la direction, ça va augmenter de 10 ici <M pointe le rapporteur d'angle>. Donc, pour que ça arrive, ça va être 175.

188:

189: Force du coup : 1,00

190: Direction du coup : 175,00

191:

192: P : Ça va arriver où ?

193: MC2 : À 90, parce que 150+20, ça fait 170. Ça va arriver au milieu des 2. Au lieu d'arriver à 95, je vais arriver à 90. Alors, je vais diviser... Ça va être 180.

196: <...5 secondes...>

197:

198: Force du coup : 1,00

199: Direction du coup : 175,00 <M choisit 180, puis retourne à 175.>

200:

201: MC2 : Je vais essayer ça parce que...

202: P : Là, tu as dit qu'à 175, on va arriver entre 80 et 90 ou alors à 90 ?

204: MC2 : Parce que, tantôt, à 180, la balle s'immobilisait au milieu. Et ici <M pointe la direction 75>, c'est 150 et ici <M pointe la direction 85 >, c'est 170. C'est sensé arriver sur le 90, à peu près.

289: MC2 : C'est un essai, parce que ce que j'ai dit tantôt, que chaque 10 degrés couvre -20 degrés, ça ne fonctionne pas, parce que -140 fois 2, ça ne se fait pas. Ça peut juste aller à 180 [?].

292: P : -140 fois 2, ça ne se peut pas.

426: MC2 : Bien, je sais que ça va par 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120,

427: 135, 150, 165, 180 [M pointe à chaque fois la valeur de direction

428: prévue sur le rapporteur : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100,

429: 110, 120]. 180, ça va être à -120.

430: P : 180, ça va arriver à -120. Mais, tantôt, 180, ça faisait

431: immobiliser la balle au sol.

432: MC2 : À 1. Je mets la direction à 180 [?].

433:

434: Force du coup : 2,00

435: Direction du coup : -180,00

436: <RUN>

437: [Après le coup, la direction de la trajectoire de la balle est de 180.]

466: MC2 : Parce que j'ai fait... Bien, ici, c'est 15... À chaque 10, c'est 15. Ça va être 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 <à chaque fois, M pointe dans l'ordre la direction 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et finalement 90>.

470:

471: Force du coup : 2,00

472: Direction du coup : 135,00

473: <RUN>

474:

475: P : Je pense que tu as oublié de mettre le «-».

648: P : Tu dis qu'au billard, on ne peut pas trouver la fleur par exemple.

650: MC2 : Parce qu'on ne peut pas frapper la balle par en arrière. <Avec le curseur, M suit la trajectoire initiale de la balle (boule blanche). Rendu à l'endroit où est porté le coup, M explique que la boule blanche ne peut pas frapper la boule au centre par derrière, c'est-à-dire de droite à gauche.> Parce que le plus qu'on peut la frapper, c'est sur le bord, sur le bord, sur le bord. Et elle va aller comme ça <M pointe la direction -90>. On ne peut pas la frapper de ce côté [M parle d'un coup vers la gauche].

658: P : On ne peut pas la frapper pour qu'elle revienne.

659: MC2 : C'est ça.

Quelques transcriptions du sujet de troisième secondaire, MAXIME

Maxime, situation 01, entrevue 1

230: I : Est-ce que tu pourrais me dire ce que tu entends par «frapper la balle»?
 232:
 233: MFD3 : Comme au base-ball.
 234:
 235: I : Comme au base-ball.
 236:
 237: MFD3 : Une balle, tu la frappes.
 238:
 239: I : Avec un bâton.
 240:
 241: MFD3 : Un bâton ou quand tu la lances.
 242:
 243: I : Ça revient au même?
 244:
 245: MFD3 : Oui.
 246: I : Si tu lances la balle ou si tu la frappes avec un objet, ça revient au même?
 248: MFD3 : Oui, à peu près. Avec un objet, peut-être que la balle peut aller plus vite et plus fort. Mais, ça revient au même. Ce ne sont que les valeurs qui vont changer.

687: MFD3 : Oui, mais cela ne me surprendrait pas non plus. Cela ne me déstabiliserait pas si la balle va moins vite parce que je me dirais que c'est comme ça.

721: I : Tu trouves la vitesse et le temps stressants?
 722:
 723: MFD3 : Oui, je n'aime pas tellement être stressé et me dire à quelle vitesse je dois aller, à quel heure. Je ne trouve pas que c'est quelque chose de très important.
 726:
 727: I : Dans cette situation là, tu trouves que la vitesse et le temps ne sont pas importants?
 729:
 730: MFD3 : Oui, c'est le résultat, je trouve, qui est plus important.
 731:
 732: I : Pour atteindre le résultat, est-ce que tu as besoin de la vitesse et du temps?
 734:
 735: MFD3 : Bien jusqu'à maintenant, je ne m'en suis pas servi et ça a fonctionné assez bien avec les autres <M pointe le flocon et le pique avec la souris>.
 738:
 739: I : Donc, tu juges que tu ne veux pas te stresser avec ça.
 740:
 741: MFD3 : Non.

1008: MFD3 : Bien, oui sûrement, mais...je ne visualise pas, j'ai fait ça assez vite. On dirait que c'était quasiment inconscient.
 1010:
 1011: I : Quasiment inconscient.
 1012:
 1013:
 1014: Force du coup : 5,5
 1015: Direction du coup : -167,50
 1016: <RUN>
 1017: [Après le coup, la balle se déplace à 2,750m/s dans la direction de -167,50]
 1019:
 1020:
 1021: MFD3 : Donc, 2,75. Ce n'est pas ça du tout. Ok, donc je vais essayer 6 comme force < 5 secondes >. Non, je vais essayer 6,5.
 1023: Encore là, on va voir
 1024:
 1025:
 1026: Force du coup : 6,5

1027: Direction du coup : -167,50
 1028: <RUN>
 1029: [Après le coup, la balle se déplace à 3,250m/s dans la direction de -
 1030: 167,50]
 1031:
 1032:
 1033: MFD3 : Donc, 3,25. Ce n'est pas si mal. Je vais essayer une force
 1034: de 7.
 1035:
 1036: I : Est-ce que tu as confiance en choisissant 7 ?
 1037:
 1038: MFD3 : Oui, quand même assez, mais encore là...
 1039:
 1040: I : C'est inconscient.
 1041:
 1042: MFD3 : Oui, un peu. Je mets 7, mais je ne vais pas m'enrager. Je ne
 1043: mets pas une part de moi-même dans cette réponse-là. Je laisse libre
 1044: toutes les erreurs qui peuvent arriver pour ne pas me stresser.

1292: MFD3 : Disons que j'ai plus confiance en une calculatrice pour des petits calculs comme ceux-là que quand
 je les fais dans ma tête même si je sais comment.
 1295:
 1296: I : Que dans ta tête.
 1297:
 1298: MFD3 : Parce que j'ai fait le raisonnement sur la calculatrice. Je pense qu'il y aurait moins de choses qui...
 1300:
 1301: I : Ok, question calcul tu es convaincu que tu vas faire moins
 1302: d'erreurs à cause de la calculatrice, mais indépendamment du calcul, comment as-tu choisi tes valeurs.
 Quelles valeurs as-tu choisies ?
 1304:
 1305: MFD3 : 3,56.
 1306:
 1307: I : Est-ce que tu pourrais l'indiquer à la force du coup pour qu'on ne la perde pas de vue ?
 1309:
 1310: MFD3 : Ok.
 1311:
 1312: I : Supposons que tu aurais été capable de faire ce calcul-là dans ta tête, c'est-à-dire 1,78...
 1314:
 1315: MFD3 : Multiplié par 2
 1316:
 1317: I : Est-ce que tu as confiance qu'on va atteindre la bonne vitesse de 1,78 avec cette force de coup-là ?
 Indépendamment du calcul
 1319: évidemment.
 1320:
 1321: MFD3 : Oui, j'ai confiance sauf encore là c'est comme les autres coups. S'il y a une erreur, je vais plus me
 dire « ok, c'est moi qui n'a pas compris. Ce n'est pas la situation, c'est de ma faute, c'est moi qui n'a pas
 compris."

1431: MFD3 : Oui. Parce que ça c'est un ordinateur donc c'est beau, mais dans la réalité, plus que tu veux que ça
 aille vite, il me semble que tu as besoin de beaucoup d'énergie pour propulser ça. Je ne sais pas si c'est
 vrai, mais...
 1435:
 1436: I : Très hypothétiquement, si on met une énergie infinie ?
 1437:
 1438: MFD3 : Supposons, je ne sais pas. Il me semble qu'on met plus d'énergie à faire fondre du plomb que du
 fer. C'est plus long à cause de je ne sais trop quoi, mais ça me paraît évident, mais ce n'est peut-être pas
 vrai. Je ne sais pas.

Maxime, situation 03, entrevue 3

1151: MFD3 : Oui. Je me suis dit que si elle on l'avait doublée < M parle de la force de l'étoile verte >, il fallait
 diviser par 2 la photo pour avoir ce que ça donne.
 1154:
 1155:
 1156: Force du coup : 2,00

1157: Photo : 0,50
 1158: Masse de la balle : 1,00
 1159: <RUN>
 1160: [Après le coup, la balle se déplace avec une masse de 1,00 avec une force de coup de 2,00 et une photo à 0,500m/s]
 1162:
 1163:
 1164: MFD3 : Ça a marché quand même.

1404: I : Tu prends la calculatrice ?
 1405:
 1406: MFD3 : Oui.
 1407:
 1408: I : Je veux juste que tu me dises ce que tu vas faire.
 1409:
 1410: MFD3 : Oui.
 1411:
 1412: I : Même si tu n'es pas sûr de tes calculs.
 1413:
 1414: MFD3 : Je fais juste 67 divisé par 2 donne 33,5. Peut-être que vu
 1415: que 67 divisé par 2 donne 33,5 et que...non, oublies ça. Je ne vois
 1416: pas. Je sais que c'est ça, mais...
 1417:
 1418: I : Tu crois qu'il y a quelque chose à voir, parce que tu viens de
 1419: dire que tu ne vois pas.
 1420:
 1421: MFD3 : Je ne sais pas...peut-être bien, mais est-ce que c'est
 1422: vraiment important vu qu'on le sait comment, mais pourquoi, ce
 1423: n'est qu'une interprétation...d'après moi.

Maxime, situation 03, entrevue 4

364: MFD3 : Vu que là, la force est à 0,75 et que la photo est à 0,65 et que je veux trouver quelle masse pour l'étoile verte, il faudrait peut-être voir comme...à la photo de 1, combien il manque de 1 pour avoir 0,65, donc moins...il va rester...0,35. Ici, 0,25 < pour la force >. Il faut que la somme des deux...je le rajoute à la masse.
 370:
 371: I : Tu le rajoutes à la masse.
 372:
 373: MFD3 : Je pense que ça marcherait.
 374:
 375: I : Tu t'es servi de la référence 1 ; 1 ; 1.
 376:
 377: MFD3 : Oui.
 378:
 379: I : Bon et tu as pris comme par exemple, si la force du coup est 0,75, tu as fait 1 moins 0,75 et ça t'a donné 0,25. Si tu as pris la photo, tu as fait 1 moins 0,65 et ça t'a donné 0,35. Maintenant, tu additionnes ces 2 valeurs-là et tu me dis qu'il va falloir que ?
 383:
 384: MFD3 : Que j'additionne le résultat des 2 valeurs additionnées à mon 1.
 386:
 387: I : À ton 1, au 1 de la masse.
 388:
 389: MFD3 : Oui. Au 1 de la masse.
 390:
 391: I : Et ça va donner quoi ? L'ombre va arriver où avec ça ?
 392:
 393: MFD3 : Je pense que ça va donner l'étoile verte...mais je veux l'essayer, ça ne sera pas long, je ne veux pas me tromper.
 395:
 396: I : Calculatrice, addition. 0,25 plus 0,35.
 397:
 398: MFD3 : Ça donne 0,6. Donc la masse devrait être 1,60, mais je vais regarder voir si ça marche.
 400:
 401: I : On prédit l'étoile verte.
 402:
 403: MFD3 : Oui, oui.

404:
 405:
 406: Force du coup : 0,75
 407: Photo : 0,65
 408: Masse de la balle : 1,60
 409: <RUN>
 410: [Après le coup, la balle se déplace avec une masse de 1,60 avec une force de coup de 0,75 et une photo à 0,650m/s]
 412:
 413:
 414: MFD3 : Donc ça n'a vraiment pas marché. < 5 secondes > Peut-être qu'à la place d'additionner mon 0,60, je le soustrais. Donc 0,40. Je vais voir ce que ça va me donner.
 417:
 418:
 419: Force du coup : 0,75
 420: Photo : 0,65
 421: Masse de la balle : 0,40
 422: <RUN>
 423: [Après le coup, la balle se déplace avec une masse de 0,40 avec une force de coup de 0,75 et une photo à 0,650m/s]
 425:
 426:
 427: MFD3 : Ok, même à ça, ça ne marche pas. Il faudrait que j'augmente un peu...0,60.
 429:
 430: I : 0,60.
 431:
 433: Force du coup : 0,75
 434: Photo : 0,65
 435: Masse de la balle : 0,60
 436: <RUN>
 437: [Après le coup, la balle se déplace avec une masse de 0,60 avec une force de coup de 0,75 et une photo à 0,650m/s]

Maxime, situation 04, entrevue 4

130: MFD3 : Ok. Il y a quelque chose que je trouve drôle parce que quand elle était à 4.5...
 132:
 133: I : 4,5, oui.
 134:
 135: MFD3 : Oui, la force du coup, c'était un grand coup et la vitesse de la balle était à 1.

Maxime, situation 04, entrevue 5

176: Force du coup : 4,50
 177: Masse de la balle : 5,00
 178: Direction du coup : 180,00
 179: <RUN>
 180: [Après le coup, la balle se déplace à 0,100m/s dans la direction de 180,00]
 182:
 183:
 184: MFD3 : Ok, elle n'était pas sensée revenir ? < la balle a dépassé la ligne « le coup est donné ici » >
 186:
 187: I : Bien nous, ce qu'on voulait c'était 0,1 vers la gauche. Est-ce que ça te surprend que ça soit allé par la droite ?
 189:
 190: MFD3 : Oui, parce que c'était marqué vers 180.
 191:
 192: I : Oui. Mais ce qu'on veut nous, c'est 0,1 vers la gauche.
 193:
 194: MFD3 : Ok. Donc...

252: MFD3 : Donc elle va revenir sur l'axe 180. Si ça l'avait été 0, elle aurait continué sur l'axe 0. C'est pour ça que...il me semble que c'était avec ça qu'il fallait changer. C'était 180 ou 0. Pourquoi que quand c'est marqué 180, elle continue ? Pourquoi elle continue là ? J'ai aucune idée.

577: MFD3 : Comme, si je voulais avoir 4, il fallait que je mette 5. À droite, il fallait que j'enlève 1. Si je voulais avoir 3, il fallait que je mette 2.

580:

581: I : Ok.

582:

583: MFD3 : Sauf que là, si tu me demandes vers la droite à 0,5 et que j'enlève 1, ça donne -0,5.

585:

586: I : Ok, c'est pour ça.

587:

588: MFD3 : C'est pour ça que j'avais mis négatif. Sauf que là, ça a l'air...je ne sais pas vraiment comment on pourrait avoir à 0,5 parce que la dernière c'est 0,0 et ça donne 1, donc ça part à 1 comme vitesse.

1100: je pensais qu'il fallait que je rajoute, mais plus maintenant.

1101:

1102: I : Ok...tu commences toujours à 3 et ça, ça correspond à une vitesse de...

1104:

1105: MFD3 : De 0.

1106:

1107: I : 0, tu dis que ça va donner une vitesse de 0.

1108:

1109: MFD3 : Oui.

1110:

1111: I : Et après, tu dis que tu ajoutes...

1112:

1113: MFD3 : C'était quoi déjà la vitesse ?

1114:

1115: I : 0,1.

1116:

1117: MFD3 : Je pense que...

1118:

1119: I : Si tu y vas selon ton raisonnement et que tu places...si tu mets la force du coup à 3, ça va donner 0 comme vitesse, c'est ça ?

1121:

1122: MFD3 : Bien, au moins 0 dans les entiers.

1497: I : Mais toi, tu dis que la balle s'en vient et que parce qu'on donne un coup à gauche, la balle va nécessairement avoir un moment où elle va arrêter et elle va repartir vers la gauche. C'est ça que tu dis ?

1501:

1502: MFD3 : Oui...oui. C'est un moment que...elle ne va pas ralentir ou rien. Elle va arrêter et repartir tout de suite.

1504:

1505: I : Ok.

1506:

1507: MFD3 : C'est un coup vraiment...

1508:

1509: I : Mais le coup, il va vers la gauche ou vers la droite dans cette situation-là ?

1511:

1512: MFD3 : Bien là, il va vers la droite.

1513:

1514: I : La balle va vers la droite et on porte un coup vers la gauche.

1550: MFD3 : Bien, peut-être aussi que vu que la balle s'en vient à 1 m/s, il faut que le coup soit assez fort pour pouvoir au moins...il faudrait que le coup fasse que la balle aille à 1 autre...1m/s. Quand le coup n'est pas assez fort, ça va plus la ralentir et elle va continuer pareil. Elle ne va pas...

1555:

1556: I : Quand le coup n'est pas assez ça va ralentir la balle. C'est ce que tu viens de dire ?

1558:

1559: MFD3 : Oui. C'est vrai. Je pense que c'est quand même...je ne sais pas si c'est comme au base-ball, mais...

Quelques transcriptions du sujet de quatrième secondaire, EMMANUEL

Emmanuel situation 02, entrevue 1

- 201: P : Avec une masse plus basse, dans la réalité, est-ce que ça se passe comme cela?
- 203: ÉC4 : Oui, si la balle... C'est comme le principe d'une balle de ping-pong et d'une balle de golf. Les deux ont à peu près la même taille, mais elles n'ont pas la même masse. L'une est vide; l'autre est pleine. Donc, la balle de golf est plus lourde; la balle de ping-pong est plus légère. Alors, si on donne une force égale pour les pousser, l'une devrait aller plus vite que l'autre : c'est la balle de golf.
- 210: P : C'est la balle de golf qui devrait aller plus moins.
- 211: ÉC4 : Parce qu'elle est plus lourde.
- 212: P : Par contre, elle va plus loin. Si on frappe une balle de golf et de ping-pong avec la même force...
- 214: ÉC4 : Il faut dire aussi que c'est à cause de la forme... Il y a aussi, il faut le dire, des courants d'air, des choses comme ça, peut-être que ça va ralentir la balle. Ou, s'il n'y a pas d'air du tout, c'est vrai que la balle de ping-pong, à cause de sa masse qui est basse, ne pourra pas conserver la force aussi longtemps que la balle de golf.
- 219: P : Conserver la force.
- 220: ÉC4 : La force qu'on met dedans... Là, nous n'avons pas de balle de ping-pong. Mais, si on pousse sur la balle de ping-pong, la force qu'on a mis dedans devrait être ressentie peut-être moins longtemps, Mais, si on prend la balle de golf, comme vous l'avez dit, si on la lance, elle va rouler plus longtemps, à cause du fait qu'elle est plus lourde. Alors, elle peut peut-être conserver la force plus longtemps, la force que l'on a mise dedans, elle va peut-être rouler plus longtemps.
- 228: P : Parce qu'elle est plus lourde, elle conserverait ça plus longtemps.
- 230: ÉC4 : Oui.

- 756: ÉC4 : J'ai pensé à une autre chose aussi. La balle de ping-pong, elle est vide. Elle contient de l'air. Donc, elle aurait peut-être plus tendance à suivre l'air. Donc, puisque l'air est plus présent à l'intérieur de la balle, la balle sera davantage portée à se diriger vers une direction moins précise. Donc, elle devrait rouler [?] moins longtemps aussi, parce que l'air qu'il y a à l'extérieur et à l'intérieur de la balle fait que la balle s'arrêtera avant.
- 763: P : OK, c'est l'air qu'il y a à l'intérieur.
- 764: ÉC4 : S'il n'y a pas d'air dans la balle de golf, s'il n'y a pas d'air à l'intérieur, donc l'air à l'extérieur ne devrait pas l'arrêter, ne devrait pas avoir le même effet que sur la balle de ping-pong.
- 767: P : Et si on avait, par exemple, dans la balle de ping-pong, si elle était pleine de plastique. Et puis, si on avait une autre balle de ping-pong, mais pleine d'acier. Il n'y a pas d'air dans ni l'une, ni l'autre. Pourtant, il y en a une plus lourde que l'autre. Tu es d'accord que la balle d'acier sera plus lourde. À ce moment, il n'y a pas d'air ni dans l'une, ni dans l'autre. Si on donne un coup de force égale sur les deux.
- 774: ÉC4 : Il n'y a pas d'air dans l'une, ni dans l'autre. Mais, l'air, en voulant dire la gravité ou l'air si vous voulez aura quand même un effet plus grand sur la plus petite, parce qu'elle est moins lourde. Celle qui est plus lourde combattra plus l'air, la gravité pour continuer son chemin.
- 779: P : Tu me parles de gravité, tu me parles d'air, tu m'as parlé aussi de courant d'air tantôt...
- 781: ÉC4 : Oui, si on fait ça dehors. Le golf, c'est dehors.
- 782: P : Effectivement, on ne fait pas ça dehors : on ne fait pas cela à l'intérieur, parce que ça pourrait causer un problème assez important! Tu me parles d'air, de gravité, de courant d'air. Ce sont des choses qui ne sont pas dans la balle.
- 786: ÉC4 : Mais qui affectent la balle.
- 787: P : Mais qui affectent la balle. Mais, tout à l'heure, tu m'as quand même dit, celle qui a plus de masse aura tendance à conserver la force qu'on lui donne plus longtemps. C'est quelque chose qui se passe à l'intérieur de la balle.
- 791: ÉC4 : À l'intérieur ou sur la balle. Je pourrais davantage dire que cela affecte la balle en tant que telle. Pas exactement l'intérieur ou l'extérieur, mais la balle en tant que telle est affectée par des facteurs comme les courants d'air, la gravité plus élevée ou la masse de la balle aussi selon ce qu'elle contient. Et, il y aurait peut-être autre chose aussi : le relief. Si le relief est plus penché vers le bas et si on fait descendre les balles (ou en mettant une
- 798: certaine force dans les balles, les deux égales), la plus lourde descendra plus vite, car elle est plus affectée par la gravité quand elle est en relief.
- 801: P : Si, par exemple, je monte en haut d'une tour, je prends les deux billes, celle en acier et celle en plastique, disons qu'elles possèdent la même taille, et je les lâche en bas de la Tour Eiffel disons, qu'est-ce qui va se passer?
- 805: ÉC4 : S'il n'y avait pas de vent, rien, techniquement, ce que je sais c'est que les deux devraient toucher le sol en même temps.
- 807: P : S'il n'y a pas de vent, tu sais, techniquement... Où as-tu appris cela?
- 809: ÉC4 : À la télévision.
- 810: P : À la télévision <rire>. Techniquement, donc, s'il n'y a pas de vent, les deux devraient arriver en même temps.
- 812: ÉC4 : La gravité est la même pour les deux. Donc, les deux sont affectées par la même gravité.

- 814: P : La gravité est la même pour les deux. Tantôt, tu m'as dit que la gravité affectera la plus lourde.
 816: ÉC4 : Sur un relief. Si on laisse tomber les deux balles dans le vide et qu'il n'y a pas de vent, rien, les deux devraient toucher le sol en même temps.
 819: P : La différence entre le relief et la chute libre est importante. Cela fait une différence importante si je comprends bien.
 821: ÉC4 : Oui, parce que, comme je disais, si on prend deux balles, une balle plus légère et une plus lourde, sur le relief, la balle la plus lourde descendra plus vite. C'est comme le principe des petites voitures en carton. Si tu mets un gros poids en avant de ton auto, elle descendra plus vite que la petite auto en carton qui est vide et qui a quelqu'un de moins lourd aussi dedans.
 827: P : OK.
 828: [...5 secondes...]
 829: P : Excuse-moi d'insister un peu. Je comprends très bien ce que tu veux dire. Je vais insister évidemment sur les petites que, moi, je ne comprends pas bien. Tu m'as que ce n'est pas la même chose sur un plan, disons un relief, que lorsqu'on lâche les deux balles. Mais, ce qui tire les balles en bas, dans un cas comme dans l'autre, dans la chute libre ou dans le relief, c'est quand même la gravité.
 835: ÉC4 : Oui, mais le relief aussi. Le relief, ce qui arrive, c'est que... Dans la chute libre, c'est dans le vide.
 837: P : Oui.
 838: ÉC4 : Sur le relief, il y a un sol, c'est-à-dire qu'il y a une partie de la surface de la balle qui est affectée par le relief, ce qui fait que ça modifie un peu l'effet de chute sur la balle d'après moi.

Emmanuel, situation 03, entrevue 2

- 148: ÉC4 : Avec la masse 1, la balle prenait 1 seconde pour se rendre à la ligne 4. Donc, avec la moitié de la masse, je me suis dit qu'elle va peut-être se rendre à 8, c'est-à-dire le double de la distance.

- 319: ÉC4 : Oui, c'est parce que je me suis dit qu'il en manque un peu : je peux ajouter 1/4. Mais, j'ai peur que ça fasse l'inverse, que la photo se prenne trop à gauche. J'essaie pour voir.

- 894: P : Mais, tantôt, tu as essayé de faire ça, une moitié pour l'étoile orange. Tu te souviens. On voulait passer de verte à bleue. Tu as essayé une moitié pour l'étoile orange et ça n'a pas fonctionné.
 896:
 897: ÉC4 : Non, c'est parce que, tantôt, on avait dans l'idée que c'était plus vers le bas. Mais, en réalité, je joue avec la force du coup et la balle se rend. Ça joue en faveur d'un relief plat avec la force et la photo. Mais, la masse de la balle, c'est comme s'il y avait un relief.

- 1256: ÉC4 : Donc, ça c'était 3 parties. Mais, quand je le divisais pas, ça ne marchait pas. Alors, je me suis dit : je vais l'inverser. Je vais multiplier par 3. Tout ce que j'avais fait, c'est de multiplier par 3. Et, après, j'avais multiplié par 2 le nombre que je voulais. Là, ici... C'est vrai. Tout ce que je voulais faire... J'avais fait 3 parties... Je ne me rappelle déjà plus de ce que j'avais fait. Bon, j'avais divisé... Il y avait 3 parties. J'ai fait les 3 parties multipliées par... J'ai divisé par 3 et j'ai multiplié par 2.

Emmanuel, situation 03, entrevue 3

- 286: É : Oui, mais c'est sûr que, comme je disais la dernière fois, si c'était plat, ça serait ça. Mais, il y a toujours l'hypothèse d'un relief

Emmanuel, Situation 04, entrevue 3

- 816: P : Sans faire RUN. Juste en se demandant ce que ça va donner.
 818: É : Ce que ça va faire c'est qu'ici ça fait toujours -1. À une force du coup est 2, la balle est allée à une vitesse de 2. La balle est allée à la même vitesse que la masse. Donc, peut-être que la balle arrivera à une vitesse de 1 et repartira à une vitesse de 1.
 823:
 824: Masse de la balle : 2,00
 825: Force du coup : 2,00
 826: Direction du coup : 180,00
 827: <RUN>
 828: [Après le coup, la balle s'immobilise.]
 829:
 830: É : La balle s'est arrêtée. Avec une masse de 2, ça a été -2. Et de ce côté... OK, je vais essayer. Je vais remettre le côté 0.
 832:

833: Masse de la balle : 2,00
 834: Force du coup : 2,00
 835: Direction du coup : 0,00
 836:
 837: É : Une force de 3. Est-ce bien cela que j'ai pensé? Je vais essayer. Quand la force est 3 et une masse de 2, la balle revient à 3 de l'autre côté.
 840: P : À 3.
 841:
 842: Masse de la balle : 2,00
 843: Force du coup : 3,00
 844: Direction du coup : 0,00
 845: <RUN>
 846: [Après le coup, la balle se déplace à une vitesse de 2,500m/s vers la droite.]
 848:
 849: É : Non, ça ne fonctionne pas. C'est vrai que ça fait toujours quelque chose [?]. Ce n'était pas cela. Je vais remettre la force à 2 et je vais essayer de changer la masse à 3 pour voir si c'est ce que je pense.
 853:
 854: Masse de la balle : 3,00
 855: Force du coup : 2,00
 856: Direction du coup : 0,00
 857: <RUN>
 858: [Après le coup, la balle se déplace à une vitesse de 1,667m/s vers la droite.]
 860:
 861: É : Ah bien, là, attends une minute.
 862: P : Qu'est-ce que tu voulais vérifier?
 863: É : À un moment donné, j'ai pensé que, parce que je mets les deux valeurs à 2, du côté droit, ça allait être pareil si les deux étaient pareils. Mais, j'ai augmenté la masse et la balle est allée moins vite, au lieu de ce que j'avais dit: c'est comme une balle en caoutchouc, si elle est plus lourde, elle va rebondir plus rapidement. Vous savez, comme une super balle.
 869: P : Oui.

1034: É : Si ça fait vraiment entre les deux chiffres... Si la masse est plus basse et la force plus haute, si la force est le double de la masse, la vitesse obtenue par la poussée du côté 0 est entre les deux nombres.
 1038: P : Entre les deux nombres. Tu dis que c'est 4,5.
 1039: É : Entre les deux, il y a 3. La moitié de 3, c'est 1,5. Donc, 3+1,5 ou 6-1,5, ça fait 4,5.
 1041: P : Est-ce que tu as bonne confiance que cela fonctionne?
 1042: É : Je vais essayer, parce que ça a fonctionné tantôt.
 1043:
 1044: Masse de la balle : 3,00
 1045: Force du coup : 6,00
 1046: Direction du coup : 0,00
 1047: <RUN>
 1048: [Après le coup, la balle se déplace à une vitesse de 3,000m/s vers la droite.]
 1050:
 1051: É : Non, ça fait toujours une vitesse de 3. Là, on arrive avec une autre affaire de +2. Si tu mets le double, n'importe quel, si je mets 1 et 2, ça va donner une vitesse de 3. Tantôt, si je mettais 1 pour la masse et 2 pour la force du coup, ça donnait +1 à la force.

Emmanuel, situation 04, entrevue 4

149: ÉC4 : La dernière fois, je n'ai pas plus réussi à savoir pourquoi. Comme j'avais dit, j'avais trouvé comme raison au début que... On envoie une balle au centre. Comme je disais, tout se passe ici, au centre. Quand la masse arrive au centre, elle est à 5kg et la force du coup est de 5kg aussi, normalement, ça devrait s'annuler. Mais, ce qui arrive, c'est que la balle continue, mais toujours à la même vitesse, peu importe la masse et la force, si elles sont pareilles. Je n'ai pas trouvé de raison logique.

338: ÉC4 : C'est ça, 180 [?]. 3 et 4, sauf que... Je vais essayer la méthode d'avant; nous allons voir ce que ça va donner. Une différence de 1, sauf que maintenant c'est +1. Je n'ai aucune idée si ça va marcher. C'est 1/4. La vitesse sera de 0,25 encore. Mais, je suis sûr que ça ne marchera pas.
 343:
 344: Masse de la balle : 4,00
 345: Force du coup : 3,00
 346: Direction du coup : 180,00
 347: <RUN>
 348: [Après le coup, la balle se déplace à une vitesse de 0,250m/s vers la droite.]

350:

351: ÉC4 : Mais, la balle continue de l'autre côté. Une vitesse de 0,25, mais du côté droit.

353: P : Est-ce normal?

354: ÉC4 : Bien, je crois que oui. C'est ça qui arrive. Quand la force est plus grande que la masse, la balle rebondit du côté gauche. Quand la masse est plus grande que la force du coup, la même méthode fonctionne encore, mais la balle ne rebondira pas : elle continuera tout droit avec la même force que si c'était l'inverse.

Emmanuel, situation 05, entrevue 5

161: ÉC4: Mais, je n'ai pas essayé dans les valeurs négatives comme -170. Il y a des chances qu'il se produise la même chose, mais du côté négatif. Donc, si la balle ne va pas du côté positif, je n'ai pas tout de suite d'idée pour atteindre l'étoile.

166:

167: Force du coup : 1,00

168: Direction du coup : -170,00

169: <RUN>

170: [Après le coup, la balle se déplace à une vitesse de 0,174m/s dans la direction -86.]

172:

173: ÉC4 : La balle va atteindre 83.

174: P : Nous avons donc sensiblement la même chose.

175: ÉC4 : Oui, sauf que c'est de l'autre côté.

Quelques transcriptions du sujet de cinquième secondaire, MARIE

Marie, Situation 02, entrevue 1

239: MF5 : Oui, mais faut que je te l'explique...

240:

241: I : Oui, c'est parfait

242:

243: MF5 : Donc, on va faire ça et puis on va essayer de mettre la force de la balle à quelque chose qui ressemble à 1,2... par instinct... et donc faire run...

299: MF5 : Et on voit que ça va pas plus loin...donc j'imagine que... soit je vais devoir la augmenter force, soit je vais devoir diminuer la masse de la balle...

302:

303: I : Diminuer la masse de la balle...

304:

305: MF5 : Oui, parce que si c'est moins lourd, ça va aller... ben... avec la même force... quand c'est moins lourd, ça va plus vite...

307:

308: I : Est-ce qu'il y a un exemple que tu pourrais me donner dans...?

309:

310: MF5 : Dans la vie quotidienne ?

311:

312: I : oui

313:

314: MF5 : ...Si j'essaie de pousser mon père sur son carrosse ou un petit bébé, j'ai l'impression que ça va être plus facile de pousser le petit bébé...

317:

318: I : Ok (rires) c'est très bien illustré... mais y'en a qui vont me dire que si on pousse par exemple une boule de quilles, elle va rouler beaucoup plus longtemps qu'une boule de styromousse....

321:

322: MF5 : Ah, mais dans le vide (...)

323:

324: I : Dans le vide

325:

326: MF5 : Dans le vide ? la boule de quilles est dans le vide ? (...) friction

328:

329: I : À date on a pas mis de friction...

Marie, situation 02, entrevue 2

84: MF5 : Ben c'est parce que c'était ici, la petite balle orange était ici... la photo était là, donc je me suis dit 2, c'est plus gros, mais comme c'est pas exactement le double parce que je me souviens que l'autre fois, c'était pas exactement le double de la chose... J'ai décidé d'essayer 2 comme ça...

Marie, situation 03, entrevue 2

374: MF5 : Ben là, je sais qu'avec la masse de la balle, c'est plus fourrant parce que... quand tu peux la mettre plus légère, ça avance super vite... pis quand t'as mets plus lourd (...) Là, ce que je vais faire, le but, c'est de trouver des proportions, j'imagine, ce qui va faire qu'on va pouvoir réussir du premier coup. Donc, on va essayer la masse de la balle, en la mettant à 1,5... 1,5 qui serait pas doubler, parce que je me souviens qu'avec la masse, fallait moins que doubler pour faire à peu près le double de la distance

382:

383: I : ... Fallait moins que doubler pour faire à peu près le double de la distance...

385:

386: MF5 : Ouais

387:

388: I : On va pouvoir le vérifier là... avec les valeurs, là...

389:

390: MF5 : On va mettre à 1,5

391:

392: I : ...1,5...

393:

394: MF5 : oui...NON, c'est 0,5 qu'il faut que je mette, je me suis trompée... 0,5 pour qu'elle soit plus légère, (...)

396:

397: I : Donc, tu l'as fait passer de 1 à 0,5... et t'espères que ça se rende sur l'étoile bleue...

399:
 400: MF5: Oui, je pense que... ah ben oui, ça marche
 401:
 402: Masse de la balle : 0,5
 403: Force du coup : 1
 404: Photo (délai-ombre) : 1
 405: <RUN>

454: MF5 : Ben, je me suis dit, parce que je me souviens que tantôt, ça marchait pas mes trucs de doubler, puis tripler... (rires)... bon, tantôt, on disait, avec l'autre situation...c'est... fallait que j'augmente plus la masse de la balle pour que... la vitesse diminue... que... il fallait que je diminue la valeur de la balle pour que le vitesse augmente, alors, là, mais ici ça fait, parce que j'ai doublé, [ce qui veut dire que j'ai passé de 1 à 2], mais tantôt, j'ai divisé par 2, c'est-à-dire que j'ai passé de 1 à 0,5. Les proportions restent les mêmes, mais les chiffres sont plus gros.

533: MF5 : (...) Une demie et un quart par rapport à l'étoile verte... Ça fait qu'ici fallait que je multiplie par deux, (...), ben ici je vais multiplier par 4, pis ça va donner la même affaire, d'accord ? Ben, quand je vais être rendue à l'étoile rouge, je vais être fourrée, mais (...)

574: I : Puis, quelle masse ça prendrait pour la balle, elle bouge pas patoute...?
 576:
 577: MF5 : ...Ça se peut pas !
 578:
 579: I : ...Ça se peut pas ?
 580:
 581: MF5 : D'après moi, ça se peut pas...elle va tout le temps bouger (...) tellement tellement tellement pas beaucoup
 583:
 584: I : Donc, y'a...
 585:
 586: MF5 : C'est comme en sciences physiques... Ça arrête jamais de se diviser (...)
 588:
 589: I : Ça arrête jamais de se diviser

707: MF5: Elle est dure, la foutue étoile rouge...

Marie, situation 03, entrevue 3

339: MF5 : Ah non, pas la rouge... La rouge, elle se trouve à être aux trois quarts. Ça voudrait dire multiplié par 4 divisé par 3... ça se peut-t'y ça ? (rires)

492: I : ...au quart...
 493:
 494: MF5: Ben, au quart de la distance...<origine à bleue>
 495:
 496: I : Mais moi je pense que le quart de la distance de 0 à 8, moi je pense que c'est l'étoile jaune.
 498:
 499: MF5: Ben oui, mais le quart, mais pas de d'là... <bleue>
 500:
 501: I : Ok, au quart à partir de d'là...
 502:
 503: MF5: Mais là, ça fait le 3 quarts.... Comme tantôt j'étais aux 3 quarts de ma rouge. Je me complique la vie pour rien, je pense, avec ma bleue... Mais je vais essayer quand même! Là, je suis aux 3 quarts... Je suis rendue à 1 ici <masse>, là je suis rendue aux 3 quarts. Non, faut que j'aie aux 3 quarts... donc... 3 quarts... donc je vais... je vais... si je me rends... euh...non... Je pense que je vais oublier la bleue... Je vais recommencer à la verte.

524: MF5: bon... Alors, en partant de la bleue, je me rendrais là <noire> en multipliant par 1<ligne du 7>,2 <ligne

du 6>3 <ligne du 5>4 <ligne du 4>5 <ligne du 3>6 <ligne du 2>7 <ligne du 1>... En multipliant par 7...

- 528:
 529: I : Mais là, le point de départ, c'est la verte ?
 530:
 531: MF5: Oui...Mais là, je suis retourné à la bleue (rires)
 532:
 533: I : On fait une fixation dessus... ici, notre point de départ, c'est bien 2...2...1... alors c'est la verte
 535:
 536: MF5: Ok...
 537:
 538: I : De la verte à la orange... On est restés trop longtemps de la bleue... on en a fait... le centre de l'univers
 540:
 541: MF5: ... oui, mais c'est parce que tu vois, là mon raisonnement c'est... en partant de loin pour me rendre proche...
 543:
 544: I : Ah, ok, c'est le but ?
 545:
 546: MF5: C'est ça... Ben, je m'en suis pas rendu compte, mais (...) c'est ça, ma fixation. Mais je pense que le but c'est aussi de partir de d'là <verte> pour me rendre là <orange>... Bon, fait que si, pour partir de d'là <verte> pour me rendre là <noire>, j'avais fait... fois ça.. tu me comprends pas ?

659: MF5: Sauf que c'est pas la bonne... la rouge, sa valeur est pas mal... euh... pas précise

- 566: I : Le divisé par 4, on sait où il nous mène... Le divisé pas 4...
 567:
 568: MF5: Fois 4
 569:
 570: I : ...le fois 4... donc, tu veux faire fois 4... ensuite quoi ?
 571:
 572: MF5: (rires) Attends tu me mêles. Fois 4 <noire>... divisé par 3 <rouge>... par 4 <bleue>... fois 2 <orange>
 574:
 575: I : Ok...
 576:
 577: MF5: Mais... là, ça donnerait 1 <masse> pis je pense pas que 1 ça mène là...
 579:
 580: I : T'essaie de reproduire ce que t'as fait à gauche.. sur ce que qui se passe à droite.... ?
 582:
 583: MF5: Ouais c'est ça... Mais je vais mettre 1 pour essayer.

- 783: I : Est-ce que ça veut dire faire "moins 2 tiers " ou ça veut dire "divisé par 2 tiers" ?
 785:
 786: MF5: Ben là, je pensais à faire "moins 2 tiers" parce que... parce que avec la force du coup j'avais fait "plus"... mais là je me suis dit qu'il faut faire moins... Sauf que depuis tantôt avec la masse, je divise, fait que je trouve pas ça très logique...

Marie, situation 04, entrevue 4

- 239: MF5 : Ben, c'est un coup avec quoi que tu donnes, là ? Parce que (...)...
 241:
 242: I : Ça pose un problème, ça ?
 243:
 244: MF5 : Ben, c'est parce que mettons que je donne un coup avec une grande plaque de métal que tu vois pas sur ton enregistrement, ben, la balle cogne dessus, mais elle peut pas passer à travers pour continuer son chemin...
 248:
 249: I : Qu'est-ce que ça pourrait être par exemple ce coup-là dans ce cas-là pour qu'elle ralentisse ?
 251:
 252: MF5 : Ben, ça pourrait être un coup de vent...
 253:
 254: I : Ok...un coup de vent...
 255:
 256: MF5 : Une force que c'est pas avec un objet... Parce que... la balle peut pas traverser l'objet... mais mettons que c'est une force comme du vent ou... tu tires avec une corde...

259:
 260: I : Ça pourrait faire le même rôle qu'un coup de vent, ça...?
 261:
 262: MF5 : Ouais...
 263:
 264: I : Il y a quelqu'un qui m'avais suggéré, tu me diras si t'es d'accord avec lui, dans une entrevue, il m'avait dit: on peut imaginer une "mitte": un "mitte" de Base-ball... pour attraper la balle... Et la balle va tellement vite que ça perce la "mitte"... La balle va ralentir sans rebondir.
 269:
 270: MF5 : Ouais... Faudrait que ça aille vite, là... ça marche pas tout le temps...
 272:
 273: I : À cette vitesse là, ça fonctionnerait probablement pas... À moins d'avoir une "mitte" en papier de soie... ou en toile d'araignée...
 275:
 276: MF5 : Ou en en hosties.. tu sais les retailles d'hosties (rires)

521: MF5 : Ok... Fait que là, elle s'en va à 1... mais là, elle est plus lourde... Fait que là, elle est plus dure à arrêter... Fait que ça prend (ben, selon moi) un coup plus fort <vers la droite>... quand ça s'en va dans la même direction... Ma première hypothèse est que en s'en allant dans cette direction comme ça, une petite poussée<vers la droite>, ça va la faire aller quand même assez vite rapidement parce que elle est déjà en mouvement dans ce sens là...
 528:
 529: I : Ok... Donc, le mouvement initial est important...
 530:
 531: MF5 : Oui...
 532:
 533: I : Puis la masse aussi...
 534:
 535: MF5 : Oui... Tandis que quand il va falloir la faire aller par là<gauche>, ça va prendre un plus gros coup que tantôt par rapport à lui<droite>, parce qu'elle va être plus dure à immobiliser... Parce qu'elle bouge déjà dans la même vitesse mais elle est plus grosse...

705: MF5 : Ok, fait que là, dans le fond, faut que je m'en aille à 180... je m'en vais à 180... puis là, j'avance à 1m/s... fait que faut que j'enlève 1,2... non... oui... si j'enlève 1, ça va aller là<intersection>... ben, j'enlève ou j'ajoute, là ? J'ajoute... Je m'en vais à 180... Si j'ajoute 1 ça va... Non, tu t'immobilises pas à 1... parce que... (...) fait que...
 711:
 712: I : Tu veux toujours chercher à savoir avant où est-ce que ça s'immobilise...
 714:
 715: MF5 : Oui, hein...
 716:
 717: I : (...)
 718:
 719: MF5 : mais, ok, on va chercher ce raisonnement là, c'est une bonne piste... Si je fais 2...1 divisé par 2, ça fait 0,5. Ça fait que faut que j'ajoute 0,5 à 1... comme on dit... (...) 1,5...
 722:
 723: Masse de la balle : 2
 724: Force du coup : 1,5
 725: Direction du coup : 180
 726: <RUN> <la balle sort à droite à 0,25m/s>
 727:
 728: MF5 : Ah ça marche pas ! Ah non.... c'est pas comme les étoiles rouges...comment ça que ça marche pas.?.
 730:
 731: I : Comment ça... que c'est pas comme l'étoile rouge ?
 732:
 733: MF5 : (rires) non...
 734:
 735: I : Ok, c'est juste...(rires) compliqué parce que c'est comme l'étoile rouge...
 737:
 738: MF5 : Oui
 739:
 740: I : Je t'avais demandé d'aller à gauche, hein ???
 741:
 742: MF5 : Oui, mais là, je cherchais à l'immobiliser
 743:

744: I : Ok... tu cherchais à l'immobiliser
745:
746: MF5 : Oui... Ok, je vais essayer 2 d'abord parce que...
747:
748: I : (...) Mais là, t'essaie 2, là...
749:
750: MF5 : Oui. Parce que ça fait 2...2...2... (rires)
751:
752: I : Oui, mais, (rires) à part des soucis d'esthétique, là...
753:
754: MF5 : Non, mais (rires). Peut-être que vu que ça s'en vient à 2, ben en mettant à 2, ça va arrêter... ça s'annule...
756:
757: I : Parce que ça s'annule... 2 et 2 ça s'annule...
758:
759: MF5 : Oui, mais parce qu'ils s'en vont dans le sens (...)
760:
761: I : Mais là, t'as comme lâché la raisonement de tantôt
762:
763: MF5 : Oui
764:
765: I : C'est-y la fatigue qui fait ça ? Ou si...
766:
767: MF5 : Non, parce que là, j'ai essayé, puis ça marchait plus. puis je me suis découragée.
769:
770: I : Déjà ? (rires) T'avais essayé de faire quoi déjà ?
771:
772: MF5 : Ben, je me suis dit: là, je m'en vais à 1 <vers la droite>, puis c'est 2, fait que là, j'ajoute la moitié de 1, qui est 0,5, pour que ça arrête, mais ça a pas arrêté...
775:
776: I : Ça a pas arrêté... Tu voulais rajouter le moitié de 1, pour que ça s'arrête, ajouter 0,5...
778:
779: MF5 : Oui...
780:
781: I : Ajouter 0,5 à quoi ?
782:
783: MF5 : À 1...
784:
785: I : À 1... c'aurait fait 1,5
786:
787: MF5 : C'est t'y ça à 1 ? Fallait que je rajoute ? Oui...
788:
789: I : Disons que si tu reprenais ton raisonnement... avec le 2 ici on va obtenir... Ça va être quoi le raisonnement qui va donner jusqu'à la bonne vitesse ?
792:
793: MF5 : Ok, ici <force du coup> ça veut dire que 2...on enlève la moitié de 2, ça fait 1... Fait qu'ici <origine>, je vais ajouter 2, fait que ... ben là <direction> je vais retourner à zéro, là... non (...), bon, attends... Bon, là je m'en viens à 1, fait qu'il faut que... ben oui, c'est ça, c'est 2...
798:
799: I : C'est 2...
800:
801: MF5 : ben je m'en viens à 1, fait qu'il faut que je mette 1 pour le contrer...
803:
804: I : Ok... oui 1 pour le contrer
805:
806: MF5 : Ben là, vu que la masse, c'est 2, ben la force du coup faut que ce soit la moitié de... ce que je vais ajouter, ça va être la moitié de la force du coup, fait que ça va être 2...Je vais essayer
809:
810: Masse de la balle : 2
811: Force du coup : 2
812: Direction du coup : 180
813: <RUN> <la balle s'immobilise>
814:
816: MF5 : Hein, hein, l'esthétique...(rires)

Marie, situation 04, entrevue 5

103: MF5 : Ben, je me suis dit... c'est parce que tantôt c'était une... addition... euh... soustraction... OK ? parce que là, j'avais ça à 1m/s... si j'avais 1m/s... ça fait comme la même force qui pousse des deux côtés. Fait que

ça reste là... Là, si je m'en viens... à 1m/s<vers la droite> plus une force de 3... ben y'a ma force de 1 qui immobilise plus une force de 2 qui la fait partir à 2 fois sa vitesse<vers la gauche> ... tu comprends ?

110:

111: I : Oui

1082: Masse de la balle : 5

1083: Force du coup : 3,84

1084: Direction du coup : 0

1085: <RUN> <le balle sort à droite à 1,768m/s>

1086:

1087: MF5 : Oh, non...oh non... Je suis découragée...

1088:

1089: I : Qu'est-ce qui t'a porté à faire l'opération inverse? De prendre la masse puis de la diviser par la force... Y'a sûrement quelque chose en particulier puisque tu l'as fait...

1092:

1093: MF5 : L'instinct...

1094:

1095: I : L'instinct? Comment ça...

1096:

1097: MF5 : Ben, vu que j'avais fait ça<force> par ça<masse>, je me suis dit: peut-être l'autre bord ça va être ça<masse> par ça<force>...

Marie, situation 05, entrevue 5

450: MF5 : Ben il s'immobilisait, mais avec une plus grande force, à 180 il revenait sur lui... Fait que je me suis dit: s'il s'en va par là<vers les directions 70>, il s'en va de même, il a pas l'air débalancé..., puis à 180, oups!, il s'arrête, ou il s'en retourne par là<gauche>, fait que (...)

Marie, situation 05, entrevue 6

888: Force du coup : 0,01

889: Direction du coup : -90

890: <RUN> <la balle prend la direction -1 à 1,000m/s>

891:

892: MF5 : Heille! Ça l'a fait en dessous...

893:

894: I : Ça l'a fait en dessous...

895:

896: MF5 : (rires) Ben, c'est en dessous.

897:

898: I : Le coup a été donné dans quelle direction?

899:

900: MF5 : Ben, par là<vers la droite>

901:

902: I : Heu, le coup, il a été donné vers la droite? vers le zéro?

903:

904: MF5 : Heu... bonne question...

905:

906: I : Ben, à quelle direction tu l'as commandé le coup?

907:

908: MF5 : à -90

990: MF5 : Bon... fait que si on fait 90 divisé par 4... ça donne 22,5

991:

992: I : Là, t'as fait 90 divisé par 4... Qu'est-ce qui t'as poussé à faire ça.

993:

994: MF5 : Parce que tantôt, 90 divisé par 2, ça faisait 45, ben, là, 90 divisé par 4, ça fait 22,5, puis 90-22,5, ça va donner à peu près 62,5... non... 90-22,5... ça donne 67,5... ça marche pas...

997:

998: I : Donc...

999:

1000: MF5 : Donc, c'est pas précis encore.!

1001:

1002: I : C'est pas précis encore... On demande 90 avec une force de 2, on obtient 62,5... tu dis?

1004:
1005: MF5 : Ouais...
1006:
1007: I : Avec ça, est-ce que tu serais capable d'évaluer une direction pour toucher le flocon, par exemple?
1009:
1010: MF5 : Probablement... 90, bon, (...) Mais, là, je sais pas comment faire... ça fait à peu près 55<direction du flocon>...
1012:
1013: I : Mmm...
1014:
1015: MF5 : 55... 55... quoi... un quart... plus 55... ça donne 68,75...
1016:
1017: I : On essaie...
1018:
1019: MF5 : Ben oui... 68,75, on peut mettre 69, là dessus...
1020:
1021: I : As-tu bonne confiance, là-dessus?
1022:
1023: MF5 : Moyennement...
1024:
1025: Force du coup : 2
1026: Direction du coup : 69
1027: <RUN> <la balle prend la direction 47 à 2,536m/s>
1028:
1029: MF5 : Non... pas vraiment...
1030:
1031: I : Va falloir augmenter ou réduire?
1032:
1033: MF5 : Ben, augmenter... Fait que là, je comprend pas plus ce qui se passe...
1037:
1038: Force du coup : 2
1039: Direction du coup : 75
1040:
1041: MF5 : Je sais pas pourquoi... parce que ça me tente et puis que c'est beau...
1043:
1044: Force du coup : 2
1045: Direction du coup : 75
1046: <RUN> <la balle prend la direction 51 à 2,457m/s>
1047:
1048: I : On s'en rapproche, en tous cas...
1049:
1050: MF5 : Ben, on est dessus... Ça prend plus que ça? (soupir) 77... Ben avec ça: vive essais-erreurs, hein?