

Direction des bibliothèques

AVIS

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

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

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

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

NOTICE

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

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

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

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

Université de Montréal

Du changement conceptuel à
la complexification conceptuelle
dans l'apprentissage des sciences

par
Michel Bélanger

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

décembre 2008



© Michel Bélanger, 2008

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse, intitulée :
Du changement conceptuel à
la complexification conceptuelle
dans l'apprentissage des sciences

présentée par :
Michel Bélanger

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Marcel Thouin	Directeur de recherche
Serge Robert	Codirecteur de recherche
France Caron	Présidente-rapporteuse
Marie-Françoise Legendre	Membre du jury
Pierre Poirier	Examineur externe
Jesus Vazquez-Abad	Représentant du doyen de la FES

RÉSUMÉ

L'apprentissage scientifique a souvent été conçu comme un processus de remplacement, nos idées spontanées faisant faire place aux idées scientifiques. Plusieurs modèles psychologiques d'apprentissage ont été formulés en ce sens. Mais cette pensée initiale s'est montrée plus persistante que ce que plusieurs étaient prêts à admettre. Plusieurs chercheurs ont conclu à l'existence, chez les élèves, d'une étrange combinaison d'idées tantôt intuitives, tantôt scientifiques.

De manière générale, le phénomène des « conceptions multiples » fait référence à la possession par l'apprenant d'une palette d'alternatives conceptuelles incompatibles, chacune ayant son contexte de pertinence. Certains chercheurs en didactique des sciences ont tenté de modéliser ce phénomène, mais à notre avis peu est encore connu sur un de ses aspects important : le fait que ces conceptions alternatives ne sont pas isolées au sein de la structure cognitive, mais plutôt intégrées par diverses structures intermédiaires. Par cette intégration, les conceptions alternatives se trouvent à former un complexe, d'où l'appellation « complexification conceptuelle » que nous employons pour désigner cet apprentissage.

En nous inspirant de la littérature sur le changement conceptuel et de certaines théories épistémologiques, nous proposons dans cette recherche cinq types de structures cognitives pouvant servir d'intermédiaire entre les conceptions alternatives et permettant ainsi de gérer leur multiplicité : descriptives, évaluatives, explicatives, transformatives et décisionnelles.

Dans le volet empirique de la recherche, nous explorons les structures décisionnelles, lesquelles sont responsables de la sélection d'une alternative conceptuelle parmi celles disponibles. Pour ce faire, nous soumettons à huit étudiants collégiaux et universitaires deux types de tâches. Le premier consiste à vulgariser certains phénomènes physiques et biologiques à des publics fictifs de différents âges (6 à 15 ans); le second porte sur la compréhension de l'expérience des fentes de Young dans le cas des électrons. L'analyse des réponses des étudiants suggèrent qu'ils font appel à deux manières différentes de choisir parmi les diverses possibilités conceptuelles à leur disposition.

Au cours de cette thèse, nous effleurons plusieurs thèmes connexes en didactique des sciences. Le modèle de complexification conceptuelle que nous proposons pourrait constituer un cadre théorique intéressant pour leur étude ultérieure.

Mots-clés : changement conceptuel, conceptions multiples, complexification conceptuelle, didactique de la mécanique quantique, vulgarisation, histoire des sciences.

ABSTRACT

Science learning has often been thought as a replacement process: learners' spontaneous ideas must be replaced by scientific ones. Many learning models in science education were formulated in this way (at least implicitly). But these spontaneous ideas proved to be more resistant than initially thought. Several researchers concluded that students often possess an odd combination of intuitive and scientific ideas.

Generally, the phenomenon of "multiple conceptions" refers to students having a repertoire of different conceptions, each associated with a context of relevance. A number of researchers in science education constructed models of this phenomenon, but none included a systematic treatment of what we consider one of its most important aspects: the fact that these multiple conceptions are not isolated within the cognitive structure, but integrated into a whole in many ways. This whole constitute a complex of conceptions, whence our utilisation of the expression "conceptual complexification" to designate this form of learning.

Using ideas in the conceptual change literature and in philosophy of science, we propose five kinds of cognitive structures that could play an intermediary role between alternative conceptions, allowing the management of their multiplicity: descriptive, evaluative, explicative, transformative, and decisional.

In the empirical section of the research, we explore specifically decisional structures, which are responsible for the selection of one conception of the repertoire. In order to do so, we submitted two series of tasks to eight collegial and undergraduate students in two situations. In the first tasks, subjects are asked to explain three phenomena (one biological and two physical) to fictive audiences of various ages (6 to 15 years old). In the second tasks, students' understanding of the quantum version of the Young's interference experiment is probed in order study their understanding of the demarcation between quantum and classical mechanics. In these two situations, students appear to make use of two different strategies for selecting between alternative conceptions.

Many topics of science education are briefly touched in this research. The conceptual complexification model that we propose could constitute an interesting theoretical framework for their future study.

Keywords: conceptual change, multiple conceptions, conceptual complexification, quantum mechanic learning, popularization, history of science.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	v
Abstract.....	vi
Table des matières	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Remerciements	xii
CHAPITRE 1 - PROBLÉMATIQUE	1
1.1 INTRODUCTION.....	1
1.2 LA CONFUSION DANS L'APPRENTISSAGE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE	5
1.2.1 Quelques difficultés d'apprentissage.....	5
1.2.2 Les approches d'enseignement pour gérer la transition.....	9
1.3 LA QUESTION DE RECHERCHE.....	13
CHAPITRE 2 - CADRE THÉORIQUE	17
2.1 REPÈRES PSYCHOLOGIQUES ET ÉPISTÉMOLOGIQUES.....	17
2.1.1 La didactique des sciences	17
2.1.2 Les recherches sur les conceptions des élèves.....	18
2.1.2.1 Origine et originalité des recherches sur les conceptions	19
2.1.2.2 L'étendue du programme de recherche	20
2.1.2.3 Exemples de conceptions en mécanique.....	21
2.1.2.4 Les caractéristiques des conceptions.....	23
2.1.3 Le constructivisme psychologique en didactique des sciences.....	25
2.1.3.1 Les volets du constructivisme et son apparence révolutionnaire	25
2.1.3.2 Le constructivisme modeste de Rosalind Driver.....	27
2.1.3.3 Les critiques du constructivisme psychologique.....	28
2.1.4 Le constructivisme épistémologique en didactique des sciences	31
2.1.4.1 Les variétés de constructivisme épistémologique	32
2.1.4.2 Constructivisme et relativisme	37
2.1.4.3 Quelques épistémologies non retenues	43
2.1.4.4 La perspective épistémologique adoptée.....	48
2.2 LA LITTÉRATURE SUR LE CHANGEMENT CONCEPTUEL.....	59
2.2.1 Nature et modélisation du changement conceptuel	59
2.2.1.1 La nature du changement conceptuel.....	59
2.2.1.2 La modélisation du changement conceptuel	62
2.2.2 Les principaux modèles de changement conceptuel	66
2.2.2.1 Le modèle macroscopique par excellence	67
2.2.2.2 Deux modèles microscopiques de changement conceptuel	71
2.2.2.3 Trois modèles épistémologiques intermédiaires	79

2.2.3	Quelques facteurs affectant le changement conceptuel.....	90
2.2.3.1	Du conflit cognitif à la modélisation de l'évaluation des données.....	90
2.2.3.2	L'interaction avec les croyances épistémologiques.....	94
2.2.3.3	L'importance des aspects non épistémiques.....	95
2.2.3.4	L'aspect social associé au changement conceptuel.....	99
2.2.4	La perspective des conceptions multiples.....	100
2.2.4.1	Les domaines de connaissance de Solomon.....	100
2.2.4.2	Les jeux de la connaissance de Larochelle et Désautels.....	102
2.2.4.3	Les profils conceptuels de Mortimer.....	106
2.2.4.4	L'idée de conceptions multiples dans la littérature.....	109
2.2.4.5	Résumé et discussion.....	118
2.2.5	Conclusion.....	122
2.2.5.1	Rupture ou continuité ?.....	122
2.2.5.2	Tendances dans le programme de recherche.....	125
CHAPITRE 3 - VOILET THÉORIQUE : DÉVELOPPEMENT DE LA NOTION DE COMPLEXIFICATION CONCEPTUELLE.....		129
3.1	LE REJET DE DEUX PRÉSUPPOSITIONS.....	129
3.1.1	Rejet de la qualification unidimensionnelle des conceptions.....	130
3.1.1.1	La vérité, le statut.....	130
3.1.1.2	Proposition : les jugements multidimensionnels.....	132
3.1.2	Rejet de l'approche isolationniste.....	134
3.1.2.1	Le sens commun et la science : une rupture épistémologique graduelle....	135
3.1.2.2	Une critique du modèle des jeux de la connaissance.....	141
3.1.2.3	Commentaire synthèse.....	151
3.2	LA COMPLEXIFICATION CONCEPTUELLE.....	153
3.2.1	Les structures descriptives.....	155
3.2.2	Les structures évaluatives.....	161
3.2.3	Les structures explicatives.....	164
3.2.3.1	Les causes perceptuelles.....	165
3.2.3.2	Les causes conceptuelles.....	166
3.2.3.3	Les causes méthodologiques.....	169
3.2.3.4	Les biais.....	171
3.2.4	Les structures transformatives.....	173
3.2.4.1	L'idée de récit génétique.....	173
3.2.4.2	Structure transformative et sophistication épistémologique.....	176
3.2.4.3	Structure transformative et émotions cognitives.....	179
3.2.5	Les structures décisionnelles.....	183
3.2.5.1	L'activation par signaux.....	184
3.2.5.2	L'activation dans l'approche par cahier des charges.....	186
3.2.5.3	Deux exemples.....	191
3.2.6	Discussion.....	196
3.2.6.1	Retour sur le modèle de complexification conceptuelle.....	196
3.2.6.2	Mise en perspective du modèle.....	204
3.2.6.3	La complexification dans les sciences humaines et la philosophie.....	209

CHAPITRE 4 - VOLET EMPIRIQUE : ÉTUDE DES STRUCTURES DÉCISIONNELLES	215
4.1 OBJECTIF DU VOLET EMPIRIQUE	217
4.1.1 Fonction du volet empirique	217
4.1.1.1 Volet théorique	217
4.1.1.2 Volet empirique.....	218
4.1.2 Axes de développement possibles.....	220
4.1.3 Aspect du modèle retenu pour la recherche exploratoire	224
4.1.3.1 Choix l'axe de développement	224
4.1.3.2 Choix de l'aspect du modèle.....	225
4.2 MÉTHODE.....	227
4.2.1 Les méthodes employées dans l'étude du changement conceptuel.....	227
4.2.1.1 Les principaux modèles de changement conceptuel.....	227
4.2.1.2 Les recherches sur les conceptions multiples.....	232
4.2.1.3 Conclusion.....	234
4.2.2 La méthode utilisée	236
4.2.2.1 Choix méthodologiques	236
4.2.2.2 Présentation des sujets	237
4.2.2.3 Les tâches de vulgarisation	238
4.2.2.4 Les tâches des doubles fentes	244
4.3 RÉSULTATS ET ANALYSE	250
4.3.1 La structure décisionnelle dans les tâches de vulgarisation.....	250
4.3.1.1 Tâche sur les adaptations biologiques.....	251
4.3.1.2 Tâche sur les échanges de chaleur	256
4.3.1.3 Discussion	260
4.3.2 La structure décisionnelle dans les tâches des doubles fentes	266
4.3.2.1 Les critères conceptuels employés	269
4.3.2.2 Discussion	275
4.3.3 Autres éléments d'analyse	277
4.3.3.1 Notions de vérité, de validité et de complétude.....	278
4.3.3.2 Dialogues et complexification conceptuelle.....	287
4.3.3.3 Enseignement et complexification conceptuelle	293
CHAPITRE 5 - CONCLUSION	299
5.1 RETOUR SUR LE MODÈLE	299
5.1.1 Résumé du volet théorique	299
5.1.2 Résumé du volet empirique	302
5.1.3 Statut du modèle proposé.....	303
5.2 PERSPECTIVES DE RECHERCHE	305
Références.....	311
Annexe 1 – Certificat d'éthique	I
Annexe 2 – Formulaire de consentement.....	III
Annexe 3 – Entrevue avec U1.....	V

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Tableau comparant notre métaphore et celle employée par Larochelle et Désautels.....	150
Tableau 2. Distinction entre deux niveaux dans les structures proposées : le niveau de la reconnaissance et le niveau métacognitif.	198
Tableau 3. Discours fictifs tenus par deux journalistes.....	211
Tableau 4. Textes soumis lors des tâches de vulgarisation.	240

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Exemple de conception mixte sur la nature de la lumière.....	7
Figure 2.	Quatre conceptions successives de l'atome	8
Figure 3.	La structure de notre cheminement pour l'atteinte de notre objectif théorique.	16
Figure 4.	La typologie proposée par Lakatos	34
Figure 5.	Les ordres discursifs et les mécanismes de production de nouvelles connaissances.....	54
Figure 6.	L'emplacement de la notion de changement conceptuel en psychologie.....	61
Figure 7.	Exemple de structure conceptuelle à la base d'un modèle mental initial de la Terre.....	76
Figure 8.	Modèles synthétiques de la Terre.....	77
Figure 9.	Les principales catégories ontologiques selon Chi.....	84
Figure 10.	Le profil épistémologique personnel de Bachelard pour la notion de masse	107
Figure 11.	Les systèmes de Ptolémée et de l'astronomie moderne.....	157
Figure 12.	Le choix des ressources conceptuelles	189
Figure 13.	La construction progressive d'un patron d'interférence à partir d'un faisceau d'électrons	192
Figure 14.	Protocole d'entrevue des tâches de vulgarisation.	242
Figure 15.	Schéma du montage de l'expérience des fentes de Young avec de la lumière	246
Figure 16.	Protocole d'entrevue de la tâche sur l'expérience des fentes de Young en optique.	247
Figure 17.	L'expérience des doubles fentes avec des électrons.	247
Figure 18.	Protocole d'entrevue de la tâche sur la version quantique de l'expérience des doubles fentes.	248

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet doctoral a constitué une épreuve qui aurait été autrement plus difficile si je n'avais pu bénéficier du support indéfectible de ma famille, que je désire remercier avant tout.

Dans le milieu académique, je tiens à remercier profondément mes directeurs Marcel Thouin et Serge Robert pour leurs encouragements et leur optimisme (qui m'ont souvent paru exagérés mais qui ont toujours été appréciés), pour leur patience face à un projet qui a pris plus de cinq années à concevoir puis à réaliser, et pour leurs commentaires et leurs suggestions qui m'ont permis de rehausser le contenu et la forme de la thèse.

Je tiens également à remercier France Caron et Marie-Françoise Legendre pour les recommandations qu'elles m'ont offertes suite à la lecture du devis. Ces recommandations m'ont amené à réécrire une partie importante de la thèse, ce qui, je le reconnais volontiers maintenant, s'est avéré grandement bénéfique.

Au niveau financier, je tiens à remercier la fondation Michel-Gaucher pour son appui qui m'a permis de compléter la rédaction de cette thèse l'esprit un peu plus tranquille. Il me faut aussi souligner le support qui me fut donné par la Faculté des sciences de l'éducation par l'entremise de diverses bourses.

CHAPITRE 1 - PROBLÉMATIQUE

1.1 INTRODUCTION

La didactique des sciences et les recherches sur les conceptions des élèves

Suite à ses importants travaux en optique dans les années 1670, Newton a rendu hommage à ses prédécesseurs en employant un aphorisme célèbre qui lui est encore de nos jours largement attribué : « Si j'ai pu voir plus loin, c'est en étant sur les épaules de géants. »¹ Mais dans les faits cet aphorisme possède une histoire complexe, que Merton (1965) parvient à faire remonter jusqu'à Bernard de Chartres au 12^e siècle. Au cours des siècles que couvre cette histoire, Merton nous rapporte qu'en 1616 l'Anglais Godfrey Goodman commentait l'aphorisme de la sorte :

« But I pray let us examine it first how these dwarfes should be exhaled and drawne up to the shoulders of the gyants; here is a point of great difficulty as yet not thought upon. »
(p.44)

Merton souligne l'originalité de cette remarque de Goodman :

« Not one of his [Goodman's] predecessors or successors – not even such a successor as Newton who would adapt the Aphorism only some sixty years later – has thought to ask how the dwarfs manage to mount upon the eminence of the giants. The Aphorism simply *assumes* that it is an easy task to clamber onto the shoulder of the Ancients. Yet once the assumption is put in question, it becomes questionable indeed. » (p. 44)

Dans son sens traditionnel, la métaphore des nains et des géants met en évidence le caractère cumulatif des efforts intellectuels au sein de l'entreprise scientifique : ce n'est que parce que la génération actuelle a hérité d'un bassin de connaissances qu'elle est parvenue à produire celles que'on lui attribue de nos jours. Ce sens est phylogénétique. Cependant, Goodman a le mérite d'utiliser la métaphore pour poser une question d'un autre type, ontogénétique cette fois : comment chaque savant parvient-il à prendre appui sur ses prédécesseurs et utiliser le fruit de leur travail, voire éventuellement offrir une contribution aux connaissances de son époque ?

On constate que la question de Goodman est, bien avant l'heure, une question essentiellement didactique (en particulier celle des sciences) : elle nous invite à examiner la façon dont on parvient à prendre possession du labeur de ceux qui nous ont précédés. Bien évidemment, il serait exagéré de hisser Goodman au rang de

¹ « If I have seen further it is by standing on ye sholders of Giants. »

fondateur méconnu de la didactique des sciences sur la seule base de cette remarque. Mais montrer l'existence d'un tel précurseur nous aide à prendre conscience que la didactique des sciences a été une discipline longue à se constituer. Alors que différents penseurs ont pu se poser des questions d'ordre didactique au cours des siècles, ce n'est que depuis quelques décennies qu'il existe un corps de chercheurs travaillant spécifiquement les questions de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences.²

Bien que la didactique des sciences ait eu des origines variées dans les divers pays occidentaux, cette discipline a connu un point de ralliement important à la fin des années 1970 lors de la mise en évidence de l'existence de « conceptions » chez les élèves. Selon cette approche alors nouvelle, les élèves arrivent en classe non pas la tête vide, ni la tête pleine d'« erreurs », mais plutôt avec certaines idées explicatives (ou « conceptions ») spontanées concernant les phénomènes faisant l'objet de l'enseignement scientifique. La plupart du temps, les élèves ne sont pas conscients de ces conceptions spontanées, mais il n'en demeure pas moins que celles-ci sont souvent efficaces (en contexte quotidien) et stables (i.e., résistantes à toute forme d'enseignement). Très rapidement, les chercheurs se sont affairés à recenser les conceptions possédées par les élèves situés aux différents niveaux scolaires, et ce, pour chacun des domaines scientifiques.³

À titre d'exemple, en physique électrique, on retrouve fréquemment l'idée spontanée selon laquelle l'électricité est une substance qui ne parcourt que progressivement le circuit, en allumant par exemple une première ampoule avant d'atteindre la seconde située un peu plus loin. L'idée scientifique d'un courant électrique où tous les électrons mobiles se déplacent simultanément au sein du circuit apparaît assez différente et difficile à acquérir.

En physique du mouvement, plusieurs chercheurs ont conclu à l'existence chez les élèves (et même des étudiants universitaires ayant suivi des cours de physique mécanique) d'une conception spontanée s'apparentant à la théorie de l'impétus que l'on retrouvait chez plusieurs penseurs du Moyen-Âge : les objets en mouvement libre

² Voir à ce sujet Fensham (2004).

³ Voir par exemple la revue effectuée par Wandersee, Mintzes et Novak (1994).

possèdent un « élan », une « force », qui leur permettent de bouger; une fois cet « élan » ou « force » épuisé, les objets s'arrêtent par eux-mêmes (Clement, 1983; Halloun & Hestenes, 1985; Champagne, Klopfer, & Anderson, 1980; McCloskey, 1983; Gunstone & Watts, 1985; Viennot, 1979).

Le flot important de recherches de ce type a fortement contribué à la formulation, à partir du milieu des années 1980, d'une perspective devenue depuis consensuelle en didactique des sciences, la perspective constructiviste sur l'appren-tissage. L'élève n'y est plus conçu comme une jarre vide, ou encore à moitié pleine d'idées souvent erronées et nuisibles : il est dorénavant vu comme possédant un réservoir de connaissances souvent tacites, réservoir constituant une base importante à partir duquel l'apprentissage a lieu, à partir duquel le sens de la nouvelle compréhension du monde est élaboré (ou, selon la métaphore, « construite »). Dans les mots de Rosalind Driver, une chercheuse ayant vigoureusement promu cette perspective dans les années 1980 et 1990, et sa collègue :

« Learning outcomes depend not only on the learning environment but also on the knowledge of the learner. Learning involves the construction of meanings. Meaning is constructed by students from what they see or hear may or may not be those intended. Construction of a meaning is influenced to a large extent by our existing knowledge. » (Driver & Bell, 1986, pp. 453-454)

En plus d'identifier les conceptions initiales des élèves et de défendre une perspective constructiviste sur l'apprentissage, certains chercheurs ont tenté de comprendre en plus grands détails le processus par lequel les élèves passent de leur conception spontanée à une maîtrise (plus ou moins complète) des théories scientifiques. Autrement dit, le début des années 1980 a vu apparaître une certaine insatisfaction à l'égard des simples *descriptions* des conceptions possédées par les élèves, et par le fait même un intérêt s'est développé envers l'*explication* de l'évolution de ces conceptions. Différents modèles ont ainsi été proposés pour expliquer ce type d'apprentissage (rapidement appelé « changement conceptuel » suite à l'article fondateur de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982)) et plusieurs aspects de ce phénomène ont été progressivement identifiés et étudiés au fil des années.

Nous aurons l'occasion de présenter quelques-uns de ces modèles ainsi que d'autres résultats de recherche intéressants à la section 2.2. Pour l'instant, contentons-nous de mentionner que, sous-jacente aux recherches sur le changement

conceptuel faites durant les années 1980, se trouve l'idée d'un remplacement des conceptions initiales des élèves par les celles scientifiques. Grossièrement, nous pouvons dire que les chercheurs de cette période ont tenté, au niveau théorique, d'identifier ce qui pouvait conférer aux conceptions spontanées des élèves leur si grande persistance, de même que de préciser les conditions qui devaient être remplies pour que ces difficultés soient surpassées. (Ceci évidemment dans le but, au niveau pratique et prescriptif, de proposer des séquences d'enseignement plus efficaces.) À la base des conceptions se trouverait ainsi un « obstacle » dont le franchissement devrait être aidé par des activités en classe appropriées.

Le phénomène des conceptions multiples dans les recherches sur les conceptions

Bien que les recherches sur le changement conceptuel aient produit de nombreux résultats intéressants, plusieurs critiques ont souligné la fausse nécessité de la présupposition précédente : le terme « changement » dans l'expression « changement conceptuel » n'a pas à être compris comme l'équivalent de « remplacement »; il se peut qu'à l'occasion le dépassement de la conception spontanée provienne non pas de son éradication à la faveur de l'explication scientifique, mais plutôt d'une sorte de cohabitation entre la conception spontanée initiale et la conception scientifique, chacune ayant alors son propre domaine de validité. Par exemple, la conception spontanée selon laquelle le mouvement d'un objet sur lequel on ne tire ni ne pousse est maintenu par un « élan » qui s'épuise progressivement s'avère la plupart du temps utile et suffisante pour les phénomènes de la vie de tous les jours. Dans un tel contexte, il n'est pas raisonnable d'exiger chez les élèves l'emploi exclusif des lois de Newton. Ces lois s'avèrent en contrepartie indispensables dans d'autres contextes, lorsqu'on veut par exemple formuler des prédictions précises, ou encore lorsque le mouvement se produit dans des conditions extraordinaires, par exemple dans le vide de l'espace.

Cette approche par « conceptions multiples », comme nous l'appellerons souvent, n'a reçu qu'une attention plutôt marginale dans le programme de recherche sur le changement conceptuel. Ceci est normal puisque ce phénomène d'apprentissage comporte en fait de nombreux aspects, la possible coexistence des conceptions spontanée et scientifique n'en étant qu'un seul. Mais nous constatons que les

contributions sur ce thème ont malheureusement été produites de manière éparse et que plusieurs des avenues semblent encore sous exploitées. Nous pensons donc qu'il est important pour le programme de recherches sur le changement conceptuel que l'approche par conceptions multiples reçoive une attention soutenue afin de rassembler les acquis théoriques pour ensuite les organiser, tout en les extrapolant, au sein d'un modèle synthétique. C'est à cette tâche que nous consacrerons cette thèse.

Avant de formuler plus précisément nos objectifs de recherche et d'indiquer comment nous nous y prendrons pour les atteindre (section 1.3), nous désirons offrir au lecteur une seconde voie d'entrée à la problématique des conceptions multiples, cette fois-ci concrète au lieu d'historique : par les recherches en didactique de la mécanique quantique. À la consultation de cette littérature, nous constaterons en effet que ce champ de recherche pose de manière criante la question pratique de la cohabitation cognitive de deux théories (ou conceptions scientifiques) incompatibles, soit la physique classique et la physique quantique.

1.2 LA CONFUSION DANS L'APPRENTISSAGE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

La littérature sur la didactique de la mécanique quantique est très limitée, mais il est possible d'identifier deux axes de recherche touchant clairement la question des conceptions multiples. D'abord, au niveau des étudiants, on s'aperçoit que ce contenu leur cause de sérieuses difficultés d'apprentissage : les concepts quantiques n'émergent que péniblement du fond classique. Ensuite, au niveau des recherches sur la pratique enseignante, plusieurs professeurs et didacticiens proposent des approches parfois complètement opposées pour éviter ou minimiser cette confusion conceptuelle.

La revue qui suit détaille ces deux lignes de recherche et chacune d'elle nous ramène à la question de la nature de la cohabitation de ces deux mécaniques.

1.2.1 Quelques difficultés d'apprentissage

Remarquons pour débiter que les étudiants arrivent souvent dans un cours physique moderne avec une compréhension lacunaire de la physique classique. Et comme plusieurs concepts classiques sont en fait des préalables à la compréhension

des phénomènes quantiques, leur fragilité peut constituer une source de difficultés pour l'apprentissage (R. N. Steinberg, Wittmann, Bao, & Redish, 1999).

Parmi les faiblesses initiales, mentionnons les difficultés qu'ont de nombreux étudiants à employer l'approche ondulatoire en optique (Ambrose, Shaffer, Steinberg, & McDermott, 1999), ce qui peut éventuellement miner leur compréhension de la dualité onde-corpuscule. La notion de probabilité est également problématique pour plusieurs, même dans un cadre classique (Bao & Redish, 2002), alors qu'elle est nécessaire à l'interprétation standard de la fonction d'onde. Finalement, les conceptions des étudiants sur la nature des théories scientifiques peuvent également constituer un obstacle à l'apprentissage : plusieurs semblent croire que les contenus scientifiques qu'ils ont appris par le passé sont « scientifiquement corrects » et considèrent les connaissances scientifiques comme statiques et universellement valides (Kalkanis, Hadzidaki, & Stavrou, 2003).

Ces lacunes laissent présager que certaines difficultés ou confusions seront rencontrées dans l'apprentissage de la physique quantique. Les paragraphes qui suivent montrent que tel est effectivement le cas sur plusieurs aspects importants.

Dualité onde-corpuscule

Les difficultés relatives au modèle ondulatoire de la lumière ressortent immédiatement à l'abord des expériences de diffraction et d'interférence faites avec des électrons. Les étudiants sont souvent incapables de déterminer correctement l'influence des dimensions des fentes ou du réseau sur le patron observé. De plus, la relation de de Broglie ($p = h/\lambda$) n'est pas employée : la longueur d'onde de l'électron est souvent considérée comme une propriété intrinsèque, indépendante de sa vitesse (Vokos, Ambrose, Shaffer, & McDermott, 2000).

Le modèle corpusculaire de la lumière pose lui aussi des difficultés : certains étudiants en viennent à adopter des modèles combinant onde et corpuscule (figure 1).

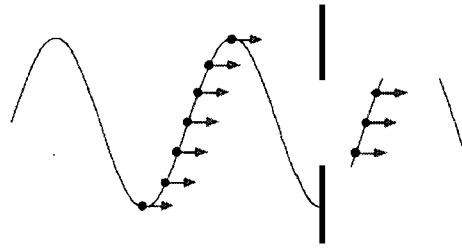


Figure 1. Exemple de conception mixte sur la nature de la lumière. L'étudiant conçoit l'amplitude de la lumière comme une quantité spatiale (d'où la perte des crêtes lors du passage par une fente) ; la nature corpusculaire est alors comprise de la manière suivante : les photons se déplacent le long de chemins sinusoïdaux. Tiré de l'article de Steinberg et al. (1999).

Aussi, les difficultés avec la notion de dualité ne sont pas symétriques. La plupart des étudiants ne conçoivent pas la lumière et les électrons comme étant de natures similaires, et ce, malgré la présentation d'arguments basés sur l'existence de patrons d'interférence analogues. Les électrons demeurent souvent conçus comme des particules, alors que la lumière est plus facilement comprise comme ayant une nature duale (Olsen, 2002).

Le modèle de l'atome

Quelques recherches ont étudié les différents modèles tenus par les étudiants à propos de l'atome d'hydrogène (Mashhadi, 1996; Niedderer, Bethge, & Cassens, 1990). L'étude de Petri et Niedderer (1998) est cependant d'un intérêt particulier. Ils ont suivi un étudiant dans le cadre d'un cours de 16 semaines (niveau préuniversitaire) consacré à l'atome. Par leurs entrevues, ils ont pu saisir l'évolution du modèle de l'étudiant, en expliquant celle-ci par les « outils cognitifs » de l'étudiant (i.e. les éléments cognitifs stabilisés chez l'étudiant, avant l'enseignement; par exemple : « l'électron est une particule ») en interaction avec leur compréhension des informations fournies par le professeur. Les auteurs rapportent ces quatre « clichés » successifs dans l'évolution du modèle :

- I) Le modèle planétaire : modèle initial, bien ancré ; provient des cours antérieurs en physique et chimie;
- II) Le modèle de l'orbite probabiliste (*probability orbit model*) : le noyau est entouré d'un champ de possibilité, ψ , et le maximum de ψ^2 définit l'orbite de l'électron ; la probabilité est conçue comme un manque de connaissance.
- III) Le modèle « électron-d'état » (*state-electron model*): le noyau est entouré d'un champ de possibilité, ψ , qui n'est pas réel. À l'intérieur de ce champ se situe l'«

électron-état ». C'est seulement lorsque l'électron-état est localisé qu'il apparaît comme un électron réel.

- iv) Le modèle de l'électron-nuage (*electron cloud model*) : l'atome est constitué d'un noyau et d'un nuage-électron sphérique et chargé, dont la forme est donnée par ψ^2 , et qui change d'état en état. L'électron n'est plus une particule et n'est plus en mouvement.

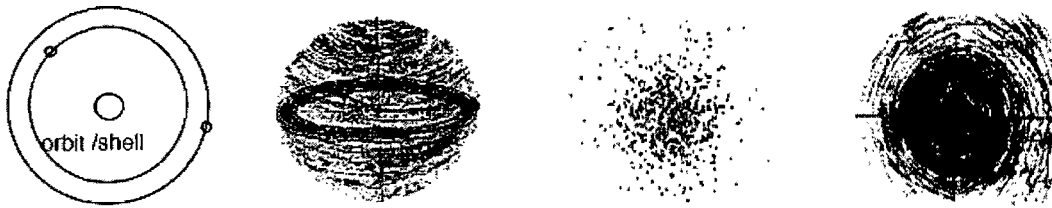


Figure 2. Quatre conceptions successives de l'atome. De gauche à droite : le modèle planétaire, le modèle de l'orbite probabiliste, le modèle de l'électron-état et le modèle de l'électron-nuage. Tiré de Petri et Niedderer (1998).

Ce dernier modèle ne représente pas l'état final de l'élément cognitif « atome », bien qu'il soit celui le plus scientifique formulé par cet étudiant. L'état final est plutôt une coexistence des modèles, de forces différents (Petri & Niedderer, 2003).

L'étudiant a commencé avec une croyance déterministe classique à propos de la physique; il conçoit la probabilité comme de l'imprécision. À la fin du cours, l'étudiant n'a pas mis une croix sur ce déterminisme, tout comme c'est le cas pour le modèle planétaire de l'atome qui demeure le modèle qu'il emploie spontanément. Mais il a alors également accès à un modèle où la probabilité joue un rôle fondamental. Petri et Niedderer soulignent que cette croyance méta-scientifique est un facteur important dans le processus d'apprentissage.

Confusion des concepts quantiques et classiques

On le voit : plusieurs recherches rapportent des conceptions où s'entrecroisent les aspects classiques et quantiques (Kalkanis et al., 2003; Mannila, Koponen, & Niskanen, 2002; Ireson, 2000, 2001). Au terme de sa recherche auprès d'étudiants collégiaux, Taber conclut que plusieurs des termes associés à la physique quantiques sont intégrés superficiellement :

« These students began their college course holding a model of the atom as having electrons in shells with planetary orbits. Although they readily adopt the new terms 'quantum' and 'orbital', they initially used these new labels to apply to their existing

understanding of atomic structure. So orbitals became confused with shells, sub-shells, energy levels and visual representations of probability envelopes. The terms were acquired, but the distinct meanings did not readily follow.» (K.S. Taber, 2002, p. 155)

De ces confusions terminologiques et conceptuelles, Mashhadi conclut que :

« Students have incorporated the 'new' quantum phenomena into the 'older' mechanistic conceptions. [...] most students are not epistemologically aware that quantum physics constitutes a new 'paradigm'. » (Mashhadi, 1996, p. 262)

En somme, les nombreuses confusions conceptuelles que les étudiants vivent lors de leur apprentissage de la physique quantique semblent résider en partie dans une difficulté à concevoir l'existence de deux mécaniques distinctes et conceptuellement différentes. Autrement dit, plusieurs des confusions pourraient être en partie dues à un manque de discrimination chez les étudiants (et/ou dans l'enseignement) entre mécaniques classique et quantique.

L'exemple de l'apprentissage de la mécanique quantique nous permet d'envisager de manière générale que l'acquisition d'une pluralité de conceptions alternatives n'a rien d'un automatisme : des difficultés conceptuelles et épistémologiques peuvent s'y opposer.

1.2.2 Les approches d'enseignement pour gérer la transition

Pour palier à cette contamination conceptuelle de la physique quantique par la physique classique, ou encore à l'absence de discrimination entre les deux physiques, plusieurs approches ont été proposées pour les cours d'introduction. Chacune répond à sa manière à la question suivante : Doit-on faire référence à la mécanique classique ? Et si oui, comment ?

Aborder la mécanique quantique sans référence à la mécanique classique

Quelques chercheurs recommandent d'éviter toute référence à la transition entre la physique classique et la physique quantique (Fischler & Lichtfeldt, 1992; Ireson, 1999). L'approche traditionnelle passe par la présentation de modèles semi-classiques (par exemple, le modèle de Bohr) ayant eu une importance historique. Fischler et Lichtfeldt critiquent cette approche en affirmant que :

« in being oriented to historical development, the teaching over-emphasizes the conceptions of classical physics. The usage of mechanical models, which is implied in this,

sets up an additional obstacle to an appropriate understanding of quantum physics. »
(Fischler & Lichtfeldt, 1992, p. 181)

L'objectif est plutôt d'effectuer une rupture avec les conceptions préexistantes de manière à souligner le comportement curieux des objets quantiques (Fischler & Lichtfeldt, 1992, p. 184; Olsen, 2002), et d'éviter la rétention des conceptions semi-classiques ou encore la production de conceptions mixtes.

Aborder la mécanique quantique en relation avec la mécanique classique

Plusieurs options se présentent si l'on désire au contraire intégrer des références à la mécanique classique lors de la séquence d'introduction.

Souligner les contrastes

Cette première option est en fait compatible avec la position défendue par Fischler et Lichtfeldt à la sous-section précédente : il s'agit de souligner très tôt l'étrangeté de la mécanique quantique, sa différence fondamentale avec la physique classique. Pour y parvenir, on propose d'aborder rapidement la question de l'interprétation philosophique de la théorie, en introduisant le paradoxe EPR et les expériences de Bell (Hobson, 1996; Pospiech, 2000, 1999).

Souligner l'émergence de la physique quantique

Gil et Solbes (1993) déplorent le fait que la physique moderne soit bien souvent présentée de manière cumulative, sans faire référence aux difficultés de la physique classique. Ceci serait responsable du fait que :

« between 85 and 93% of the pupils ignore the existence of a crisis in the development of classical physics and are not capable of mentioning a single problem associated with this crisis or difference between modern and classical physics. » (Gil & Solbes, 1993, p. 256)

Par exemple, le passage à la quantification opéré par Bohr dans son modèle semi-classique de l'atome constituait une remise en question fondamentale de certains présupposés de la physique classique. Pour être crédible, une telle proposition devait être une réponse à un problème poignant, soit celui de la stabilité de l'atome dans le modèle de Rutherford. Cette justification n'est pas nécessairement présente à l'esprit des étudiants. Dans sa recherche auprès d'étudiants collégiaux, Taber conclut que :

« [N]ot knowing about the *classical* physics that predicted that atoms with "planetary" electrons could not be stable may prevent students appreciating *why* the quantization of energy was introduced. » (K.S. Taber, 2004, p. 108)

Il est possible que le fait de ne pas voir le passage à la quantification comme une solution à un problème relatif à la physique classique entraîne l'idée fausse que cette quantification constitue un développement moderne en continuité avec la physique classique. Les difficultés des étudiants pourraient ainsi avoir une origine épistémologique : elles viendraient de l'ignorance de la révolution conceptuelle associée à l'émergence de la nouvelle physique. De ce point de vue, il serait donc souhaitable de proposer des activités d'enseignement où l'on souligne que la physique moderne constitue une nouvelle approche venant s'opposer à celle classique et résolvant un certain nombre de ses problèmes.

Souligner les aspects communs

Selon Cuppari et ses collègues, insister sur les différences ou même les contrastes entre physiques quantique et classique peut nuire à la compréhension (Cuppari, Rinaudo, Robutti, & Violino, 1997). Il serait en fait plus bénéfique d'aborder la mécanique quantique en faisant ressortir ces aspects communs avec la physique classique. Ces chercheurs proposent d'introduire la notion d'action à partir de la mécanique classique, puis de présenter la constante de Planck comme la quantification de l'action.

Souligner leur juxtaposition

Finalement, il est possible de prôner une approche où mécanique classique et mécanique quantique sont juxtaposées. Kalkanis, Hadzidaki et Stavrou (2003) reconnaissent que les conceptions mixtes présentées plus haut constituent un obstacle à l'apprentissage de la mécanique quantique. Mais au lieu de contourner le problème en évitant de faire référence à la mécanique classique (Fischler & Lichtfeldt, 1992), il s'agit de le confronter en insistant sur la juxtaposition des systèmes conceptuels classique et quantique (les deux faisant partie de la science contemporaine qu'il s'agit de faire apprendre). Cette juxtaposition est effectuée par l'approche des « niveaux de réalité ». La structure par niveaux de réalité a les caractéristiques suivantes (Kalkanis et al., 2003, p. 261) :

- Chaque niveau forme un réseau conceptuel distinct et totalement indépendant.
- La théorie propre à chaque niveau attribue aux objets naturels un statut ontologique particulier leur prêtant des propriétés et des comportements.
- Chaque niveau de réalité définit les limites de validité des autres niveaux.

- Les réseaux conceptuels des différents niveaux étant essentiellement incompatibles, leur association est possible par la compréhension du processus de crise qui a mené au rejet du réseau conceptuel plus vieux et à l'acceptation du plus moderne.

Pour la physique classique, les auteurs retiennent comme théorie (*covering law*) les lois de Newton. Le statut ontologique des objets newtoniens est le suivant :

- ils possèdent un état déterminé ;
- les systèmes observateur et observé sont indépendants ;
- le comportement des objets est déterministe ; etc.

Pour la mécanique quantique, ils suggèrent comme loi le principe d'incertitude d'Heisenberg, et les propriétés ontologiques des objets sont :

- l'existence d'une précision maximale avec laquelle deux observables complémentaires peuvent être observées ;
- le processus de mesure force le système à réaliser une de ses possibilités ;
- il n'y plus de déterminisme au sens strict ; etc.

L'approche est intéressante puisqu'elle part de la constatation de conceptions mixtes pour ensuite proposer une nouvelle transposition didactique visant spécifiquement à provoquer une séparation nette entre le monde classique et le monde quantique dans l'esprit des étudiants. Aussi, les auteurs rapportent qu'en plus d'être efficace, leur approche permet d'aborder plusieurs thèmes à propos de la nature de la science.

En somme, de nombreuses approches différentes ont été suggérées pour gérer la question de la relation entre mécanique classique et quantique. Le fait que ces approches soient à ce point différentes témoigne de l'existence d'une tension entre deux visées en apparence opposées : la nécessité de bien dissocier les concepts des deux mécaniques, tout en montrant dans quelle mesure ils sont différents ou semblables et comment les uns ont dû émerger des autres. On constate donc que la relation entre mécanique classique et quantique possède une complexité qui requiert, préalablement à tout enseignement, un certain travail épistémologique.

Vers la problématique

Alors qu'en histoire des sciences il apparaît tout naturel de parler d'une forme de remplacement de la physique traditionnelle par la physique moderne (mécanique quantique et relativité générale), la situation semble plus complexe lorsque vient le

temps de décrire, au niveau psychologique, l'apprentissage opéré chez l'individu. Le terme « remplacement » apparaît inadéquat dans ce contexte puisque, de toute évidence, il ne s'agit pas d'oublier la physique newtonienne : une forme de coexistence doit être atteinte.

Cette coexistence apparaît être problématique pour bon nombre d'étudiants, mais aussi pour de nombreux enseignants et didacticiens. Plusieurs stratégies différentes ont été proposées pour minimiser les confusions. Une approche retient particulièrement notre attention, puisqu'elle table précisément sur cette coexistence des deux physiques : l'approche par niveaux de réalité de Kalkanis, Hadzidaki et Stavrou (2003) propose d'astreindre explicitement les deux physiques à deux domaines de validité distincts. Mais comme c'est souvent le cas dans la littérature sur la didactique de la physique quantique, Kalkanis et ses collègues ne font pas de liens systématiques entre leur modèle d'enseignement et les modèles psychologiques d'apprentissage employés en didactique des sciences, notamment les modèles de changement conceptuel. Ceci nous amène à formuler la question suivante :

« Étant donné qu'une forme de coexistence doit être obtenue entre la physique classique et la physique quantique lors de l'apprentissage de cette dernière, comment en rendre compte dans les modèles psychologiques d'apprentissage ? »

1.3 LA QUESTION DE RECHERCHE

La problématique retenue et les objectifs de recherche

La question précédente est particulière à l'apprentissage de la mécanique quantique. Nous avons tenu à présenter quelques-uns des résultats de la littérature sur la didactique de la mécanique quantique, car nous pensons qu'on y retrouve des observations et des interrogations très concrètes à l'endroit du phénomène des conceptions multiples dans l'apprentissage des sciences.

Sur un point important, le phénomène de la coexistence cognitive des mécaniques classique et quantique se trouve à être de même nature que celui de la coexistence des conceptions spontanées et scientifiques abordé à la section 1.1. Dans les deux cas, nous sommes en présence d'une cohabitation de deux systèmes explicatifs à la fois différents, concurrents et complémentaires. Cette coexistence rend possible et souhaitable la construction d'une multitude de liens cognitifs entre les deux

membres de la paire de conceptions. Malheureusement, la littérature sur la didactique de la mécanique quantique et celle sur le changement conceptuel ne semblent explorer que partiellement la nature de ces liens. Par conséquent, nous tenterons dans cette thèse de répondre à la question générale suivante :

« Lorsqu'une conception visant à expliquer un phénomène est apprise alors que l'élève possède une conception initiale à propos de ce phénomène, conception qui n'est cependant pas remplacée par la nouvelle, quelle est la nature de la structure cognitive permettant de gérer la coexistence de ces deux conceptions ? »

Ainsi, l'objectif principal que nous nous fixons est de rassembler les contributions pertinentes dispersées dans la littérature (principalement celle sur le changement conceptuel) puis d'en offrir une synthèse à la fois critique et originale au sein d'un modèle que nous nommerons « modèle de complexification conceptuelle ». Notons que nous ne tenterons pas d'identifier la nature ontologique des structures gérant la multiplicité des conceptions ; comme nous le verrons au chapitre 3, notre objectif se limitera plutôt à identifier les structures potentielles par les fonctions cognitives qu'elles accomplissent (notre approche est par conséquent fonctionnaliste).

Une fois ce travail théorique effectué, nous serons en mesure d'entreprendre une démarche empirique qui aura pour fonction d'explorer un volet de ce modèle. Qu'est-ce que notre premier jet théorique nous permet de « voir » dans les réponses des étudiants ? Nous permet-il de déceler des subtilités de leur pensée qui autrement resteraient inaperçues ? Par ce premier contact avec des données, notre objectif sera modeste : continuer le développement du modèle que nous aurons proposé en direction d'hypothèses plus spécifiques. Ainsi, une fois que notre réflexion théorique aura épuisé ses ressources, les données empiriques viendront prendre le relais pour stimuler le développement de notre modèle de complexification.

L'atteinte de ce doublet d'objectifs (un théorique et l'autre empirique) nous permettra, espérons-nous, de contribuer de deux façons aux connaissances actuelles en didactique. D'une part, le modèle général que nous proposerons aidera possiblement à comprendre un peu mieux l'un des volets du changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences. D'autre part, nous espérons que ce modèle général aura de plus des implications plus locales, par exemple sur la didactique de la mécanique quantique, domaine de recherche encore peu développé.

Plan de la réponse

Notre premier objectif est théorique : développer un modèle à la fois synthétique et original du phénomène qu'est la coexistence de multiples conceptions. Notre modèle de complexification conceptuelle sera présenté au chapitre 3.. Mais pour montrer dans quelle mesure ce modèle constitue une contribution à la didactique des sciences, il sera nécessaire dans un premier temps d'effectuer une présentation synthétique du programme de recherche sur le changement conceptuel et de ses fondements. Par conséquent, le cadre théorique que nous présenterons au chapitre 2 sera subdivisé en deux parties.

La première sera consacrée aux bases historiques et épistémologiques des recherches sur le changement conceptuel. Nous aurons alors l'occasion de présenter d'une part la façon dont les recherches sur les conceptions et la perspective constructiviste ont conduit tout naturellement à la question du changement conceptuel. D'autre part, il sera utile de retourner aux fondements philosophiques des réflexions sur la nature de la connaissance scientifique, car celles-ci ont largement inspiré les modèles de changement conceptuel.

La deuxième partie du cadre théorique exposera de manière détaillée les principaux modèles et résultats de recherche relatifs au changement conceptuel. Notre revue tentera de montrer que ce programme de recherche comporte de nombreuses facettes qui ont été progressivement explorées depuis environ 25 ans. La facette de ce phénomène qui nous intéresse ici est évidemment le phénomène des conceptions multiples, et nous recenserons avec une attention particulière les divers résultats de la littérature qui la concerne (section 2.2.4).

Une fois effectué ce survol des horizons théoriques relatifs à notre problématique, nous nous tournerons vers l'exposition de notre modèle synthétique du phénomène des conceptions multiples. Pour ce faire, la section 3.1 sera consacrée à la tâche de nous affranchir de certaines présuppositions contraignantes que nous aurons identifiées dans les recherches sur le changement conceptuel. Le chemin sera ensuite libre pour formuler notre modèle à la section 3.2.

Le plan pour l'atteinte de notre premier objectif de recherche est résumé par le schéma de la figure 3. Nous débuterons par une présentation des bases générales du

programme de recherche sur le changement conceptuel, pour présenter par la suite ce domaine de recherche lui-même. Mais un aspect nous intéresse principalement, soit les recherches sur les conceptions multiples, auxquelles nous tenterons de contribuer en proposant notre propre modèle.

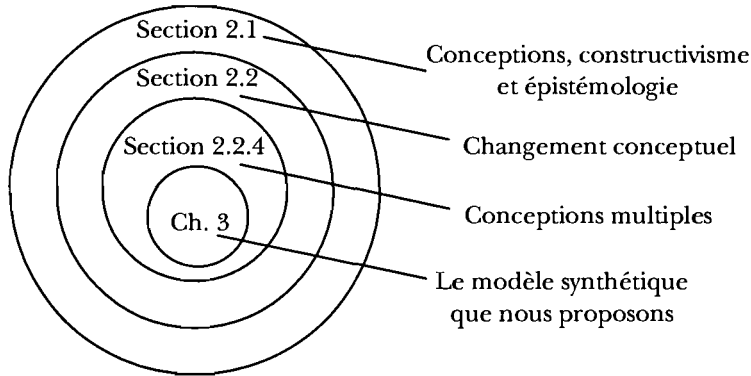


Figure 3. La structure de notre cheminement pour l'atteinte de notre objectif théorique.

La démarche pour l'atteinte de notre objectif théorique partira donc de notions plutôt générales présentées à grands traits pour ensuite cibler de plus en plus précisément la question de la coexistence de conceptions multiples, qui recevra une attention maximale au chapitre 3.

Une fois notre modèle proposé, nous nous attaquerons à notre second objectif, soit celui de l'employer pour interpréter du matériel empirique afin d'évaluer sa fertilité et d'envisager des améliorations. Le chapitre 4 de notre thèse sera consacré à la réalisation de cette tâche. Puisque le modèle que nous proposerons au chapitre 3 comporte plusieurs aspects, nous devons d'abord préciser, dans la première partie du chapitre 4, lequel de ces aspects nous entendons confronter à l'expérience et ce qui est possible d'en espérer. La seconde partie du chapitre présentera alors la méthodologie expérimentale que nous emploierons, soit une présentation des participants (des étudiants collégiaux et universitaires), des tâches qui leur auront été soumises, de même que les outils d'analyse qualitative auxquels nous aurons recours. La dernière partie présentera une analyse des entrevues réalisées auprès des participants, analyse qui débouchera sur quelques constatations intéressantes de même que sur la proposition de quelques avenues de recherche prometteuses.

CHAPITRE 2 - CADRE THÉORIQUE

2.1 REPÈRES PSYCHOLOGIQUES ET ÉPISTÉMOLOGIQUES

L'objectif de cette section est de fournir les bases conceptuelles et historiques nécessaires à la compréhension du programme de recherche sur le changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences. Pour ce faire, nous débuterons par une définition du champ d'études de la didactique elle-même, qui nous permettra d'identifier une préoccupation psychologique et une épistémologique.

Au niveau psychologique, nous remarquerons que l'étude du changement conceptuel prend racine dans les recherches sur les conceptions des élèves et vient développer la perspective constructiviste qui y est grandement associée, d'où l'intérêt d'en effectuer un bref survol.

Au niveau épistémologique, nous verrons qu'une bonne compréhension philosophique de la nature de la science s'avère importante pour faire sens de ce qui est entendu par constructivisme en didactique des sciences, mais aussi lorsque vient le temps d'étudier le changement conceptuel. Il nous sera par conséquent utile de faire référence à quelques théories épistémologiques bien connues et de présenter l'approche que nous retiendrons, soit le rationalisme critique.

2.1.1 La didactique des sciences

Il n'est pas facile (et pas nécessairement utile) de tenter de compartimenter en disciplines étanches la mer de questions pouvant être posées à l'endroit de la cognition humaine. Il n'en reste pas moins que les disciplines académiques existent, qu'en particulier la didactique des sciences existe, et qu'il est par conséquent important de comprendre comment les spécialistes caractérisent cette dernière. Nous pouvons entreprendre de comprendre la didactique par son opposition (liée à son émergence même) avec la pédagogie :

« La didactique au sens strict s'intéresse à la logique des apprentissages à partir de la logique des contenus ; alors que la pédagogie s'intéresse à la logique des apprentissages à partir de la logique d'une classe. » (Develay, 1995, p. 15)

La visée est la même, mais les approches sont complémentaires. Martinand propose une autre formule pour rendre compte de la spécificité de la didactique :

« Il y a une spécificité qui distingue les didacticiens des autres chercheurs en éducation : c'est la 'responsabilité par rapport aux contenus d'enseignement'. » (Martinand, cité dans Dugast, 1999)

Cette définition de la didactique est faite par opposition aux autres domaines du milieu de l'éducation. Elle est nécessaire puisque la didactique est une discipline relativement récente, ayant dû, historiquement, justifier sa place au sein des sciences de l'éducation (Astolfi & Develay, 2002).

Mais il est possible de caractériser l'essence de la didactique d'une manière plus positive. En reprenant Halté et Martinand (cités dans Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, & Toussaint, 1997, pp. 70-71), nous pouvons distinguer trois registres à la didactique :

- Un registre épistémologique : soit une réflexion sur les contenus d'enseignement;
- Un registre psychologique : soit des recherches sur les conditions d'appropriation des savoirs;
- Un registre praxéologique : soit des recherches sur l'intervention didactique.⁴

L'objectif de ce deuxième chapitre est essentiellement de nous amener à une compréhension satisfaisante de la question du changement conceptuel, qui appartient au registre psychologique de la didactique. Dans les sous-sections suivantes, nous nous intéresserons à ses bases psychologiques (les conceptions et le constructivisme) et épistémologiques.

2.1.2 Les recherches sur les conceptions des élèves

Il y a une trentaine d'années, la didactique des sciences a vécu une rapide redéfinition de ses intérêts de recherche lorsqu'on prit conscience de toute l'incidence que pouvaient avoir sur leur apprentissage les idées qu'ont les élèves au moment d'entrer en classe. Dans les années qui suivirent, une quantité importante d'efforts a été consacrée à l'exploration de cet univers et à la formulation d'une

⁴ Nous pouvons constater que la didactique, en s'intéressant aux contenus d'enseignement, se dote d'un registre que la pédagogie n'a pas : le registre épistémologique. Aussi, mentionnons qu'une représentation équivalente de la didactique est souvent faite à l'aide du « triangle didactique », mais nous préférons parler de registres puisqu'ils catégorisent clairement des *types de questions* didactiques.

perspective sur l'apprentissage cohérente avec ces résultats, le constructivisme, dont le nom a longtemps résonné dans les différents secteurs des sciences de l'éducation.

2.1.2.1 Origine et originalité des recherches sur les conceptions

L'héritage piagétien et l'originalité

La plupart des chercheurs ayant étudié les conceptions des élèves ont reconnu dès le départ l'incidence de l'école piagétienne sur leur l'orientation de leurs recherches. Rosalind Driver, possiblement la pionnière la plus connue de ce domaine, constitua un exemple typique à ce niveau et il sera suffisant ici de nous y limiter. Elle partagea d'abord l'intérêt de Piaget pour les explications que se donnent les enfants à propos de leur environnement physique. Pour Piaget, ces explications sont fortement dépendantes des structures de la pensée de l'enfant :

« The development of the causal explanation of individuals reflects a dialectic between the developing logico-mathematical structures of the knower, which structure observations and events in certain ways, and the experiences which are assimilated. [...] Mankind has come to acquire knowledge of the physical environment because of the 'resonance' between structures of the mind and aspects of the physical world. » (Driver & Easley, 1978, pp. 72-73)

Dans la tradition piagétienne, la pertinence des explications des enfants résidait dans le fait qu'elles permettaient de révéler le développement des structures de la pensée qui les sous-tendent. Ces formes de pensées n'étaient cependant pas dépendantes du domaine : un enfant aurait accès aux mêmes structures pour traiter une situation de conservation des liquides (par exemple) qu'une situation de classement de ses jouets favoris (les structures sont donc conçues comme étant *domain-general*). Or de nombreuses recherches depuis les années 70 ont supporté l'hypothèse contraire : les structures de la pensée de l'individu seraient relatives au domaine considéré (elles seraient *domain-specific*).

Depuis la fin des années 70, alors qu'une branche de la recherche en didactique des sciences continuait dans la tradition piagétienne (en s'efforçant d'identifier des structures générales de la pensée des élèves), une autre a préféré opter pour l'étude des connaissances des élèves spécifiques à des contenus particuliers (Driver & Erickson, 1983, p. 39).

« We suggest therefore that Piaget's accounts of children's thinking in the causality studies, as in others, are important documents but should be read for the indications they give of the

content of children's ideas and explanations, rather than as ways of assessing the development of underlying logical structures. » (Driver & Easley, 1978, p. 79)

Dans cette nouvelle orientation de recherche, les conceptions des élèves devenaient en elle-même dignes d'intérêt.⁵

2.1.2.2 L'étendue du programme de recherche

Le programme de recherche a évidemment eu le réflexe d'explorer les conceptions des élèves dans les divers domaines scolaires, notamment celui de la physique (qui a reçu le plus d'attention), de la chimie et de la biologie (Wandersee et al., 1994). À l'intérieur du domaine de la physique, les recherches ont porté sur : la mécanique, l'électricité, la chaleur et la température, la lumière et les phénomènes optiques, la matière, l'énergie, la Terre et l'espace, etc. Les conceptions des élèves à propos de la mécanique ont été à ce point étudiées que certains considèrent ce type de recherche comme paradigmatique⁶ (J. K. Gilbert & Zylbersztajn, 1985).

L'étendue d'un programme de recherche n'est pas seulement fonction de la quantité d'objets étudiés, mais aussi de la variété des questions posées à leur endroit.⁷ À ce niveau, bien que l'enthousiasme du début des années 1980 pour l'étude des conceptions des élèves ait souvent conduit à une simple énumération des conceptions, le programme de recherche a dès le départ valorisé (du moins en principe) la théorisation à propos de ces conceptions. Driver et Erickson résument ainsi les objectifs de ce programme de recherche :

« We ought to engage in research endeavours which will uncover student frameworks, investigate the ways they interact with instructional experiences and utilize this knowledge in the development of teaching programmes. » (Driver & Erickson, 1983, p. 40)

Les mêmes auteurs précisent que pour atteindre ces objectifs, les chercheurs devront s'engager dans des perspectives résolument théoriques :

⁵ White (2005) mentionne que le programme de recherche résulte en fait de la convergence des travaux de didacticiens provenant de différentes perspectives psychologiques : Piaget, Ausubel (1968), Kelly (1955) et Gagné (1965/1985), entre autres. Ces perspectives avaient en commun de s'opposer au behaviorisme, école longtemps dominante. Nous nous limitons ici au cas représentatif de Rosalind Driver.

⁶ Par « paradigmatique », on veut généralement dire que ces recherches sont exemplaires, qu'elles constituent des exemples à imiter.

⁷ Pour un éventail des aspects explorés par les recherches sur les conceptions des élèves, voir Confrey (1990).

« With a growing interest in this field of inquiry we see a danger in a proliferation of 'natural history' studies of student ideas (in individual or group situations) being documented in the absence of any systematic rationale. [...] we suggest that the most useful information will be obtained from studies of instructional programmes which are undertaken from an explicit theoretical perspective. » (Driver & Erickson, 1983, p. 55)

Hashweh (1988) produit les mêmes arguments, avec toutefois plus de force et de clarté. Il distingue d'abord trois types de recherche à l'endroit des conceptions :

- Les recherches descriptives, qui visent à identifier et décrire les conceptions initiales des élèves.
- Les recherches explicatives, qui visent à expliquer la stabilité des conceptions et leur changement.
- Les recherches testant des stratégies d'enseignement visant à favoriser le changement des conceptions.

Selon ce chercheur, il est malheureux que plusieurs stratégies d'enseignement aient été proposées sans être basées sur des recherches explicatives :

« [M]any studies offer suggestions for instructional strategies in spite of the fact that the studies are purely descriptive in nature. Descriptive studies that lack an explanatory model of conceptual change cannot be used as a basis for advocating strategies for inducing conceptual change. That is, for change to be theoretically based one should be able to explain why a certain intervention should induce change. » (Hashweh, 1988, p. 122)

C'est de ce besoin de dépasser les études descriptives par la formulation de modèles explicatifs que sont nées les recherches sur le changement conceptuel, que nous présenterons à la section 2.2. Pour l'instant, l'exemple de quelques conceptions identifiées en mécanique donnera une meilleure idée de ce que l'on entend par « conceptions » des élèves.

2.1.2.3 Exemples de conceptions en mécanique

Comme nous l'avons déjà mentionné, ce sont les conceptions concernant la physique du mouvement qui ont été le plus étudiées par les didacticiens (voir par exemple Clement, 1983; Halloun & Hestenes, 1985; Champagne et al., 1980; McCloskey, 1983; Gunstone & Watts, 1985; Viennot, 1979). Il est possible de présenter quelques-unes des conclusions de ces recherches en les regroupant sous le thème des deux premières lois de Newton.

L'absence de force et l'absence de mouvement

La première loi de Newton stipule qu'en l'absence de force exercée sur un objet, celui-ci conservera sa vitesse (en grandeur et en direction), ou son état de repos le cas échéant. C'est donc le changement d'état qui requiert une cause (une force).

Par contre, selon une conception spontanée des élèves très largement répandue, une force est nécessaire pour qu'un objet soit en mouvement. L'état de repos est alors considéré comme naturel, ne nécessitant pas de cause; il n'a donc pas à être expliqué. Aussi, lorsqu'un objet est au repos (par exemple un livre sur une table), aucune force n'est exercée sur lui (Clement, 1989). Ainsi, les forces passives (i.e. les forces qui s'ajustent en réponse à une force appliquée, par exemple la force qu'exerce une table sur un livre qu'elle soutient) sont souvent ignorées (McDermott, 1984).

Les forces et les mouvements

La deuxième loi de Newton, qui englobe la première, affirme qu'une force nette agissant sur un objet engendrera son accélération, via la constante de proportionnalité qu'est la masse de l'objet : $\vec{F} = m\vec{a}$. La force est alors conçue comme une interaction entre différents corps, distincte d'eux.

Chez les élèves, il est possible de distinguer deux familles de situations, chacune faisant appel à son concept de force particulier.

D'abord les situations où un objet possède un mouvement causé par une poussée. La force est ici appliquée à l'objet. La grandeur de la vitesse est proportionnelle à la grandeur de la force. Si un mouvement est constant, la force appliquée est constante; pour qu'il y ait accélération de l'objet, la force doit augmenter. On peut représenter symboliquement ce principe par la relation $F \propto v$.

Dans les situations où l'objet est en mouvement, mais où aucune poussée n'est exercée sur lui, les élèves associent encore une force au mouvement. Cette conception est typiquement appelée « motion implies force ». Cette fois-ci, la force n'est plus une application faite à l'objet, mais plutôt une de ses propriétés, une quantité appartenant à l'objet. Les termes employés par les élèves sont nombreux pour référer à cette quantité : « force, élan, vitesse, énergie, inertie » (Viennot, 1996,

p. 76); en anglais « power, force, acceleration, velocity, momentum, inertia, or energy » (Halloun & Hestenes, 1985, p. 1060). Les chercheurs ont employé le terme « momentum », « tonus » et surtout celui d'« impétus » pour désigner cette quantité invoquée par les élèves pour expliquer le mouvement.⁸

Ainsi, le mouvement des objets est soumis à un certain nombre de principes assez partagés chez les élèves. Tout d'abord, pour qu'il y ait mouvement d'un objet au sein d'un milieu offrant une résistance, il est nécessaire que l'impétus de l'objet soit plus grand que la résistance. Puis, lors du mouvement, l'impétus se dissipe graduellement, occasionnant le ralentissement de l'objet.

2.1.2.4 Les caractéristiques des conceptions

Le recensement des conceptions a permis aux chercheurs d'identifier quelques-unes de leurs caractéristiques apparentes, que nous rapporterons ici pour le cas spécifique des conceptions spontanées en mécanique.

La consistance à travers les populations, l'efficacité et la persistance

Ces conceptions sont répandues à travers les différents niveaux d'éducation, dans des proportions cependant variables. En fait, même les enseignants en formation, ayant complété leur cours en mécanique, y ont largement recours (Galili & Bar, 1992; S. Palmer, 1997). Les individus ne possèdent pas ces conceptions en dynamique du fait d'une absence d'exposition aux lois newtonienne, puisque celles-ci sont enseignées dès le secondaire. Ces conceptions sont donc très résistantes à l'enseignement.

⁸ Le terme « impétus » fait référence aux théories du mouvement proposées au Moyen-Âge par certains penseurs scolastiques. Nombreux sont les chercheurs qui ont souligné les ressemblances entre les conceptions des élèves à propos du mouvement et diverses conceptions historiques. Selon les éléments de conceptions et des difficultés d'apprentissage mis en évidence, les chercheurs ont tracé des parallèles avec les théories d'Aristote, de Buridan et d'autres penseurs scolastiques (Fishbein, Stavy, & Ma-Naim, 1989; McCloskey, 1983; Sequeira & Leite, 1991), de même que celles du jeune Galilée (Clement, 1983) et du jeune Newton (M. S. Steinberg, Brown, & Clement, 1990). Mais il ne faut pas pousser le parallèle trop loin : les conceptions des étudiants sont loin d'être aussi explicites, détaillées, cohérentes, appliquées de manière consistante à travers les contextes, et intégrées dans une conception du monde que celles défendues dans l'histoire des sciences (Saltiel & Viennot, 1985; Gauld, 1991).

Cette résistance peut être expliquée d'une part par l'efficacité de ces conceptions ; celles-ci permettent d'expliquer et de prédire en bonne approximation la plupart des phénomènes dynamiques rencontrés dans les situations familières (Champagne et al., 1980; Viennot, 1979). L'existence omniprésente du frottement dans notre environnement fait en sorte que le repos semble être l'état naturel d'un objet. La résistance de l'air et le frottement avec le sol font en sorte que pour maintenir un objet à une vitesse constante, il est nécessaire qu'il lui soit appliqué une force constante : la vitesse est donc proportionnelle à la force. En l'absence de force extérieure, un objet ralentira progressivement jusqu'à s'immobiliser. La conception de l'impétus permet d'intégrer rapidement ces observations. Dans cette perspective, c'est la mécanique de Newton qui apparaît étrange, ce qui est après tout normal puisqu'elle se base sur le principe d'inertie, un principe produit à l'aide d'une idéalisation à l'endroit des forces de frottement.

En plus de posséder une certaine efficacité, les conceptions invoquées par les élèves en dynamique sont résistantes aux observations entrant en conflit avec leurs réponses, par exemple lors des démonstrations faites en classe. Il faut rappeler que les conceptions des élèves sont implicites : elles n'ont pas le caractère explicite, axiomatique, formalisé et systématique de la théorie de Newton. En conséquence, elles sont assez flexibles, pouvant intégrer localement de nouvelles informations sans produire de conflits explicites avec le reste des éléments de la conception.

La variation à travers les contextes

Un des attraits majeurs d'une théorie comme celle de Newton est l'immense domaine d'application de ses lois. Ce requis n'est pas aussi bien respecté par les conceptions intuitives des élèves. En effet, bien que pour des situations précises les réponses des élèves soient stables, on dénote plusieurs variations lorsque les situations changent ne serait-ce que superficiellement.

D'abord au niveau des termes employés : le mot « force », par exemple, est employé de manière ambiguë et variable. Aussi, des aspects considérés comme non pertinents dans la perspective newtonienne viennent affecter les prédictions de plusieurs élèves (Halloun & Hestenes, 1985).

La fragmentation des conceptions intuitives des élèves en dynamique semble par ailleurs varier en fonction du niveau d'éducation. Pour des situations similaires, les élèves du secondaire utilisent davantage de raisonnements différents que ne le font des étudiants universitaires, même si plusieurs de ceux-ci emploient une conception pré-newtonienne (S. Palmer, 1997).

Discussion

En somme, les recherches descriptives que nous venons de citer concernant la physique du mouvement démontrent clairement l'existence de conceptions spontanées chez les élèves de même que certaines de leurs caractéristiques (fréquentes, efficaces, résistantes, fluctuantes, etc.). Malgré la faible réflexion théorique associée à ces premières recherches, les résultats ainsi obtenus parviennent néanmoins à discréditer les conceptions de l'apprentissage présupposant un « vide cognitif » chez les élèves, vide que l'enseignement viendrait combler. Ce genre de présupposition a longtemps été présent dans les pratiques d'enseignement, de même qu'en filigrane dans certaines théories de l'apprentissage.

Au cours des années 1980 a émergé une nouvelle conception de l'apprentissage en didactique de sciences et des mathématiques, mais aussi dans le milieu de l'éducation en général. L'appellation « constructivisme » de cette conception de l'apprentissage s'est progressivement imposée pour finalement dominer au début des années 90. Sans prétendre que le programme de recherche sur les conceptions des élèves soit l'unique cause de l'émergence de cette perspective constructiviste, ses résultats donnent probablement le plus bel exemple de la nécessité de cette dernière.

2.1.3 Le constructivisme psychologique en didactique des sciences

2.1.3.1 Les volets du constructivisme et son apparence révolutionnaire

Le constructivisme en didactique ne constitue pas une position théorique explicite et univoque, et c'est pourquoi il est préférable parler de « perspective constructiviste » plutôt que de « théorie constructiviste ». De manière commode, mais certainement simpliste, il est possible de présenter le constructivisme en trois volets (Astolfi et al., 1997, pp. 49-50) :

- Un volet épistémologique, qui concerne la conception que l'on se fait de l'objet du savoir; où est souligné l'aspect hautement construit des objets de la science.
- Un volet psychologique, qui concerne le modèle que l'on adopte pour appréhender l'activité intellectuelle du sujet; où est souligné chez l'apprenant le rôle déterminant joué par ses structures cognitives préexistantes à l'expérience.
- Un volet didactique, qui concerne les procédures d'enseignement quand elles mettent l'élève au cœur des apprentissages. Selon ce point de vue, « les savoirs ne se transmettent pas ni ne se communiquent pas, à proprement parler; ils doivent toujours être construits ou reconstruits par l'élève qui, seul, apprend. »

Le terme « constructivisme » touche ainsi plusieurs domaines. Mais remarquons qu'à chacun de ceux-ci correspond l'un des registres de la didactique des sciences. Il est donc naturel que la « révolution constructiviste » ait été si acclamée : sa venue constitua en quelque sorte l'instauration d'une nouvelle vision globale de la nature de la connaissance scientifique et de son apprentissage.

Selon Robbie Case, l'arrivée du constructivisme dans le milieu de l'éducation n'a été qu'une répercussion tardive de développements au sein de traditions philosophiques beaucoup plus anciennes.

« In each tradition, new principles have been proposed first in philosophy. The implications of these principles have then been worked out, at some later period in time, by psychologist and/or educators. As a result, developments in psychology and education have appeared to “recapitulate” those that took place in philosophy a good deal earlier. » (Case, 1996, p. 82)

Par exemple, des changements de traditions (graduels et incomplets) se sont produits depuis 40 ans dans le domaine de l'éducation : au point de vue empiriste a succédé celui rationaliste (incluant notamment la perspective constructiviste), puis un davantage sociohistorique (avec ce que l'on appelle le socioconstructivisme).

Il faut donc employer le terme « révolution » avec un bémol en tête lorsque l'on fait référence au constructivisme en didactique. Les présupposés épistémologiques du constructivisme remontent à Kant, et toute une tradition philosophique a depuis développé ces thèses principales de diverses façons. De plus, au niveau psychologique, les contributions de Piaget et de son école remontent déjà à plusieurs décennies. Ainsi, s'il est possible de parler de « révolution » en didactique des sciences, c'est en référence à une adoption plutôt rapide et généralisée d'éléments épistémologiques préexistants, déjà disponibles à l'extérieur de la discipline.

2.1.3.2 Le constructivisme modeste de Rosalind Driver

Avec cette mise en garde à l'esprit, nous pouvons présenter le volet psychologique du constructivisme didactique avec un peu plus de détails. Puisque le nombre de plaidoyers constructivistes est très élevé et que ceux-ci peuvent varier quant à leur clarté ou leur radicalité, nous ne tenterons pas ici d'en faire une synthèse. Nous nous contenterons plutôt de présenter la position de Rosalind Driver, qui fut l'une des premières chercheuses à promouvoir cette conception de l'apprentissage dans le domaine de la didactique des sciences. Cette position est représentative de ce que l'on peut appeler un « constructivisme modeste », une perspective ayant fait largement l'objet d'un consensus tacite dans la communauté.⁹

En accord avec ses propres recherches sur les conceptions des élèves, et de manière quelque peu décalée avec celles-ci, Driver a proposé de manière explicite sa conception de l'apprentissage. Avec sa collègue Bell, elle résume en quelques points sa conception du constructivisme psychologique :

« In summary, a constructivist view of learning emphasizes:

1. Learning outcomes depend not only on the learning environment but also on the knowledge of the learner.
2. Learning involves the construction of meanings. Meaning constructed by students from what they see or hear may or may not be those intended. Construction of a meaning is influenced to a large extent by our existing knowledge.
3. The construction of meaning is a continuous and active process.
4. Meanings, once constructed are evaluated and can be accepted or rejected.
5. Learners have the final responsibility for their learning.
6. There are patterns in the types of meanings students construct due to shared experiences with the physical world and through natural language. » (Driver & Bell, 1986, pp. 453-454)

Driver reconnaissait que cette conception de l'apprentissage n'était pas originale, au sens où elle découlait des développements en psychologie cognitive au cours des dernières décennies. Mais il n'en demeurait pas moins qu'à l'intérieur du domaine de l'éducation, cette conception était assez nouvelle.

On a bien évidemment critiqué la théorie de l'apprentissage de Driver (qui comprend plusieurs autres thèses périphériques). Norris et Kverbekk (1997) lui ont

⁹ L'appellation « constructivisme modeste » est employée par opposition au « constructivisme radical » défendu Glasersfeld, souvent mentionné en didactique.

reproché, entre autres, son manque de spécificité concernant les transitions cognitives survenant chez les élèves, puis de vouloir inclure trop de paramètres (relatifs à l'individu ou relatifs à l'environnement), le tout rendant la théorie de Driver très difficile à appliquer par les enseignants. Ce à quoi Driver a répondu que sa théorie n'était pas formulée à un niveau de détail permettant de fixer normativement des buts à atteindre et des stratégies d'enseignement spécifiques pour les atteindre :

« Does it constitute a theory at all? I would say that insofar as it provides a framework for thinking about teaching and learning which can constrain choices and aid decision making, it does constitute a theory. However, it is a theory which provides a perspective rather than a prescription and is perhaps appropriately described as a framework theory. » (Driver, 1997, p. 1015)

Ainsi, la conception constructiviste de l'apprentissage avancée par Driver doit être vue pour ce qu'elle est : une perspective sur l'apprentissage. Qui plus est, du fait de son degré de généralité, cette perspective doit être considérée, toujours selon Driver, comme étant non testable (Driver, 1997, p. 1017).

2.1.3.3 Les critiques du constructivisme psychologique

L'acceptation rapide d'un constructivisme psychologique modeste comme celui de Driver dans les années 1980 peut être en partie expliquée par le fait que ses thèses de base sont plutôt banales (Millar, 1989, p. 588). Mais même banales, elles peuvent faire l'objet de critiques. Notre objectif dans cette section ne sera pas de retracer l'histoire des idées constructivistes de même que leur essor et déclin à l'intérieur du milieu de l'éducation, quelques chercheurs s'étant déjà occupés de cette tâche (Solomon, 1994; Tobin, 2000). Nous nous limiterons plutôt à présenter brièvement quelques-unes des principales critiques effectuées à l'endroit de ce constructivisme psychologique modeste, et ce, afin de garder à l'esprit qu'il ne s'agit là au fond que d'une perspective qui a suscité beaucoup d'intérêt et non d'une panacée. Selon nous, plusieurs des critiques pourraient se ramener à deux insuffisances de base : le sous-développement de ses thèses et son trop grand individualisme.

Tout d'abord, comme le mentionne Driver, le constructivisme constitue une perspective sur l'apprentissage et non une théorie permettant des prédictions. Ceci se traduit premièrement dans le fait que le constructivisme ne fournit aucun mécanisme précis de développement des construits employés par les élèves pour expliquer le

monde (Osborne, 1996, p. 65; Arcà & Caravita, 1993, p. 79). Dans un deuxième temps, cela implique qu'une telle perspective sur l'apprentissage n'entraîne pas de modèle d'instruction particulier (Millar, 1989, p. 589) : la construction se faisant dans la tête de chaque élève et étant soumise à leurs particularités individuelles, c'est l'utilisation d'une variété d'activités d'instruction qui a le plus de chance de répondre aux besoins de l'ensemble des élèves de la classe; il n'existe pas d'approche valable unique (Gruender, 1996, pp. 26-28; Osborne, 1996, pp. 75-76). De plus, les positions pédagogiques avancées par les constructivistes ne seraient somme toute que communes :

« Constructivism has done a service to science and mathematics education: by alerting teachers to the function of prior learning and extant concepts in the process of learning new materials, by stressing the importance of understanding as a goal of science instruction, by fostering pupil engagement in lessons, and other such progressive matters. But liberal educationalists can rightly say that these are pedagogical commonplaces, the recognition of which goes back at least to Socrates. » (Matthews, 2002, p. 42)

La seconde ligne de critiques s'attaque directement ou indirectement à l'individualisme trop présent dans le constructivisme modeste, lui reprochant de ne pas être représentatif des apprentissages effectués en classe (Erickson, 2001, p. 79). Il y a d'abord une tension entre d'une part la valorisation, par le constructivisme, de la recherche individuelle d'une adaptation entre pensée et faits, et d'autre part la réalité scolaire où les objectifs d'apprentissage sont fixés d'avance, correspondent au savoir scientifique socialement partagé et sont couverts à un rythme collectif (Arcà & Caravita, 1993, pp. 86-87). Puis, cet individualisme se fait sentir chez certains auteurs constructivistes lorsqu'ils font le passage d'une critique de l'enseignement magistral et autoritaire traditionnel à une survalorisation de la connaissance en tant que construction individuelle (Gruender, 1996, p. 21) qui ne pourrait être élaborée à l'occasion d'une instruction directe.¹⁰ Or il est la plupart du temps impossible

¹⁰ Strike (1987, p. 483) note que l'expression « transmission passive » a joué un rôle essentiellement rhétorique dans les plaidoyers constructivistes :

« Educators often talk as though there are people out there who treat knowledge as passive. They sound as though teachers believe that knowledge can somehow be inserted into students' heads without students' active response to it. But does anyone hold such a view, or do any common teaching practices really assume it? I find this doubtful. [...] Most people who call themselves constructivists are quite committed to the view that listening, understanding, and remembering are cognitive activities. Why, then, is the verbal transmission of information stigmatized with the label "passive learning" or otherwise described with passive language such as

d'éviter une forme d'instruction directe dans l'enseignement des sciences (Howe & Berv, 2000, p. 32), les concepts scientifiques étant trop éloignés de l'expérience courante des élèves :

« For, in the absence of telling or showing, from whence are students to gain the scientist's understanding? Science theoretical constructs are critical in enabling common experiences to be reinterpreted. The notion that the earth spins, that inherited characteristics are transmitted through coded information on genes, and that all matter is made of a limited number of elements, are not self-evident. Science is fundamentally unnatural (Wolpert, 1992) and not common-sensical (Cromer, 1993). Therefore, children must be shown and introduced to ideas that are not palpable and to the advantages that such concepts bring in understanding our world. » (Osborne, 1996, p. 77)

En réaction à cette insuffisance, une composante socioculturelle a été ajoutée au programme constructiviste au cours des années 1990 pour former ce qui appelé le « socioconstructivisme » (Erickson, 2001). Le socioconstructivisme se situe davantage dans la tradition sociohistorique et conçoit l'apprentissage comme l'accession de l'individu à une communauté culturelle, l'enseignant jouant alors le rôle de médiateur entre l'apprenant et la culture (scientifique ici). Il ne s'agit cependant pas de mettre une croix sur l'analyse des activités cognitives de l'élève : le socioconstructivisme se veut une synthèse des analyses des aspects cognitifs et sociaux de l'apprentissage. Encore une fois, le parcours de Rosalind Driver a été indicateur des tendances en didactique des sciences. Après avoir aidé à la définition et à la promotion d'un constructivisme modeste au cours des années 80, elle a fortement été influencée par la tradition sociohistorique au début des années 90. Avec ses collègues, elle a alors offert une nouvelle conception de l'apprentissage et de l'enseignement, en superposant et liant leurs dimensions individuelle et sociale (Driver et al., 1994).

Nous n'irons pas plus en profondeur dans cette présentation du socioconstructivisme, les dimensions sociales de la cognition n'étant pas nécessaires à un premier traitement de notre question de recherche.

Vers le changement conceptuel

Afin de développer de manière éclairée de nouvelles stratégies d'enseignement prenant en compte ces conceptions des élèves, il a fallu proposer des modèles

“rote learning”? I think that the answer is that “passive” is a pejorative term. As such it is an effective tool for insulting views one dislikes. That it is generally meaningless or inappropriately applied does not necessarily reduce its effectiveness. »

d'apprentissage plus précis qu'une forme de constructivisme psychologique modeste. Ce dernier, bien qu'il ait reçu énormément de publicité, s'avère par lui-même insuffisamment spécifique.

C'est pourquoi qu'au lieu de s'arrêter à la formulation de ce constructivisme modeste, le programme de recherche sur les conceptions des élèves s'est progressivement transformé en un programme de recherche sur la nature et l'évolution de ces conceptions, i.e. sur le processus de changement conceptuel. De nombreux modèles ont été proposés depuis 25 ans, les années 90 ayant été particulièrement fertiles. Ce thème a été exploré avec une fébrilité palpable, puisque semble s'y jouer une mise importante pour la didactique : la définition de ce qu'est, fondamentalement, apprendre les sciences.

Nous consacrerons la section 2.2 à une revue des recherches portant sur le changement conceptuel, et c'est au sein de celles-ci que nous trouverons les résultats les plus pertinents pour nous permettre d'atteindre notre premier objectif de recherche, soit l'élaboration d'un modèle satisfaisant du phénomène des conceptions multiples dans l'apprentissage des sciences. Cependant, nous désirons auparavant compléter notre tour d'horizon des repères théoriques en abordant le registre épistémologique de la didactique des sciences et le constructivisme que l'on retrouve ce niveau.

2.1.4 Le constructivisme épistémologique en didactique des sciences

La « révolution constructiviste » en didactique des sciences ne s'est pas contentée de suggérer, au niveau psychologique, que l'apprenant se construit ses propres connaissances, sa propre compréhension du monde. Elle a également mis de l'avant, au niveau épistémologique, une certaine conception de la nature des connaissances scientifiques elles-mêmes.

Dans cette section nous présenterons tout d'abord une version minimale du constructivisme épistémologique et montrerons qu'en fait une grande variété de théories peuvent être de cette façon dites « constructivistes ». Par la suite, nous ferons le lien en la thèse constructiviste et la question du relativisme en épistémologie. De cette discussion ressortira l'affirmation que l'intérêt d'une théorie épistémologique

pour la didactique des sciences ne réside pas dans le fait d'être constructiviste, mais plutôt dans ce qu'elle parvient à nous dire à propos de la pensée scientifique et de son apprentissage. Finalement, nous donnerons en exemple quelques théories épistémologiques influentes (dont le correctionnisme de Robert) et discuterons de leur intérêt respectif pour la didactique des sciences.

2.1.4.1 Les variétés de constructivisme épistémologique

Une définition minimale

Le constructivisme est la position théorique dominante en didactique des sciences et ailleurs dans le milieu de l'éducation, et le terme s'est vu donner en conséquence une aura de rectitude politique (Phillips, 1997, p. 152). Selon Strike, le terme « constructivisme » a joué un rôle non seulement théorique, mais aussi idéologique : il a permis de créer une certaine unité parmi les chercheurs du milieu de l'éducation, mais au prix de sa clarté conceptuelle :

« Whatever it means, if we are constructivists, at least we know that it is important to be interested in children's misconceptions, to describe how they think about science, that we have Piaget as part of our heritage, and that behaviorists are the bad guys. Loyalty and group identification is made of such stuff. Clarity and intellectual progress are not. » (Strike, 1987, p. 481)

Au niveau épistémologique, en quoi consiste réellement la position constructiviste ? Astolfi et ses collègues, comme plusieurs autres, stipulent que le volet épistémologique du constructivisme consiste à dire que les connaissances scientifiques sont des produits humains, des constructions humaines. Selon Phillips, le constructivisme peut recevoir la formulation minimale suivante :

« Thus, in sum, human knowledge – whether it be the bodies of public knowledge known as the various disciplines, or the cognitive structures of individual knowledge or learners – is *constructed*. » (Phillips, 1995, p. 5)

Mais cette affirmation apparaît bien banale de nos jours : qui ne se dirait pas constructiviste étant donnée cette définition ? Selon Strike (1987, p. 481), le défi que doivent relever ceux qui désirent s'affirmer constructivistes dans le domaine de l'éducation est de présenter des thèses qui ne sont ni triviales, ni fausses de manière flagrante. Brandir la bannière constructiviste ne doit pas être l'activité principale des chercheurs; ceux-ci devraient plutôt s'efforcer d'atteindre une clarté conceptuelle.

Constructivisme et activisme

L'idée que les connaissances sont des inventions humaines résultant d'une activité cognitive a souvent été présentée en didactique comme l'aurait été une idée révolutionnaire. Mais dans quelle mesure cette affirmation générale est innovatrice ? Pour comprendre que cette idée fait partie intégrante du paysage philosophique depuis longtemps, nous pouvons employer la typologie proposée par Lakatos (1970, pp. 104-106) à propos des théories épistémologiques.

Lakatos distingue deux grandes familles de théories : les épistémologies « passivistes » et celles « activistes ». Selon les épistémologies passivistes, la connaissance provient de la nature et s'imprime sur un esprit inerte. S'il y a activité mentale, elle ne peut résulter qu'en une distorsion du processus d'impression et ultimement causer l'erreur. Historiquement, Aristote et notamment les empiristes classiques (comme Hume) ont défendu un tel type de théorie.

Selon les épistémologies activistes, la lecture du « livre de la nature » ne peut se faire sans une activité mentale, sans une interprétation de nos sensations par nos attentes ou nos théories. Par exemple, pour Kant les concepts sont nécessaires pour organiser un contenu sensoriel au sein d'une idée. Ce processus s'effectue à l'aide des deux formes de la sensibilité et des douze catégories de l'entendement, qui sont des facultés intellectuelles innées et universelles. Au sein des épistémologies activistes, Lakatos distingue par la suite celles qui sont conservatistes de celles qui sont révolutionnistes. Les théories activistes conservatistes sont celles qui considèrent que nos structures cognitives sont innées et ne peuvent changer. La théorie de Kant se trouve dans cette catégorie. Au contraire, les théories activistes révolutionnistes reconnaissent que nos structures cognitives peuvent ou doivent être remplacées et améliorées au cours de notre histoire.¹¹ Les principales épistémologies du vingtième siècle sont essentiellement activistes révolutionnistes. Au sein de ce groupe, Lakatos distingue alors celles qui sont révolutionnistes-conservatistes, au sens où elles

¹¹ Il faut s'assurer de distinguer les termes « conservateur » et « révolutionnaire » des termes « conservatiste » et « révolutionniste ». L'adjectif « conservatrice » s'applique à une théorie scientifique qui préserve un certain nombre d'idées importantes d'une théorie antérieure, alors que « conservatiste » s'applique à une théorie épistémologique qui soutient que les théories scientifiques changent peu ou ne doivent pas changer. Même remarque pour les termes « révolutionnaire » et « révolutionniste ».

reconnaissent que les structures cognitives changent, mais qu'elles ne le font (ou ne doivent le faire) que peu fréquemment, de celles qui affirment que les structures cognitives changent souvent (ou doivent le faire), les théories révolutionnistes-révolutionnistes. Le schéma de la figure 4 résume la typologie de Lakatos.

La question qui nous intéresse est de savoir où se positionnent les épistémologies constructivistes dans le schéma de Lakatos. Si l'on comprend le constructivisme épistémologique comme étant la simple affirmation que les connaissances sont construites, nous devons reconnaître que toutes les épistémologies de la branche activiste sont constructivistes, puisque toutes supposent un travail de constitution de la part de l'esprit. Dans cette optique, le constructivisme n'exclut que peu de positions épistémologiques, et encore moins celles récentes.¹²

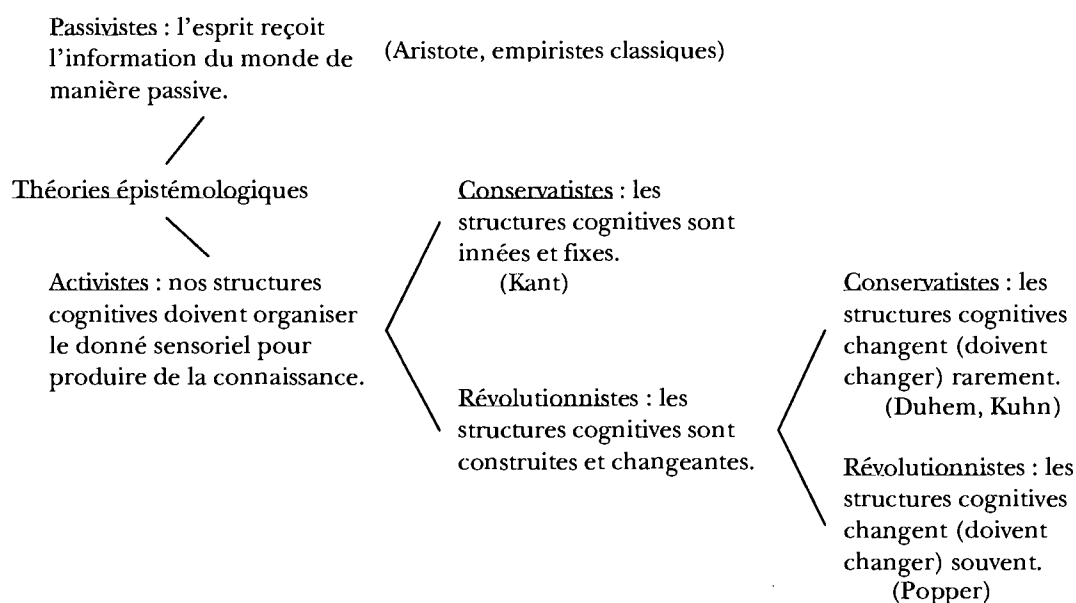


Figure 4. Schéma représentant la typologie proposée par Lakatos (1970).

Les variétés de constructivismes

Une fois adoptée la thèse que les connaissances scientifiques sont des constructions produites par l'activité cognitive humaine, il est possible de distinguer plusieurs types

¹² De plus, il est possible de contester l'assimilation des empiristes classiques aux épistémologies passivistes, car s'il est vrai que ceux-ci affirment que l'expérience sensorielle est imposée à l'esprit par la nature, le processus d'élaboration des généralisations requiert souvent une certaine activité intellectuelle (Strike, 1987, p. 482).

de théories. Phillips (1997) identifie des dimensions sur lesquelles les épistémologies constructivistes peuvent différer :

- Le type de connaissance : le constructivisme proposé s'intéresse-t-il au développement des connaissances au niveau de l'individu ou à celui de la discipline publique ?
- Les agents de la construction : le constructivisme décrit-il l'activité de construction à un niveau des processus cognitifs individuels ou encore en termes de processus sociaux et politiques ?
- Les déterminants de la production des connaissances : la théorie constructiviste donne-t-elle un plus grand rôle à la nature ou aux humains dans le processus de production des connaissances ? Autrement dit, dans quelle mesure les connaissances construites sont des inventions contraintes par la nature ? (Selon Phillips, p. 160, c'est sur cette dimension que les constructivistes se définissent essentiellement.)

La variété des types de théories qui peuvent ainsi se dire constructivistes dépasse le seul cadre de la philosophie. En fait, plusieurs de ceux qui s'affirment constructivistes sont des psychologues ou encore des sociologues. Pour le didacticien des sciences, la question n'est donc pas de savoir si telle théorie est ou non constructiviste (elles peuvent pratiquement toutes l'être dans une certaine mesure), mais plutôt de déterminer ce que cette théorie a spécifiquement à dire d'intéressant sur les processus de production des connaissances.

Exemple : le constructivisme de Piaget

Parmi tous les chercheurs ayant influencé la didactique des sciences, Piaget est celui qui est le plus souvent associé au terme « constructivisme ». Prenons donc quelques lignes pour positionner la théorie de Piaget¹³ dans les dimensions de Phillips et la typologie de Lakatos.

Tout d'abord dans les dimensions proposées par Phillips, Piaget couvre un domaine assez large. Premièrement, il s'intéresse à la genèse des capacités épistémiques du sujet individuel, mais en gardant toujours en tête que cette connaissance aide à mieux comprendre la nature des savoirs scientifiques eux-mêmes. Deuxièmement, le développement cognitif de l'enfant est étudié dans une perspective nettement individuelle (par opposition à Vygotsky par exemple). Finalement, selon Piaget, le développement intellectuel n'est pas déterminé

¹³ Pour une présentation des aspects philosophiques de la théorie de Piaget, voir Kitchener (1986).

entièrement par les structures cognitives du sujet ou encore par l'environnement objectif. Piaget se situe dans une position médiane ou synthétique : il défend un interactionnisme, selon lequel les structures épistémiques et la connaissance sont le fruit d'une interaction entre le sujet et l'environnement via l'assimilation et l'accommodation (Kitchener, 1986, p. 102).

Mais le constructivisme de Piaget peut être compris de deux manières et donc classé de deux façons différentes dans la typologie de Lakatos, selon qu'il fasse référence aux *instruments* de connaissance, i.e. les structures de l'intelligence, ou aux *contenus* de la connaissance, i.e. la compréhension et l'explication du réel (Legendre-Bergeron, 1980, pp. 4-7). S'il réfère aux contenus de la connaissance, le constructivisme piagétien peut être formulé comme suit : « Constructivism is the view that the subject constructs the epistemic object (the object as known). » (Kitchener, 1986, p. 101) Si par contre référence est faite aux instruments de connaissances, le terme « constructivisme » prend une signification différente et plus englobante :

« The epistemic object is said to be constructed largely because the epistemic structures necessary for knowledge are constructed. Hence, another closely related formulation of constructivism would be: Constructivism is the view that the subject constructs the cognitive schemes, categories, concepts, and structures necessary for knowledge. » (Kitchener, 1986, p. 102)

Par exemple, c'est à ce constructivisme des structures de l'intelligence que fait référence Piaget dans l'extrait suivant :

« 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 une 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. » (Piaget, 1982, p. 53)

Comment positionner le constructivisme de Piaget dans la typologie de Lakatos ? Au niveau des instruments de connaissance, Piaget est activiste. Mais, contrairement à Kant (activiste conservatiste), les structures de l'intelligence ne sont pas selon lui innées : elles se développent et se complètent progressivement, jusqu'à l'atteinte d'un équilibre final avec l'acquisition de la pensée formelle. Mais puisque le développement de ces structures ne constitue pas un renversement à proprement

parler de celles antérieures, nous ne pouvons le classer dans la branche révolutionniste des activistes. Il occupe une position en quelque sorte intermédiaire.

La situation est différente au niveau des contenus de connaissance : Piaget est ici activiste révolutionniste. Dans les mots de Legendre :

« La pensée formelle ne représente donc l'équilibre terminal qu'au sein du développement psychogénétique et non au sein de l'évolution de la connaissance en général. [...] Cela signifie que les instruments de connaissances (structures logico-mathématiques) dont il dispose désormais lui donnent accès à une infinité de contenus de connaissance (physiques ou empiriques). » (Legendre-Bergeron, 1980, pp. 20-21)

Autrement dit, après l'atteinte de la pensée formelle, l'individu a les capacités pour changer de théorie sur le monde lorsque le besoin s'en fait sentir.¹⁴

2.1.4.2 Constructivisme et relativisme

La variété des comptes-rendus constructivistes de la connaissance scientifique est grande. L'intérêt de chacun pour la didactique doit être déterminé sur une base individuelle. Une question est inmanquablement posée à ceux qui brandissent le terme « constructivisme » comme une bannière : « Votre théorie parvient-elle à préserver l'objectivité de la science ? Parvient-elle à reconnaître que certaines idées sont meilleures que d'autres ? »

La question du constructivisme doit donc être rapprochée de celle du relativisme, là où se trouve la réelle crainte associée aux épistémologies constructivistes.

Relativisme faible et relativisme fort

Une conception très optimiste du produit de l'activité scientifique serait celle de l'obtention d'une connaissance absolue, autrement dit la formulation des principes régissant le comportement de la nature, soit une connaissance qui équivaldrait à celle de Dieu (Descartes). Cette prétention n'apparaît cependant plus plausible depuis longtemps :

« [T] est depuis Kant généralement admis que l'homme, bien qu'il puisse toujours énoncer à propos de la réalité en soi, ne peut prétendre être en mesure de *tester la validité* de tels énoncés [...]. Accepter cette conclusion revient à admettre l'impossibilité d'échapper [à un]

¹⁴ Nous n'essaierons pas de déterminer si Piaget se classe dans la sous-branche conservatiste ou révolutionniste des activistes-révolutionnistes, l'exemple du constructivisme piagétien ayant déjà reçu suffisamment d'attention de notre part.

relativisme faible : à reconnaître que toute connaissance humaine est *relative à certaines conditions* (à spécifier) *ayant trait aux moyens humains de la connaissance.* » (Soler, 2000, p. 154)

À partir de la thèse du relativisme faible, qui en elle-même n'implique aucun jugement de valeur quant à la connaissance, le relativisme fort conclut que les êtres humains n'ont pas les moyens de démontrer qu'un discours quel qu'il soit est supérieur à un autre (Soler, 2000, p. 153). Il ne serait pas possible, selon cette position, de démontrer qu'une théorie scientifique est meilleure qu'une autre, ou encore meilleure qu'une théorie non scientifique (comme un mythe par exemple). Ce relativisme radical (ou anarchisme épistémologique) prétend en effet que l'activité constitutive est à ce point déformante qu'elle ne peut être contrôlée par une activité rationnelle constante.

« Les problèmes épistémologiques concernent la possibilité pour un sujet connaissant d'avoir une connaissance vraie d'un monde réel. Atteindre une telle connaissance signifie que, de ce monde réel (en présumant qu'il existe) aux observations que nous faisons sur lui, à notre langage observationnel, à notre langage scientifique et à son langage métascientifique d'arrière-plan, et aux structures cognitives du sujet connaissant, il y aurait une continuité et une transparence telles que, sans aucune déformation cognitive, le sujet connaissant pourrait représenter adéquatement dans sa science la structure de ce monde réel.

[...] Au sens large, une théorie épistémologique devrait contenir une théorie des relations entre les constituants de la connaissance mentionnés ci-dessus. Une philosophie des sciences radicalement dogmatique soutiendrait que, à partir des régularités du monde jusqu'aux structures du sujet connaissant, il y aurait une correspondance exacte, de sorte que notre connaissance serait vraie. [...] Une philosophie des sciences radicalement anarchiste soutiendrait, contre le dogmatisme, qu'il y a une rupture déformante au sein de chacune des paires de constituants de la connaissance dont il est question ici. La plupart des philosophies des sciences peuvent être considérées comme se situant quelque part entre ces deux extrêmes. » (Robert, 1993, pp. 8-9)

Certains épistémologues (comme Feyerabend et Rorty) et plusieurs sociologues des sciences (comme Bloor) ont défendu des formes fortes de relativisme. Ces positions sont évidemment critiquées, à la fois par les épistémologues non relativistes et des scientifiques s'efforçant de défendre eux-mêmes leur entreprise (voir par exemple : Brown, 2001; Nola, 2003). Le débat résultant est très animé.

Le défi : éviter l'absolutisme et l'anarchisme épistémologique

Selon Robert, l'anarchisme (ou relativisme fort) et le dogmatisme (qui considère que des connaissances absolues peuvent être atteintes) freinent l'activité de recherche :

« Faire appel à l'anarchie, c'est assumer que l'on ne peut pas trouver de principes régulateurs dans ce que nous observons; l'utilisation de la notion de hasard arrête donc

l'investigation rationnelle. Cette attitude est une fuite facile devant les problèmes, laquelle s'avère socialement inutile. Le rejet d'une solution n'est en effet valable que s'il propose une meilleure solution. [...]

Le dogmatisme est opposé à l'anarchisme, mais il n'est pas davantage acceptable. Au lieu de rejeter nos théories scientifiques, le dogmatisme leur assigne la valeur de vérités irréfutables. Il s'ensuit un conservatisme qui interdit le progrès scientifique. [...]

Le dogmatisme est aussi populaire que l'anarchisme, parce que, comme ce dernier, il est basé sur la facilité d'éviter un questionnement soutenu. » (Robert, 1993, pp. 3-4)

Pour encourager la poursuite de l'activité scientifique, une théorie épistémologique doit adopter une position intermédiaire. Si les théories ne possèdent pas une valeur absolue, elles ne sont pas pour autant équivalentes entre elles : il est possible de les critiquer de manière rationnelle et de voir un progrès dans leur dynamique. Un défi épistémologique important est alors d'identifier la nature du progrès cognitif des sciences et celle de son objectivité.

Le relativisme faible et la question du réalisme

Une autre question importante débattue en épistémologie porte sur le réalisme, soit le lien qu'entretiennent les théories avec le monde. Au niveau sémantique, on peut se demander comment l'on doit comprendre la nature des théories; au niveau épistémique, on se demande dans quelle mesure il est possible de dire si les théories qui sont proposées tendent vers la vérité. Ces questions sont souvent incorporées aux discussions entourant le constructivisme en didactique des sciences. Pourtant, la question du caractère construit des connaissances scientifiques et celle de la vérité en science sont en partie indépendantes.

Nous nous limiterons ici à voir comment le relativisme faible s'intègre aux deux principales familles de positions sur le réalisme scientifique : le réalisme et l'instrumentalisme.

Le réalisme épistémologique

La première famille de positions, le réalisme épistémologique, considère que les théories doivent être comprises tel quel (c'est-à-dire comme décrivant la réalité) et qu'elles sont littéralement vraies ou fausses, et ce indépendamment de nos capacités à l'attester (Nadeau, 1999, p. 589).

Selon cette position tout à fait naturelle en science, l'activité scientifique tenterait de produire des théories vraies. Il serait cependant naïf de considérer que nos

théories actuelles sont en fait ces théories idéales visées par la recherche (réalisme naïf); après tout, l'histoire des sciences est un musée de théories déçues. Une affirmation plus crédible est de dire que les théories successives se rapprochent de cette théorie idéale, qu'elles convergent progressivement vers cette représentation unique et nécessaire (réalisme convergent). Dans ce processus de convergence, le progrès est souvent conçu comme cumulatif, linéaire et en quelque sorte nécessaire. Certains diront que la convergence s'effectue au niveau des entités postulées par les théories scientifiques (réalisme des entités), alors que d'autres se limiteront à affirmer que c'est dans les relations identifiées par ces théories qu'elle se produit (réalisme structural).

Dans cette position, le fait que nos connaissances soient relatives à nos capacités humaines ne mine aucunement la recherche de la théorie ultimement vraie, car les théories scientifiques sont alors conçues comme

« [...] le produit *nécessaire* de l'interaction sujet-objet – étant fixées la nature (invariante) du sujet et la nature (prédéterminée) de la réalité en soi. La théorie correspondant au terme idéal de la recherche étant le produit de contraintes *objectives* et de contraintes subjectives *universelles* toutes deux *nécessaires*, elle peut être du coup pensée comme unique et *n'ayant pu être autre*. » (Soler, 2000, pp. 157-158)

L'instrumentalisme

Dans cette perspective, une théorie scientifique n'est plus considérée comme une description fidèle de la réalité, mais plutôt comme un instrument pour classer, prédire et agir sur les phénomènes :

« [L]es théories sont des instruments (des moyens) pour atteindre certains buts. Ainsi, selon cette conception, une théorie doit permettre de prédire des faits observables sur la base des faits observés (instrument de prédiction), être un moyen efficace d'épargner des efforts et du temps (instrument de classification et de calcul), et, enfin, (re)présenter le monde d'une façon à la fois simple et esthétique (instrument de conceptualisation). » (Nadeau, 1999, p. 337)

« À la métaphore de la *théorie-reflet* qui sous-tend la position réaliste, l'antiréaliste [instrumentaliste] oppose celle de la *théorie-outil*. » (Soler, 2000, p. 110)

Même si l'instrumentalisme abandonne l'idée d'une correspondance entre les théories scientifiques et la réalité, il n'est pas tenu pour autant de considérer que le sujet est libre d'élaborer n'importe quelle théorie. Tout comme le réaliste, l'instrumentaliste peut supposer que même si la connaissance humaine est relative aux sujets connaissant, les caractéristiques de ces derniers sont identiques d'un sujet

à l'autre, de sorte qu'étant donnée la réalité indépendante, la connaissance ne peut être n'importe quoi.

Alors que le réaliste épistémologique adopte généralement une conception téléologique du progrès scientifique (il y a convergence vers une théorie unique et nécessaire), celle de l'instrumentaliste est évolutionniste. Le développement des sciences est alors conçu « comme un processus d'adaptation : les théories victorieuses sont celles qui, parce qu'elles sont plus adaptées, ont survécu dans la lutte avec les théories concurrentes. » (Soler, 2000, p. 151) Le processus historique n'est pas orienté vers un but unique et final : plusieurs théories concurrentes peuvent cohabiter à un moment donné, et leur évolution est aveugle et non nécessaire. Puisque l'évolution des théories n'a pas à suivre une trajectoire convergente, le progrès n'a pas à être conçu comme continu et cumulatif : de nouvelles théories mieux adaptées peuvent rompre drastiquement avec leurs prédécesseurs, tant au niveau des entités que des relations.

Constructivisme et relativisme en didactique des sciences

Des sections précédentes sur le constructivisme et le relativisme, nous pouvons conclure trois choses. Premièrement que c'est un lieu commun en épistémologie que de dire que les connaissances sont relatives à nos moyens humains de connaître (relativisme faible) et que c'est en employant activement ces moyens que l'esprit peut parvenir à se développer une compréhension de son interaction avec la nature (activisme / constructivisme).

La deuxième conclusion est que ce lieu commun est compatible à la fois avec les conceptions réaliste et instrumentaliste des théories scientifiques. La question du réalisme possède un intérêt philosophique certain, mais son importance pour la didactique semble par contre très limitée : il est difficile de voir les répercussions didactiques que peut avoir une conception réaliste comparativement à une conception instrumentaliste des théories scientifiques.

« What has the venerable philosophical debate between realists and antirealists about scientific knowledge to do with the teaching and learning of science? There is no necessary connection. Constructivists in science education often wrongly assume that the debate can tell us something about the teaching and learning of science. » (Nola, 1997, pp. 32-33)

De plus, mettre inutilement l'accent sur ce débat en didactique des sciences peut avoir la conséquence néfaste d'exclure des discussions concernant le constructivisme (psychologique) des contributeurs potentiels (Burbules, 2000), et, ce qui est peut-être pire, de rebuter les enseignants (au penchant naturellement réaliste) et les détourner ainsi de la littérature constructiviste dans son entier (Grandy, 1997).

La troisième conclusion à tirer est que tout compte-rendu constructiviste sur la connaissance scientifique, que ce soit en philosophie ou en didactique, se doit, pour être crédible, de trouver un moyen d'éviter le relativisme fort (Strike, 1987, p. 481; Phillips, 1995, p. 11). Autrement dit, une position intermédiaire doit être défendue, une où l'on met une croix sur un absolutisme en reconnaissant que les connaissances sont des constructions relatives à nos capacités humaines, tout en évitant cependant la conclusion anarchique selon laquelle ce travail de construction ne laisserait aucune prise à une forme d'objectivité et à un progrès cognitif.¹⁵

Ainsi, au niveau didactique, l'intérêt pour les théories épistémologiques doit certainement dépasser la simple question d'être ou non constructiviste. Nous sommes d'avis que plusieurs sujets de recherches explorés en didactique des sciences peuvent bénéficier d'un rapprochement avec l'une ou l'autre des épistémologies proposées en philosophie. Chacune de ces théories met de l'avant une certaine conception des connaissances scientifiques et/ou de l'activité scientifique. Chacune d'elle contient donc, explicitement ou en filigrane, une conception de la formation à la science.

Dans ce qui suit, notre objectif sera non pas de vulgariser les principales théories épistémologiques de ces dernières décennies, mais plutôt de présenter la famille de positions qui s'avèrera particulièrement utile dans l'élaboration de notre modèle psychologique sur les conceptions multiples, soit celle qui met la résolution des problèmes au cœur de l'activité scientifique.

¹⁵ Une position anarchique s'avèrerait d'ailleurs très problématique pour la didactique des sciences, qui se verrait alors menacée dans son identité et sa pertinence. Si la science n'est qu'un discours parmi d'autres, pourquoi accorder une si grande place à la formation aux sciences ? Et pourquoi s'efforcer de développer la didactique des sciences plutôt que la didactique des mythes ?

2.1.4.3 Quelques épistémologies non retenues

Avant d'aborder la position épistémologique que nous adopterons, prenons le temps de présenter brièvement l'intérêt que peuvent avoir pour la didactique différentes perspectives épistémologiques que nous ne retiendrons pas.

L'empirisme logique et le falsificationnisme de Popper

Toutes les épistémologies n'ont pas exercé une influence sur la didactique. Par exemple, peu de références sont faites à l'endroit de l'empirisme logique et du falsificationnisme de Popper, qui ont pourtant été des théories dominantes des années 1920 jusqu'aux années 1960. Ces deux épistémologies mettent l'accent sur l'analyse logique du langage scientifique pour tenter de spécifier de manière normative comment il faut s'y prendre pour mesurer le plus objectivement possible la valeur d'une théorie et à quelles conditions le choix de nouvelles théories s'avère progressif. Ainsi, pour ces théories, il importe peu de décrire l'activité scientifique telle qu'elle se fait (ce qu'on appelle le « contexte de découverte »), l'objectif étant plutôt de mieux comprendre les bases de la valeur et de l'objectivité des connaissances scientifiques (ce qu'on appelle le « contexte de justification »).

Notons que pour les empiristes logiques et Popper, ce n'est pas la nature en soi qui est connaissable, mais plutôt ce que nos capacités nous permettent de connaître sur le monde. Pour eux, il n'est de science qu'à partir d'un langage employé pour connaître le monde. Le vocabulaire de ce langage est construit pour ensuite être appliqué. Il s'agit donc d'une forme de constructivisme. Dans la typologie de Lakatos, les empiristes logiques peuvent être classés dans une position intermédiaire de la branche des activistes révolutionnistes, Popper étant quant à lui situé à l'extrémité révolutionniste.

Ces deux épistémologies diffèrent cependant. Brièvement, l'empirisme logique¹⁶ suppose une démarcation nette entre un langage observationnel et un langage théorique. Les énoncés de type observationnel sont ceux dont nous sommes capables de vérifier la vérité par l'observation. Les énoncés de type théorique ne servent, dans

¹⁶ Pour une présentation détaillée de la version standard de l'empirisme logique et de ses critiques, voir Suppe (1977) et Jacob (1980).

cette perspective, qu'à subsumer sous eux le plus grand nombre d'énoncés d'observation possible. De plus, la signification des énoncés théoriques réside justement dans les liens qu'ils ont avec les énoncés d'observations. Cela a amené la plupart des empiristes logiques à soutenir que les théories métaphysiques, puisqu'elles ne sont reliées à aucun énoncé observationnel, n'ont aucune signification et doivent par conséquent être éliminés de l'entreprise scientifique. Dans cette perspective, les théories sont donc conçues comme des instruments plus ou moins efficaces (instrumentalisme). Le degré d'efficacité de la théorie à subsumer les énoncés d'observation vrais constitue sa valeur de vérité, qui est alors conçue en termes de probabilité. Le progrès scientifique consiste ainsi à cheminer vers des théories ayant un degré de probabilité de plus en plus élevé.

Contrairement aux empiristes logiques, Popper délaisse la question de la signification des énoncés théoriques pour se concentrer sur la question de leur évaluation.¹⁷ Pour Popper, tenter d'établir une mesure du degré de vérification d'une théorie est absurde : les énoncés universels comme les théories ne peuvent être vérifiés, seulement falsifiés. La falsification d'une théorie est susceptible de survenir lors de tests, où des énoncés sont produits afin de mettre à l'épreuve la théorie. Si ces énoncés n'entrent pas en contradiction avec la théorie, alors celle-ci est corroborée (mais non pas vérifiée). S'il y a contradiction, la théorie est falsifiée. Ainsi, toutes nos théories ne sont, dans le meilleur des cas, que des conjectures corroborées. Selon Popper, le progrès dans les connaissances scientifiques ne peut alors se faire que par une activité critique soutenue : éliminer les erreurs et préférer les théories qui n'ont pas encore été montrées fausses, celles qui peuvent encore être vraies. Même conjecturale, la science demeure objective dans la mesure où la réalité intervient par la négative dans la réfutation des théories. Finalement, même s'il est impossible de prouver qu'une théorie scientifique est vraie, l'idée d'une vérité ultime constitue un principe régulateur utile pour le scientifique (forme de réalisme) : il sera toujours incité à mettre ses théories à l'épreuve, car il ne pourra jamais écarter la possibilité de l'erreur.

¹⁷ L'ouvrage classique de Karl Popper en épistémologie est sa *Logique de la découverte scientifique* (1934/1973). Plusieurs de ses idées sont reprises et développées dans ses *Conjectures and refutations* (1963/2002). Keuth (2005) offre une introduction détaillée à l'oeuvre philosophique de Popper.

Alors que l'empirisme logique a fait indirectement parler de lui en didactique des sciences par l'intermédiaire des préjugés à son endroit (Matthews, 2004), le falsificationnisme de Karl Popper, malgré son importance de même que sa bonne réception chez les scientifiques, n'y a reçu étrangement que très peu d'attention en didactique. D'aucuns pourraient attribuer ce manque d'intérêt au fait que ces positions épistémologiques ont été grandement critiquées et dépassées en philosophie il y a de ça déjà plusieurs décennies, de sorte que de tenter de transférer à la didactique des sciences certaines de leurs thèses contestées (par exemple, l'indépendance du vocabulaire observationnel et théorique) conduirait certainement à un désastre.

Cela est fort possible, mais nous pensons que ce manque d'intérêt possède une cause plus profonde : l'intérêt exclusif de ces épistémologies pour le contexte de justification.¹⁸ En effet, ces deux épistémologies se préoccupent d'identifier la nature de l'objectivité et de la rationalité scientifique, non pas par une étude de l'activité scientifique telle qu'elle se fait, mais par une réflexion analytique normative et aprioriste. Si les scientifiques procèdent différemment pour évaluer les théories, alors c'est qu'ils s'y prennent mal. Afin d'être particulièrement intéressante pour le didacticien des sciences, une épistémologie doit certes trouver un moyen d'éviter le relativisme fort, mais elle doit aussi nous aider à mieux comprendre la science en nous révélant certaines des facettes de sa réalité. Autrement dit, c'est lorsqu'une épistémologie intègre le contexte de découverte qu'elle devient particulièrement parlante pour la didactique. C'est alors qu'avec la psychologie, la sociologie et l'histoire des sciences, elle nous aide à mieux comprendre la nature de l'activité scientifique et, par conséquent, à mieux comprendre la nature de la formation aux sciences.

Les révolutions scientifiques de Kuhn

La théorie de Kuhn a ouvert une ligne de recherche majeure en épistémologie en montrant l'intérêt d'étudier le contexte de découverte. Il n'est donc pas étonnant qu'il fasse davantage référence au rôle de la formation scientifique.

¹⁸ À l'exception de quelques passages secondaires chez certains empiristes logiques.

Kuhn distingue deux modes fondamentalement différents à l'activité scientifique.¹⁹ Dans le mode « normal », les chercheurs s'affairent à appliquer la théorie acceptée aux domaines ou situations n'ayant pas été encore intégrés. Ce qui est important, ce n'est pas de critiquer la théorie (au contraire, dans ce régime la science est très conservatrice), mais plutôt d'augmenter la portée et la précision de son application. Ce qui définit ce type de science, c'est l'adoption incontestée d'un « paradigme ». Dans son sens le plus large, ce terme renvoie à tout ce qui fait consensus au sens d'un groupe scientifique. Ce consensus comprend un certain nombre de contenus théoriques, des normes de recherches (sur ce qui est compté ou non comme une explication scientifique, sur ce qui est valorisé par le groupe), et surtout la maîtrise d'exemples communs (*exemplars*). Les scientifiques intègrent ces exemples à l'occasion de leur formation scientifique. Ils sont essentiels à l'activité du chercheur dans la mesure où ils fournissent les solutions-types acceptées par le groupe. La formation joue donc un rôle conservateur : les scientifiques apprennent à voir et à étudier le monde avec des concepts et des procédures en vigueur dans le paradigme courant et seulement lui, toute autre approche étant considérée hérétique et son étude une perte de temps.

Lorsque les difficultés à appliquer le paradigme aux nouvelles situations persistent et s'accumulent, la confiance des chercheurs envers le paradigme s'effrite, éventuellement jusqu'à l'atteinte d'une crise. Certains vont progressivement remettre en question le paradigme, en s'engageant dans des discussions au niveau de ses fondements et en y proposant des alternatives. La science devient ainsi « révolutionnaire ». Contrairement à la science normale, l'innovation et l'esprit critique sont particulièrement à l'oeuvre dans cette phase de l'activité scientifique. Habituellement la crise se résorbe par le remplacement du paradigme par un paradigme concurrent, événement que Kuhn baptise « révolution scientifique ». Plusieurs épistémologues ont vu dans la théorie de Kuhn des tendances vers une forme de relativisme fort, puisque les révolutions scientifiques y semblaient être menées plus par la propagande

¹⁹ L'oeuvre maîtresse de Thomas Kuhn au niveau épistémologique est bien entendu *La structure des révolutions scientifiques* (T. S. Kuhn, 1972/1983). Des développements ou des ajustements à sa pensée sont par ailleurs disponibles dans deux recueils d'articles subséquents (1977/1990; Conant & Haugeland, 2000).

que par la rationalité, une position dont Kuhn a par la suite pris le soin de se distancer.

Selon Kuhn, lors d'une révolution scientifique survient un changement radical au niveau conceptuel : plusieurs des nouveaux concepts sont radicalement différents de ceux de l'ancien paradigme (on parle alors d'« incommensurabilité »). Du fait de cette incommensurabilité, Kuhn adopte une conception instrumentaliste des théories scientifiques :

« L'incommensurabilité *des contenus théoriques* constitue une sérieuse menace pour le réalisme scientifique [...]. Car le réalisme [...] suppose un minimum de continuité. Si des paradigmes incommensurables découpent le monde de manière totalement différente et affirment l'existence d'êtres fondamentalement distincts, comment continuer à prétendre que les théories successives offrent une image *de plus en plus fidèle* du monde ?

[Kuhn convoque] le schéma évolutionniste : il y a progrès, non *pas* au sens où les descriptions du monde coordonnées à chacun des paradigmes successifs sont des représentations de plus en plus exactes de la réalité visée, mais au sens où les nouveaux paradigmes retenus sont effectivement *plus aptes à résoudre davantage d'énigmes scientifiques*. » (Soler, 2000, pp. 187-188)

Malgré que la théorie de Kuhn accorde un rôle important à la formation scientifique, elle a été négligée par les didacticiens des sciences au cours des années 1960, pour ensuite avoir un impact considérable dans les années 1970 (Matthews, 2003). À l'intérieur de la didactique, ce sont surtout la perspective constructiviste et les recherches sur le changement conceptuel qui ont fait appel aux idées de Kuhn (Loving & Cobern, 2000). En effet, comme nous le verrons, un parallèle important a été tracé entre les révolutions scientifiques et le renversement des conceptions initiales des élèves lors de leur apprentissage. De plus, l'importance des exemples paradigmatiques dans l'apprentissage est un thème kuhnien qui, à notre connaissance, n'a pas été exploré en didactique. En contrepartie, plusieurs ont trouvé de quoi s'opposer à la conception kuhnienne de la formation scientifique : l'apprentissage de la science normale est représenté de manière beaucoup trop dogmatique, puisque les élèves doivent apprendre à œuvrer à l'intérieur du paradigme et non penser le critiquer. Il faudrait au contraire favoriser chez les élèves l'adoption d'une perspective dynamique sur la science où est soulignée l'importance de l'esprit critique (Nadeau & Désautels, 1984, p. 17; Siegel, 1988, ch. 6).

2.1.4.4 La perspective épistémologique adoptée

Bien que l'épistémologie de Kuhn propose quelques pistes de recherche intéressantes pour la didactique, ce n'est pas elle que nous retiendrons pour notre thèse. Nous désirons plutôt nous placer dans la tradition épistémologique du rationalisme critique, où l'activité scientifique est conçue comme un processus de résolution de problèmes. Plusieurs épistémologues appartiennent à cette tradition, mais notre présentation sera limitée à quelques auteurs : Popper, Bachelard, Lakatos et finalement Robert.

Bien qu'à première vue le rationalisme critique puisse ne sembler que vaguement relié à la problématique des conceptions multiples dans l'apprentissage des sciences, nous verrons au chapitre 3 que le modèle que nous proposons s'en inspire à plusieurs reprises.

Popper et Bachelard

Comme nous l'avons vu, Popper défend un rationalisme critique : puisque nous ne pouvons jamais savoir si nos théories sont vraies, nous devons nous efforcer de les critiquer afin de débusquer celles qui sont fausses. La rencontre d'un problème constitue un moment important : c'est l'occasion de poser un jugement de valeur sur nos conjectures et de nous amener à en proposer de meilleures.

« Since none of [our theories] can be positively justified, it is essentially their critical and progressive character – the fact that we can *argue* about their claim to solve our problems better than their competitors – which constitutes the rationality of science. » (Popper, 1963/2002, p. xii)

« Par conséquent, le développement de toute connaissance consiste dans la modification d'une connaissance antérieure – qu'il s'agisse de son altération ou de son rejet complet. La connaissance ne commence jamais à partir de rien, mais toujours à partir d'un certain fond de connaissance – la connaissance qui, au moment donné, est tenue pour acquise –, à partir également de certaines difficultés, de certains problèmes. » (Popper, 1979/1991, p. 133)

Popper s'intéresse essentiellement au contexte de justification : les problèmes sont essentiels parce que leur existence constitue une raison suffisante pour considérer une théorie erronée et valoriser en contrepartie une théorie concurrente qui ne s'y heurtera pas. Le contexte de découverte ne l'intéresse pas : il ne donne aucun indice sur la localisation des corrections à apporter aux systèmes de connaissance. En fait, Popper considère que l'élaboration d'une théorie est un processus psychologique qui contient un « élément irrationnel », basé sur une « intuition » non analysable

(Popper, 1934/1973, p. 28). Ce que Popper propose, c'est une façon de *ne pas* corriger les théories : par la formulation d'hypothèses auxiliaires visant à les sauvegarder de la critique (Popper, 1934/1973, pp. 78-80).

À l'instar de Popper, Bachelard souligne la grande importance des problèmes. Mais contrairement à lui, il aborde le rôle du problème dans le contexte de découverte scientifique : le problème est l'occasion pour une connaissance de se reconceptualiser, de se rectifier, d'identifier en les dépassant certains obstacles. Sans problèmes, point de connaissance *scientifique* pour Bachelard.

« Et quoi qu'on dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce *sens du problème* qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. » (Bachelard, 1938/1999, p. 14)

« Si l'on veut bien admettre que, dans son essence, la pensée scientifique est une objectivation, on doit conclure que les rectifications et les extensions en sont les véritables ressorts. C'est là qu'est écrite l'histoire dynamique de la pensée. *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. (Bachelard, 1934/1999, p. 56)

Ainsi, Popper pour le contexte de justification et Bachelard pour le contexte de découverte exposent l'importance du problème. Avec Lakatos, ces deux aspects des problèmes scientifiques se trouvent intégrés.

Le falsificationnisme sophistiqué de Lakatos

Pour Lakatos (1970), l'enchaînement des théories doit être pensé en termes de « programmes de recherche » et non de théories individuelles comme le faisait par exemple Popper. Contrairement aux théories individuelles, un programme de recherche est une entité qui possède une étendue temporelle : c'est en quelque sorte une lignée de théories successives fortement apparentées.

Dans la théorie épistémologique de Lakatos, un programme de recherche est défini par un noyau dur inaltérable (contenant les idées centrales, scientifiques et métaphysiques) et comprend une ceinture protectrice (formée d'hypothèses auxiliaires) qui elle est malléable. Lorsqu'un programme de recherche rencontre des contre-exemples (des problèmes), son noyau dur doit être préservé, ce qui se fait par l'élaboration d'hypothèses auxiliaires appropriées dans sa ceinture protectrice. Loin d'être blâmable comme le suggérait Popper, le recours à ces hypothèses est essentiel

pour exploiter le plein potentiel du noyau. Autrement dit, les problèmes jouent donc un rôle crucial pour un programme de recherche : celui de provoquer sa maturation.

Cependant, ce travail de maturation ne porte pas toujours fruit. Certains développements du programme de recherche sont progressifs, d'autres dégénérescents.

« [L]'originalité des programmes de recherche est de lier découverte et justification, en faisant des thèses de la ceinture le moyen par lequel les thèses du noyau sont protégées contre la falsification. À ce niveau, la grande découverte de Lakatos est de montrer que, lorsque l'expérience contredit la théorie et que l'on produit, comme nous le montre la thèse de Duhem-Quine, une hypothèse additionnelle pour invalider l'expérience falsifiante, cette modification a des conséquences prédictives. [...] Quand l'hypothèse auxiliaire est corroborée, [...] cette hypothèse se trouve à augmenter la prédictivité du programme de recherche, à le rendre progressif et à accroître ainsi sa scientificité. Quand, au contraire, l'hypothèse auxiliaire n'est pas corroborée, elle se révèle n'avoir été que tout simplement *ad hoc*, elle fait perdre de la prédictivité au programme de recherche, elle contribue à le rendre dégénérescent, c'est-à-dire moins scientifique. » (Robert, 1993, pp. 184-185)

« D'un point de vue lakatosien, en condamnant *a priori* de telles hypothèses comme étant *ad hoc* et malhonnêtes, le falsificationnisme poppérien se prive de comprendre le plus important mécanisme de la découverte scientifique. » (Robert, 1993, p. 186)

Pour illustrer cette dynamique, Lakatos (1970, pp. 138-140) a employé l'exemple de la théorie proposée par Prout en 1815, selon laquelle la masse des éléments purs est toujours un multiple entier de l'atome d'hydrogène. Prout savait que les résultats de l'époque n'appuyaient pas sa théorie, mais pensait que ceci était dû à l'impureté des substances chimiques à l'état naturel. S'ensuivirent des recherches visant à purifier chimiquement les éléments, qui se soldèrent par un échec; le programme de recherche était alors dégénérescent. Cependant, l'école de Rutherford préserva la théorie de Prout et expliqua cet échec par le fait que différents éléments pouvaient être chimiquement identiques (c'est l'hypothèse des isotopes, appartenant à la ceinture protectrice). Ceci conduisit au développement de moyens physiques permettant la séparation de ces isotopes. Ce dernier épisode fut progressif pour le programme proutien.

Comme Popper, Lakatos prône un falsificationnisme, mais celui-ci est dit sophistiqué : c'est le cumul des dégénérescences d'un programme de recherche qui amène sa falsification. Lorsque le programme de recherche au sein duquel oeuvrait un scientifique vient à être falsifié, ce dernier doit changer pour un autre programme de recherche. Ce changement est alors conceptuellement radical, à la manière d'un changement de paradigme chez Kuhn. Mais contrairement aux révolutions

scientifiques, le changement de programme de recherche est clairement rationnel dans l'esprit de Lakatos.

Le correctionnisme de Robert

Bien que d'autres théories épistémologiques se soient affairées, comme Lakatos, à intégrer le contexte de découverte et celui de la justification en rapprochant l'épistémologie et l'histoire des sciences (voir entre autres : Toulmin, 1972; Laudan, 1977), nous passerons directement à la présentation du correctionnisme de Serge Robert (1993).

Robert conçoit sa théorie épistémologique comme un développement des idées de Lakatos. Il s'en démarque cependant sur un point important : la dureté du noyau des programmes de recherche. Lorsque qu'un programme de recherche dégénère de manière persistante, le scientifique n'a pas la possibilité d'altérer une partie du noyau selon Lakatos : il opte tout simplement pour un autre noyau dur et sa ceinture protectrice. Le noyau est à prendre ou à laisser. Robert est d'avis que cette opposition entre noyau dur et ceinture protectrice est trop rigide :

« [L]'opposition lakatosienne entre modification de la ceinture protectrice et abandon d'un programme de recherche m'apparaît excessive. Il peut souvent arriver, ce que la théorie lakatosienne ne permet pas, qu'au-delà de la ceinture, on remanie une partie du noyau, sans pour autant abandonner tout le programme. » (Robert, 1993, p. 191)

Afin de mieux concevoir ce que sont les programmes de recherche et la façon dont ils peuvent être modifiés, Robert propose de concevoir les systèmes de connaissance comme étalés sur différents de niveaux de langage.

Les niveaux de langage

Le premier niveau de langage (l'ordre descriptif) a pour fonction de décrire, dans un système de symboles, les événements empiriques générés par la perception. Un événement empirique est par exemple le port d'une propriété par un objet (« cet objet est bleu ») ou encore l'appartenance d'un objet à une classe (« ceci est un chien »). Autrement dit, les énoncés descriptifs se rapportent à des objets particuliers.

Au deuxième niveau de langage (l'ordre explicatif), les entités auxquelles on réfère sont des classes plutôt que des individus. Contrairement aux phrases descriptives qui ont une quantification finie (par exemple : « les six chiens que j'ai vus avaient une

queue »), les phrases que contient l'ordre explicatif sont quantifiées de façon infinie (par quantification universelle stricte ou existentielle stricte; par exemple : « tous les chiens ont une queue »), de sorte qu'elles sont toujours théoriques plutôt qu'empiriques. C'est par ce degré de généralisation que les classes peuvent assurer une fonction explicative et prédictive. C'est donc à ce niveau que se trouvent les théories scientifiques.

La fonction explicative de cet ordre discursif est accomplie de deux façons : par des explications définitionnelles et par des explications causales. Lorsqu'elle est définitionnelle, l'explication emploie les propriétés essentielles définissant la classe (son intension) pour déduire l'énoncé devant être expliqué. Par exemple, on peut expliquer l'énoncé « l'individu x est placentaire » à partir de la définition de la classe des mammifères marins : « ils ont des poumons, sont placentaires, vivent dans l'eau, etc. », et d'un énoncé décrivant l'appartenance de classe « x est un mammifère marin ». Alors que l'explication définitionnelle emploie l'intension des classes pour établir la relation d'inclusion, l'explication causale utilise l'extension des classes concernées. L'explication causale est générée par induction à partir de cas singuliers, de sorte que ce qui la fonde empiriquement est la simple corrélation. Par l'induction, nous érigeons cette corrélation extensionnelle en relation implicative de causalité entre classes d'objets. Par exemple, supposons que nous soyons dans un pays P et que les n hommes que nous observons portent tous un chapeau. Nous pouvons par induction proposer l'hypothèse que « les hommes du pays P portent tous des chapeaux », ce qui revient à ordonner la classe des hommes de ce pays et la classe des hommes portant des chapcaux en incluant la première dans la deuxième, par leur extension. À la question « Pourquoi cet homme porte-t-il un chapeau ? » nous pourrions alors répondre « Parce que cet homme est du pays P , et nous savons que les hommes du pays P portent tous un chapeau ».

Le troisième niveau de langage (l'ordre justificatif) est construit par généralisation à partir du deuxième, de sorte que les entités que l'on y retrouve ne sont pas des classes, mais des classes de classes. Sa fonction est de justifier les énoncés que l'on retrouve dans le langage explicatif, ce qui s'effectue en faisant de ces énoncés des cas particuliers d'hypothèses générales sur les classes de classes. Le langage justificatif

joue donc le même rôle envers le langage explicatif que ce dernier envers le langage descriptif.

Plusieurs types de discours justificatifs peuvent être tenus : épistémologique, physique, logique, mathématique; nous nous limiterons ici aux deux premiers. Tout d'abord, l'épistémologie essaie d'explicitier les opérations mentales par lesquelles la connaissance est produite et cherche à expliciter la méthodologie la plus rationnelle possible par laquelle la représentation cognitive peut être la plus pertinente possible relativement à l'investigation. En prenant le discours scientifique comme son objet privilégié, la connaissance épistémologique est une théorie des conditions psychologiques de notre accès à la connaissance factuelle.

Au niveau de la physique, Robert fait la distinction entre sa partie expérimentale et sa partie théorique. La physique expérimentale est la partie de la physique qui appartient au deuxième ordre; elle propose ainsi d'expliquer ou de prédire des événements observables particuliers. La partie théorique de la physique appartient quant à elle à l'ordre justificatif. Les lois de la physique théorique constituent une justification des thèses explicatives de la physique expérimentale. Les grandeurs physiques (par exemple les notions de force, de vitesse, d'accélération, d'énergie, de température, etc.) ne sont pas des classes d'objets, mais plutôt des classes de classes qui subsument sous elles toutes les classes d'objets empiriques, de sorte que tout objet de la nature possède ces grandeurs (par exemple, tout objet possède une vitesse, une énergie, une température, etc.).

Les différents énoncés appartenant aux différents ordres interagissent continuellement. En simplifiant, on peut parler de deux types de détermination :

- Les déterminations ascendantes de nature inductive : chaque ordre épistémique supérieur peut être considéré comme une généralisation à partir de l'ordre immédiatement inférieur.
- Les déterminations descendantes de nature déductive : chaque ordre supérieur structure le contenu d'information que lui fournit l'ordre qui lui est immédiatement inférieur.

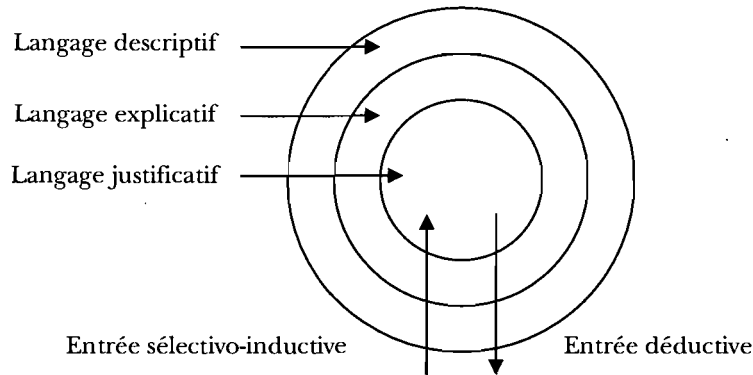


Figure 5. Les ordres discursifs et les mécanismes de production de nouvelles connaissances.

Le schéma de la figure 5 met en évidence l'aspect holiste de la théorie de Robert : tous les énoncés sont reliés, directement ou indirectement, entre eux et à l'expérience. Seuls les énoncés périphériques sont fortement liés à l'empiricité, et plus les énoncés se rapprochent du centre du système, comme c'est le cas pour les définitions, les lois logiques et les thèses épistémologiques, plus ils sont théoriques, c'est-à-dire plus conventionnels et moins empiriques.

Les problèmes et leur correction : la dynamique des connaissances scientifiques

La représentation de notre environnement par un système de connaissance totalement consistant constitue un idéal irréalisable. En pratique, de nombreux problèmes d'inconsistance, explicites ou non, s'y retrouvent. Robert distingue les problèmes horizontaux (qui sont des problèmes de consistance intrathéorique ou interthéorique au sein d'un ordre discursif) des problèmes verticaux (qui sont des problèmes de consistance entre deux ordres discursifs successifs).

Robert s'intéresse essentiellement aux problèmes de consistance verticale, qui sont selon lui particulièrement importants dans la dynamique de la connaissance scientifique. Il existe toujours deux stratégies pour résoudre une inconsistance verticale : le remaniement intensionnel et l'exclusion extensionnelle. Lors d'un remaniement intensionnel, les classes du niveau supérieur du conflit sont redéfinies de manière à résoudre l'inconsistance. Par contre, lors d'une exclusion extensionnelle, ce sont les ordonnancements extensionnels qui sont modifiés en laissant intactes les définitions. À titre d'exemple, supposons que nous soyons en

présence d'un problème vertical entre une hypothèse causale simple du niveau explicatif, « tous les hommes du pays P portent un chapeau », et un énoncé descriptif, « cet homme du pays P porte une casquette ». Clairement, cet homme constitue un contre-exemple pour notre hypothèse causale. Deux options sont possibles.

- Premièrement, nous pouvons effectuer un remaniement intensionnel, consistant en une modification de notre définition de la classe des hommes appartenant au pays P de manière y ajouter la propriété de porter un chapeau (ce qui serait un peu surprenant, mais toujours possible), de manière à ce que nous ne considérions plus cet homme à la casquette comme appartenant au pays P , de sorte qu'il ne constitue plus un contre-exemple à notre hypothèse.
- Deuxièmement, nous pouvons effectuer une restriction de la portée empirique de l'hypothèse, en allongeant ou en modifiant notre chaîne causale en tentant d'exprimer un facteur causal responsable du contre-exemple. Dans notre exemple, la chaîne causale peut être modifiée de la manière suivante : « tous les hommes du pays P veulent se couvrir la tête », « les hommes qui veulent se couvrir la tête peuvent employer soit un chapeau ou soit une casquette ». L'homme du pays P portant une casquette ne constitue alors plus un contre-exemple pour cette hypothèse complexifiée.

Ainsi, la dynamique de la connaissance scientifique en une activité constante de résolution des inconsistances entre les divers niveaux de langage. Mais toutes les corrections n'ont pas le même impact sur le système de la connaissance : plus le niveau auquel on apporte une modification est élevé, plus les transformations résultantes du système total de la science sont profondes. Cela peut s'expliquer par le fait que la relation des niveaux supérieurs du langage cognitif aux niveaux inférieurs est de nature déductive.

L'approche par niveaux de langage permet à Robert de proposer une vision plus souple des programmes de recherche que celle de Lakatos. Pour Robert la ceinture protectrice d'un programme de recherche est constituée des hypothèses causales qui appartiennent au niveau explicatif : une altération des hypothèses causales entraîne un changement dans un des *projets* de recherche du programme. Alors que Lakatos propose l'existence d'un noyau dur et indivisible, Robert préfère distinguer deux composantes dans le noyau : interne et externe. Le noyau externe est constitué de la partie intensionnelle du niveau explicatif (la partie qui définit les objets et les propriétés); sa modification est importante mais le programme de recherche

conserve tout de même son identité. C'est lorsque le noyau interne, formé des présupposés métascientifiques appartenant au niveau justificatif, est changé qu'il est réellement possible de parler d'un changement de programme de recherche (Robert, 1993, p. 210).

La valeur de la connaissance scientifique

Au sein de la dynamique de la connaissance, le progrès survient lorsque les corrections apportées dans les différents niveaux de langage résolvent effectivement les inconsistances auxquelles elles s'attaquaient. Autrement dit, il y a progrès cognitif si le système de connaissance après correction reçoit un degré de corroboration empirique plus élevé que celui avant correction. Lorsque la correction se situe au niveau intensionnel (redéfinition des classes), le progrès signifie l'augmentation de la probabilité d'être en possession d'un appareil classificatoire pertinent pour l'analyse de l'organisation du monde. Lorsque la correction se situe plutôt au niveau extensionnel (redéfinition des ordonnancements entre classes, i.e. redéfinition des chaînes causales), le progrès réside dans l'augmentation de la probabilité pour une corrélation d'être une réelle relation causale.

Dans la perspective du correctionnisme, le critère de démarcation entre science et non-science est que le discours scientifique réagit aux contre-exemples par des modifications, c'est-à-dire qu'il tente de résoudre ses problèmes, qu'il tente de se corriger, qu'il prend le risque d'essayer d'accroître son objectivité. Ainsi, une entreprise scientifique n'est pas scientifique en soi, c'est plutôt sa dynamique qui est plus ou moins scientifique. Au niveau de la rationalité scientifique Robert propose le critère de choix suivant entre théories scientifiques concurrentes : la meilleure de deux théories est celle qui a le plus haut taux de progrès, i.e. le plus haut degré de corroboration après prédiction, soit celle qui a le mieux résolu ses problèmes. Autrement dit, la progressivité d'une théorie scientifique est sa valeur objective relative à la valeur des autres théories, et elle est inversement proportionnelle à l'envergure de ses problèmes non résolus. Contrairement à Lakatos, Robert ne prétend pas que la théorie (ou programme de recherche) exclue est objectivement falsifiée, car il est toujours possible qu'elle redevienne progressive. Cette exclusion est plutôt un abandon basé sur des raisons pragmatiques : on considère que trop

d'efforts intellectuels seraient à investir pour pouvoir espérer rendre cette théorie progressive à nouveau.

Conclusion

En somme, le rationalisme critique que nous endossons met la notion de problème au cœur de la science. D'abord, en considérant toute connaissance comme réponse à un problème, le rationalisme critique évite le dogmatisme et le relativisme fort : bien que nous ne pourrions jamais affirmer que la solution que nous envisageons soit ultimement bonne, nous savons que certaines solutions sont meilleures que d'autres. De plus, comme chaque solution possède un potentiel qui mérite d'être développé, c'est la dynamique des corrections face aux problèmes rencontrés qui nous permet d'évaluer la performance d'une entreprise scientifique. Ensuite, relativement au contexte de découverte, le problème constitue l'incitatif à repenser notre système de connaissance, c'est-à-dire à y envisager des corrections plus ou moins fondamentales. Pour bien comprendre un concept, une théorie ou encore l'état d'un programme de recherche, l'histoire des problèmes rencontrés s'avère essentielle.

Dans la typologie de Lakatos, les versions du rationalisme critique de Lakatos et de Robert se positionnent dans la branche activiste révolutionniste : la connaissance est conçue comme une construction active susceptible d'évoluer. Plus précisément, ces deux auteurs se placent dans une position intermédiaire entre la sous-branche conservatiste et celle révolutionniste. En effet, dans leur théorie respective, ces épistémologues considèrent que certaines parties des systèmes de connaissance changent rarement (le noyau dur; les niveaux de langage d'ordre élevé) alors que d'autres peuvent être modifiées plus facilement (la ceinture protectrice; les niveaux de langage d'ordre inférieur).

Selon nous, le rationalisme critique tel que nous l'avons présenté s'avère assez proche de la question des conceptions multiples dans l'apprentissage des sciences. En effet, le rationalisme de Lakatos et Robert, parce qu'il place la critique (faite à l'occasion de la rencontre des problèmes) au cœur de la nature de la science, est essentiellement comparatif : les connaissances ne doivent pas être comprises de manière isolée, mais plutôt dans leur dynamique. C'est en comparant l'état actuel des connaissances à ses états antérieurs que nous pouvons déterminer leur valeur et bien

comprendre les reconceptualisations qui ont dû être opérées. Par conséquent, au niveau psychologique, le rationalisme critique (spécialement les versions de Lakatos et de Robert) présuppose la présence d'une multiplicité de conceptions : pour que le sujet soit en mesure de percevoir et comprendre cette dynamique, il est nécessaire qu'il maîtrise plusieurs théories concurrentes et qu'il les place au sein d'une structure cognitive plus large, celle où est représentée cette dynamique. Du fait de ce rapprochement, nous pensons que le rationalisme critique pourra nous suggérer des pistes intéressantes de réflexion lors de l'élaboration de notre modèle au chapitre 3. En contrepartie, notre modèle permettra de mieux comprendre les conditions psychologiques associées à l'adoption de cette épistémologie; il en constituera un module psychologique.

Mais avant de formuler ce modèle, nous nous affairerons dans la seconde partie du chapitre deux à bien comprendre les recherches didactiques portant sur le changement conceptuel, la tradition de recherche dans laquelle se situe le plus notre problématique.

2.2 LA LITTÉRATURE SUR LE CHANGEMENT CONCEPTUEL

L'objectif de cette section est double : positionner précisément la question des conceptions multiples dans le contexte des recherches sur le changement conceptuel, mais aussi réunir les diverses contributions existantes relatives au phénomène des conceptions multiples. La réalisation de cette double tâche nous apparaît essentielle pour comprendre les redevances et les originalités de l'approche que nous proposerons au chapitre 3.

Pour ce faire, nous procéderons à une présentation détaillée des recherches sur le changement conceptuel.²⁰ Cette revue débutera par quelques remarques préparatoires concernant la nature du changement conceptuel et sa modélisation. Nous regrouperons par la suite notre présentation de la littérature en trois thèmes : 1) l'exposition de quelques modèles importants, 2) l'identification des facteurs influençant le processus de changement conceptuel, puis 3) la question de la multiplicité des conceptions.

2.2.1 Nature et modélisation du changement conceptuel

2.2.1.1 La nature du changement conceptuel

Déjà dans les années 1960, David Ausubel reconnaissait l'importance des connaissances antérieures dans l'apprentissage.

« If I had to reduce all of educational psychology to just a single principle, I would say this: "Find out what the learner already knows and teach him or her accordingly." »
(Ausubel, 1968, p. 337)

Alors que pour Ausubel l'apprentissage se produit essentiellement par accréation de nouvelles informations sur les connaissances antérieures, les recherches sur les conceptions des élèves ont suggéré vers la fin des années 1970 que ces conceptions devaient être dans certains cas modifiées, voire remplacées, du fait de leur incompatibilité avec les savoirs scolaires visés. Ce type d'apprentissage non cumulatif,

²⁰ Pour des revues récentes de la littérature sur le changement conceptuel, voir Duit et Treagust (2003) et Murphy et Mason (2006).

une nouveauté en didactique des sciences, reçut l'appellation de changement conceptuel et son étude prit l'ampleur d'un programme de recherche à lui seul.

Mais l'expression « changement conceptuel » est souvent employée en didactique des sciences et tend parfois à se confondre avec l'apprentissage en général. Afin d'éviter toute confusion, il est donc pertinent d'exposer la hiérarchisation de quelques termes courants relatifs au développement cognitif et spécifier où se retrouve précisément la notion de changement conceptuel.

Tout d'abord, le terme « développement cognitif » est très large : il inclut des thèmes variés comme le développement des habiletés, l'augmentation des capacités de traitement de l'information (mémoire, attention, etc.) ou encore l'acquisition de connaissance. Sous la rubrique « acquisition de connaissance », nous retrouvons l'apprentissage de nouveaux faits ou encore les changements de croyance (Carey, 1999, pp. 293-294).

Nous devons remarquer aussi qu'en psychologie cognitive, une distinction importante est faite entre les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales (et certains y ajoutent les connaissances conditionnelles). Les connaissances déclaratives, auxquelles appartiennent les concepts, les principes, les idées, etc., forment la compréhension du fonctionnement du monde, compréhension qui est descriptive et indépendante de toute action particulière (Chi & Ohlsson, 2005, p. 708).²¹ Les connaissances procédurales renvoient plutôt au savoir-faire d'un individu : elles consistent en des associations entre des buts, des situations et des actions, et forment des procédures prescriptives pour réaliser des actions spécifiques. Finalement, les connaissances conditionnelles concernent le quand et le pourquoi des actions :

« À quel moment et dans quel contexte est-il approprié d'utiliser telle ou telle stratégie, telle ou telle démarche, d'engager telle ou telle action ? Pourquoi est-ce adéquat d'employer cette stratégie, cette démarche, de réaliser cette action ? Ces questions sont relatives aux connaissances conditionnelles. Alors que les connaissances procédurales correspondent à des séquences d'actions, les connaissances conditionnelles correspondent essentiellement à des classifications, à des catégorisations. » (Tardif, 1992, p. 52)

²¹ Pour être précis, au sein des connaissances déclaratives, on distingue les connaissances sémantiques, qui portent sur le monde, et les connaissances épisodiques, qui portent les événements constituant notre histoire personnelle (Schraw, 2006).

En se limitant aux connaissances déclaratives, Chi et Ohlsson (2005) proposent une taxonomie des apprentissages, basée sur une distinction entre les changements monotones et non monotones. Les changements monotones sont ceux qui conservent les connaissances antérieures, soit par l'ajout de nouvelles connaissances, soit par l'ajout d'une nouvelle représentation des connaissances antérieures. Ces chercheurs recensent six types d'apprentissage monotone :

- L'élargissement des connaissances antérieures par accumulation;
- L'augmentation de la densité des liens entre les constituants de la connaissance antérieure;
- La diminution du « grain » d'une conception (par l'explicitation des composantes d'une entité de la conception);
- L'augmentation de la complexité d'une explication, par la juxtaposition d'éléments explicatifs déjà possédés;
- La mise en perspective d'une conception à l'intérieur d'un cadre plus abstrait;
- L'ajout d'une perspective différente à un même phénomène ou problématique.

Par opposition, les apprentissages non monotones sont ceux où une connaissance antérieure doit être abandonnée ou rejetée pour faire place aux nouvelles connaissances. Essentiellement, le programme de recherche sur le changement conceptuel est concerné par l'apprentissage non monotone des connaissances déclaratives.²²

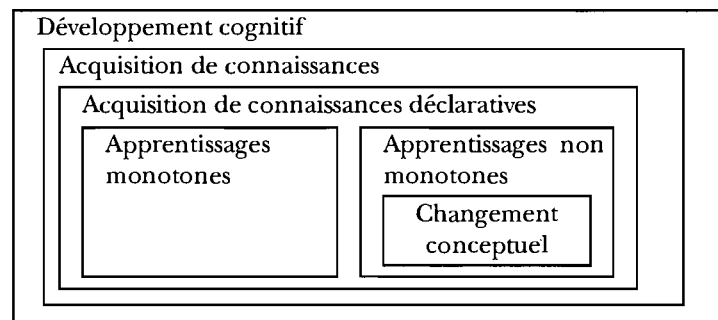


Figure 6. L'emplacement de la notion de changement conceptuel en psychologie.

²² Depuis ses débuts, le programme de recherche sur le changement conceptuel a accordé une place presque exclusive aux connaissances déclaratives, comme l'a déploré Shuell (1987, p. 242) : « Nearly all attempts to describe cognitive structure have focused on propositional (semantic) knowledge. » Une décennie plus tard, Duschl et Hamilton refont le même constat en le déplorant :

« What seems to appear most often within science education research is centred on the nature and organisation of relevant declarative knowledge and the changes which occur, or need to occur, in that knowledge or its organisation. Structural considerations are pre-eminent, whereas changes in, or attempts to change, the strategic use of the restructured knowledge have not received needed attention and study. » (Duschl & Hamilton, 1998, p. 1057)

La notion de changement conceptuel renvoie donc à un type de développement intellectuel très spécifique. Les chercheurs qui l'ont étudié appartiennent à deux traditions malheureusement plutôt indépendantes : les psychologues du développement cognitif et des didacticiens des sciences. Du point de vue didactique, l'élaboration de ces modèles peut être vu comme la deuxième phase du programme de recherche sur les conceptions des élèves, soit celle qui devrait fournir l'assise théorique lui permettant de proposer de manière éclairée des stratégies d'enseignement adaptées aux besoins réels des élèves. Mais puisque notre question de recherche porte sur l'apprentissage et non sur la pratique enseignante, cette section ne fera pas référence aux recherches portant sur les stratégies d'enseignements.²³

2.2.1.2 La modélisation du changement conceptuel

La nature des modèles de changement conceptuel

On pourrait penser que l'appellation du programme de recherche impose d'emblée des contraintes sur la nature de ce qui est à modéliser à propos de l'apprentissage non monotone : le terme « conceptuel » référerait à une structure cognitive basée sur des « concepts », alors que celui de « changement » semble supposer le « remplacement » de cette structure. Il faut plutôt prendre cette expression dans un sens large :

« We use the term conceptual change for learning in such domains where the pre-instructional conceptual structures of the learner have to be fundamentally restructured in order to allow understanding of the intended knowledge, that is, the acquisition of science concepts. » (Duit & Treagust, 2003, p. 673)

²³ Les recherches portant sur les stratégies d'enseignement constituent malheureusement le point faible des recherches sur les conceptions. Comme le mentionne Scott, Asoko et Leach :

« Put briefly, science education researchers are currently in the position where we can point with confidence to the likely conceptual starting points and challenges for students in any area of science learning, but we have rather less to say about how to shape instruction in order to help students come to terms with the scientific point of view. The challenge remains one of crossing the bridge from our insights on learning to making the link to reliable approaches to instruction. » (Scott, Asoko, & Leach, 2007, p. 51)

Il faut reconnaître cependant que certains chercheurs ont modélisé l'activité d'enseignement ou ont synthétisé les recommandations théoriques (par exemple : Nussbaum & Novick, 1982; Scott, Asoko, & Driver, 1992; Tsai, 2000; Vosniadou, Ioannides, Dimitrakopoulos, & Papademetriou, 2001). Mentionnons par ailleurs qu'il est difficile de tester les modèles psychologiques de changement conceptuel sur la base de l'efficacité des interventions didactiques qu'ils suggèrent, parce que le seul fait de s'intéresser aux idées des élèves apparaît efficace, peu importe le détail du modèle de changement conceptuel considéré (diSessa, 2006, p. 276).

« The name “conceptual change” embodies a first approximation of what constitutes the primary difficulty: students must build new ideas in the context of old ones; hence, the emphasis of “change” rather than simple acquisition. Strong evidence exists that prior ideas constrain learning in many areas. The “conceptual” part of the conceptual change label must be treated less literally. Various theories locate the difficulty in such entities as “beliefs”, “theories”, or “ontologies,” in addition to “concepts.” » (diSessa, 2006, p. 265)

Malgré le fait qu'elle soit vague, l'expression « changement conceptuel » est bien choisie puisqu'elle renvoie directement aux deux questions centrales du programme de recherche : quelles sont les caractéristiques des structures cognitives en jeu, et comment ces dernières évoluent-elles ?

« Historically, students' of children's conceptual structures have been concerned with two questions:

1. How to characterize the general properties of children's conceptual understanding at different points in time, and
2. How to characterize the process by which they move from one of these points to the next. » (Strauss, 1998, p. 774)

Nous tenterons de faire ressortir ces deux aspects pour chacun des modèles que nous présenterons à la section 2.2.2.

Les domaines de validité des modèles de changement conceptuel

L'apprentissage des sciences est un phénomène que l'on doit étudier avec modestie : d'une part du fait de la complexité des processus cognitifs à l'oeuvre, d'autre part par la diversité des contenus devant être appris lors du parcours scolaire, chacun étant susceptible de soulever une difficulté particulière. Il serait par conséquent présomptueux pour un modèle de prétendre tout expliquer, ou encore de surpasser inconditionnellement ses supposés concurrents. Au lieu de tenter d'identifier le meilleur modèle, il est plus approprié de tenter de déterminer les limites de validité de chacun de ces modèles et de ne voir des confrontations que dans les cas où ils ont en commun une partie de leur domaine d'applicabilité.

Pour spécifier un domaine d'applicabilité, il est nécessaire de se doter auparavant d'un « espace ». Une première dimension de cet espace est évidemment le contenu scientifique : un apprentissage en biologie (par exemple : la reproduction chez les mammifères) n'a pas nécessairement à faire face aux mêmes difficultés qu'un apprentissage en physique (par exemple : la première loi de Newton). Puisque les modèles de changement conceptuel se sont souvent basés sur l'étude

d'apprentissages de contenus particuliers, il est a priori normal qu'ils ne proposent pas tous la même structure cognitive ni la même dynamique.

Cet « espace » peut comporter plusieurs dimensions supplémentaires. Nous en proposons ici trois autres.

Les niveaux de modélisation

Un modèle de changement conceptuel propose une structure cognitive (soit des entités cognitives et leur organisation) de même qu'un processus d'évolution. Cette modélisation n'a cependant pas à se faire à un seul niveau : contrairement à la modélisation du mouvement des astres par exemple, où les entités s'imposent sans trop de problèmes, la modélisation des changements conceptuels n'a pas d'entités prédéterminées. Les chercheurs postulent l'existence d'entités cognitives dans la mesure où elles permettent d'expliquer un ou plusieurs aspects du changement conceptuel qu'ils ont mis ou désirent mettre en évidence. La grosseur des entités ainsi postulées variera d'un modèle à l'autre. Ce « choix de la granularité » influencera à coup sûr l'analyse de l'évolution des connaissances (Tiberghien, 2003).

Dans ce qui suit, nous ne distinguerons que deux niveaux de description : « macroscopique » et « microscopique ». Au niveau macroscopique, nous retrouverons les modèles prenant comme entité la conception de l'élève en tant que tout. À l'opposé, nous verrons que certains modèles que nous qualifierons de « microscopiques » optent pour des entités cognitives plus petites, des entités qui s'organiseraient pour former le tout qu'est la conception.

Cette distinction aide à mettre non seulement la nature des modèles en perspective, mais aussi leurs visées et leurs utilités. Par exemple, les modèles macroscopiques s'intéressent au changement conceptuel en tant que processus s'étalant sur des périodes de temps assez longues, alors que les modèles microscopiques sont plus susceptibles de fournir les mécanismes locaux, oeuvrant à des échelles de temps plus petites.

Compréhension et acceptation

Nous avons à plusieurs reprises fait référence à la notion de « connaissances antérieures ». Mais cet emploi du terme « connaissance » n'est pas aussi strict qu'en

philosophie, où il fait référence à une « croyance vraie justifiée ».²⁴ En psychologie, il est employé à toutes sortes de sauces :

« For researchers in the field of cognition and literacy, it goes nearly without saying that knowledge refers to an individual's personal stock of information, skills, experiences, beliefs, and memories. [...] knowledge encompasses all that a person knows or believes to be true, whether or not it is verified as true in some sort of objective or external way. » (Alexander, Schallert, & Hare, 1991, p. 317)

Cet emploi indiscriminé du terme « connaissance » en psychologie a malheureusement l'effet de gommer la différence entre comprendre et croire dans les processus d'apprentissage :

« Most theoretical and practical work has conceptualized learning as knowledge change. However, the conceptualization of learning as changes in *knowledge* confuses changes in *understanding* with changes in *belief*. » (Chinn & Samarapungavan, 2001, p. 235)

En didactique des sciences, la nécessité de cette distinction apparaît clairement dans l'enseignement des notions à forte connotation religieuse. Par exemple, dans l'apprentissage de la théorie de l'évolution ou de celle du Big Bang, un élève ayant une conception créationniste peut parvenir à comprendre la notion enseignée sans pour autant la considérer comme vraie. Et l'inverse est possible : certains élèves adhèrent aux théories scientifiques avant même de les comprendre (Desmastes, Good, & Peebles, 1995; Shipman, Brickhouse, Dagher, & Letts, 2002).²⁵

Dans la littérature sur le changement conceptuel, la distinction entre compréhension et acceptation a été faite implicitement dès le début avec le modèle de Posner et ses collègues, mais ne semble pas avoir été développée par la suite.²⁶ Lors de notre revue, nous tâcherons de spécifier où porte l'intérêt de chacun des modèles.

²⁴ Le domaine de la philosophie qui s'efforce de distinguer la connaissance de la croyance se nomme « théorie de la connaissance » (ou « epistemology » en anglais, qu'il ne faut pas confondre avec le terme « épistémologie » en français). Pour une introduction à la théorie de la connaissance, voir Moser, Mulder & Trout (1998).

²⁵ Ceci amène certains chercheurs à définir plus précisément les objectifs de la formation scientifique : on ne peut moralement demander l'acceptation des notions scientifiques, seulement leur compréhension (Southerland, Sinatra, & Matthews, 2001; M. U. Smith & Siegel, 2004).

²⁶ Chinn et Samarapungavan (2008) en ont cependant fait une revue détaillée en distinguant les obstacles relatifs à l'acceptation de ceux relatifs à la compréhension.

Deux pôles de la modélisation du changement conceptuel

Le processus de changement conceptuel consiste en une altération de la structure cognitive initiale de l'élève débouchant sur une structure cognitive finale correspondant (idéalement) aux savoirs scientifiques visés. De manière simpliste, nous pouvons aborder l'analyse de ce processus de deux façons.

Premièrement de manière psychologique, où l'accent est mis sur une description des structures cognitives initialement employées par l'apprenant, puis sur la description du processus de leur évolution. Cette analyse est en quelque sorte ascendante : on tente de comprendre comment ces structures initiales agissent comme ressources pour l'élaboration des nouvelles structures.

Deuxièmement de manière épistémologique, où l'on vise à mettre en évidence les caractéristiques *intrinsèques* des savoirs scolaires et des connaissances initiales des étudiants, afin de mettre en évidence la nature de leurs différences et donc l'ampleur de l'apprentissage exigé. Ce type de réflexion a pour objectif de produire des instruments d'analyse qui seraient efficaces pour mettre en évidence les lieux d'insuffisances dans les connaissances des élèves. Cette approche est descendante dans la mesure où c'est toujours par rapport aux savoirs scientifiques, et donc par ses manques, que la pensée des élèves est caractérisée.

Bien évidemment, ces deux approches n'ont pas à être opposées : elles sont plutôt complémentaires et devraient idéalement être intégrées.

Outils de ces distinctions, nous pouvons entamer la présentation du programme de recherche, que nous ferons à l'aide de trois rubriques : quelques-uns des principaux modèles de changement conceptuel ; les facteurs affectant le changement conceptuel ; et finalement le thème des conceptions multiples.

2.2.2 Les principaux modèles de changement conceptuel

Les modèles de changement conceptuel que nous présenterons dans cette section ont évidemment fait l'objet d'une sélection : nous nous sommes limité aux contributions faites en didactique des sciences et à la partie de la psychologie du

développement cognitif qui s'est intéressée à l'apprentissage des sciences,²⁷ à celles étant suffisamment systématisées pour pouvoir être qualifiées de modèles (au sens où elles proposent une structure cognitive et une dynamique d'évolution), et finalement aux contributions considérées comme marquantes ou particulièrement intéressantes pour la didactique des sciences.

Les modèles seront présentés en trois temps : un modèle macroscopique (Posner et al.); deux modèles microscopiques (diSessa; Vosniadou); trois modèles intermédiaires de type épistémologique (l'approche par obstacles; Chi; Chinn & Samarpungavan).

2.2.2.1 Le modèle macroscopique par excellence

Tout juste quelques années après le début des recherches sur les conceptions des élèves, Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) ont proposé un modèle d'évolution des conceptions qui a marqué le programme de recherche sur le changement conceptuel en didactique des sciences. Il a servi de référence tant pour ceux qui tentèrent de le détailler ou de l'appliquer que pour ceux qui identifièrent ses insuffisances et proposèrent des alternatives.

Afin de comprendre le modèle de Posner et ses collègues, il est essentiel de présenter d'abord leur perspective sur l'apprentissage, ce qui est malheureusement bien souvent oublié dans les discussions sur ce modèle. Ces auteurs abordent l'apprentissage sous un angle épistémologique : ils postulent que l'apprentissage des élèves est une activité rationnelle, similaire à celle des scientifiques.

« Two commitments are important in understanding this view of learning. The first is the learning and the production of new knowledge are similar in that they are both rational activities. They involve making judgments about the truth or falsity of ideas on the basis of evidence. The second commitment is that rationality has to do with changing one's mind. [...]

²⁷ Ceci exclut donc d'emblée les travaux des psychologues du développement cognitif s'intéressant essentiellement aux bambins ou aux jeunes enfants, par exemple ceux de Carey (1985, 1999) Keil (1989), Gopnik (Gopnik & Meltzoff, 1997), Spelke (Carey & Spelke, 1994; Spelke, 1998), Baillargeon (2002), etc. Pour un survol, voir Wellman et Gelman (1998). Nous excluons également d'autres travaux importants en sciences cognitives, et en particulier ceux portant sur la question de la modularité de l'esprit (par exemple : Fodor, 1983). Ces exclusions ne signifient pas pour autant que ces travaux manquent d'intérêt relativement au sujet traité dans cette thèse, mais plutôt que nous avons tout simplement voulu éviter de multiplier les références faites dans notre présentation, au risque de négliger un certain nombre de contributions pertinentes.

These two claims have surprising mileage in them for understanding science teaching and learning. They suggest that the learner in the classroom is like the scientist working on the forefront of knowledge. Moreover, they suggest that the history and philosophy of science has light to shed on learning. » (Strike & Posner, 1982, p. 232)

L'épistémologie constitue effectivement une grande source d'inspiration pour ces auteurs, qui tirent des théories de Kuhn, Lakatos et Toulmin l'idée que l'apprentissage se produit selon deux régimes : l'assimilation, où aucune révision conceptuelle majeure n'est requise, et l'accommodation, où des changements conceptuels à grande échelle doivent être opérés.²⁸ Ces chercheurs s'intéressent particulièrement aux cas d'apprentissage par accommodation. Leur modèle tente de spécifier à quelles conditions cet apprentissage serait rationnel de la part des élèves. Ce modèle possède donc un aspect normatif : il ne vise pas à décrire les processus cognitifs réels (Strike & Posner, 1992, p. 155).

Les entités du modèle

Posner et al. prennent comme lieu où s'exerce l'apprentissage rationnel l'« écologie conceptuelle » de l'élève. Ce concept est repris de Toulmin (1972) et sert à désigner l'ensemble des concepts ou idées possédés par l'individu.²⁹ De manière plus précise, l'écologie conceptuelle comprend (Strike & Posner, 1985, pp. 216-217) :

- les anomalies;
- les analogies et métaphores;
- les exemples communs (« exemplars ») et images;
- les expériences passées;
- les engagements épistémologiques, soit les idéaux explicatifs de même que les croyances générales à propos de la connaissance;
- les croyances métaphysiques (par exemple sur l'ordre et la symétrie) et les concepts métaphysiques (comme l'idée d'espace et de temps absolus);
- les connaissances dans les autres domaines et les conceptions compétitrices.

La conception de l'élève est située à l'intérieur de cette écologie, et, pour prendre la métaphore évolutionniste, c'est cette dernière, par les différentes pressions sélectives qu'elle exerce, qui détermine le sort d'une conception donnée.

²⁸ Même si ces auteurs reprennent les termes de Piaget, ils ne s'engagent pas davantage envers sa théorie.

²⁹ Mais comme le rappellent Kelly et Green (1998), l'écologie conceptuelle est, chez Toulmin, possédée par une discipline, alors que Posner et al. l'emploient au niveau de l'individu.

Ce modèle est clairement macroscopique : au sein de l'écologie, la conception est vue comme une entité atomique. Cette supposition est évidemment simpliste, mais selon Hewson (1981, p. 393), un tel niveau de description est déjà suffisant pour exposer la dynamique rationnelle qui est à la base de l'apprentissage : il n'est pas nécessaire pour l'instant d'aborder sa structure interne.

Les conditions au changement conceptuel

Selon ce modèle, dans l'éventualité où l'élève possède une conception initiale (C) qui est conceptuellement irréconciliable avec la conception scientifique enseignée (C'), C doit être remplacée par C'. Pour qu'il y ait réel apprentissage, ce remplacement (ou accommodation) doit être le résultat d'une lutte rationnelle entre les deux conceptions au sein de l'écologie conceptuelle de l'élève. Posner et al. proposent que l'accommodation se produit généralement lorsque les quatre conditions suivantes sont remplies (Posner et al., 1982, p. 214) :

- Il doit y avoir insatisfaction envers C;
- C' doit être intelligible;
- C' doit apparaître plausible;
- C' doit être féconde.

Pour que ces conditions soient remplies par les conceptions C et C' et donc que C' s'impose de manière rationnelle, il est essentiel que l'écologie conceptuelle de l'élève comporte les éléments appropriés. Par exemple (Strike & Posner, 1985, p. 217) : les anomalies relatives à la conception C constituent la source majeure d'insatisfaction envers C, et peuvent en même temps favoriser un jugement de plausibilité et de fécondité à l'endroit de C'; un exemple typique d'application peut quant à lui aider à l'intelligibilité de C' de même qu'à sa plausibilité; les engagements épistémologiques envers la consistance interne et les explications générales sont nécessaires pour rendre saillantes les anomalies de C et aident à la plausibilité de C' (Hewson & Hewson, 1984).

Hewson distingue trois statuts aux conceptions :

« Within the model, the status of a conception is considered to be intelligible (I) (i.e. not plausible and not fruitful), intelligible and plausible (IP) (but not fruitful) and intelligible, plausible and fruitful (IPF). As discussed before, a conception cannot be fruitful without being plausible, and cannot be plausible without being intelligible. » (Hewson, 1981, p. 389)

Le processus d'accommodation peut être vu comme une compétition entre les conceptions, où l'emporte celle qui a le statut le plus élevé, compétition qui par ailleurs n'a rien d'instantané :

« As long as the existing conception's status is greater than the alternative's (for whatever reason), accommodation will not proceed. Whenever the alternative's status exceeds the existing conception's status, accommodation, for the time being, will move forward. But, as we have discussed, many factors affect status. Therefore, competition between conceptions results in a process of accommodation characterized by temporary advances, frequent retreats, and periods of indecision. » (Strike & Posner, 1985, p. 221)

Discussion

À l'intérieur de l'espace de la problématique du changement conceptuel, le modèle de Posner et al. occupe une région dont il est important de tenter de spécifier les limites. D'abord, les auteurs présupposent que les conceptions initiales sont articulées, voire formalisées (leur premier exemple d'application a été à propos de l'apprentissage de la relativité restreinte). Ceci les amène à valoriser le recours aux anomalies pour créer de l'insatisfaction, ce qui, de l'aveu rétrospectif des auteurs, n'est probablement pas efficace pour les conceptions peu conceptualisées (Strike & Posner, 1992, pp. 158-159). Aussi, en considérant la conception de l'élève comme une unité dans le processus d'accommodation, le modèle est macroscopique. Finalement, Posner et al. distinguent bien les aspects relatifs à la compréhension de ceux relatifs à l'acceptation dans le processus de changement conceptuel (Strike & Posner, 1985, p. 229), mais leur modèle s'intéresse avant tout à l'acceptation (le « statut d'une conception »). Ceci nous apparaît normal puisque ce modèle possède un grain d'analyse (la conception est prise comme que tout) qui ne lui permet pas d'aborder la nature de la compréhension (ou de l'incompréhension).

Ce modèle a souvent été présenté comme paradigmatique, probablement dû au fait de ses propres plausibilité et fécondité dans le programme de recherche sur le changement conceptuel :

« Why has Posner et al.'s conceptual change model dominated the field of science education up to the present time? We believe the answer lies in the aspect of their work which explicitly takes into consideration students' epistemological commitments to their conceptions, providing the researcher with tools to work with by introducing the conditions of conceptual change, namely, intelligibility, plausibility, fruitfulness, and dissatisfaction. » (Tyson, Venville, Harrison, & Treagust, 1997, p. 391)

Bien sûr, les limites du modèle ont été pointées, notamment sa trop grande insistance sur l'aspect rationnel de l'apprentissage au détriment des facteurs sociaux et motivationnels, mais il faut en même temps mentionner que la liste de facteurs affectant le changement conceptuel est longue et que les auteurs du modèle n'ont pas prétendu tous les couvrir (Strike & Posner, 1992, p. 161). Aux yeux de ses auteurs, ce modèle ne doit pas être vu comme définitif, mais plutôt comme une tentative de mettre sur pieds un programme de recherche sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences (Strike & Posner, 1992, p. 172).

2.2.2.2 Deux modèles microscopiques de changement conceptuel

Le modèle de Posner et al. s'est avéré très influent durant les années 1980, mais dans la première moitié des années 1990, deux modèles de changement conceptuel très différents sont apparus. Contrairement au modèle dominant, ces derniers ont opté pour une approche microscopique : les conceptions y sont vues comme des structures complexes dont la réforme ne se fait que graduellement, avec une multitude d'états intermédiaires possibles. Ces deux modèles, en questionnant la nature des conceptions, tentent de représenter la cognition des élèves telle qu'elle est : ils recherchent donc une plausibilité psychologique et sont en conséquence moins influencés par l'épistémologie. Finalement, en s'intéressant à la structure interne des conceptions, ils se sont concentrés sur la question de la compréhension et ont négligé entièrement celle de l'acceptation des conceptions scientifiques.

La coordination des p-primis de diSessa

De ses propres travaux datant du début des années 1980, diSessa arrive à la conclusion que la physique spontanée des élèves n'est pas essentiellement différente de la physique scientifique (diSessa, 1982, p. 59). En proposant son modèle fort original, il vise à montrer comment la physique newtonienne émerge de la physique spontanée par un processus progressif.

Pour ce faire, diSessa se doit d'abord de critiquer rudement l'approche qui considère les conceptions comme de petites théories intuitives, efficaces et consistantes à l'intérieur de leur domaine d'application. La physique spontanée serait plutôt formée d'un nombre assez grand de fragments faiblement connectés, ce qui se

révèle bien selon lui la contextualité élevée des réponses des sujets (diSessa, 1988). Il s'oppose de plus à l'idée d'une physique intuitive comme croyance qu'il s'agirait de contrer par une argumentation rationnelle (diSessa, 1996, p. 714). Les stratégies d'enseignement basées sur cette approche lui paraissent peu efficaces, alors même que des recherches ont montré que certaines intuitions physiques appropriées pouvaient être astucieusement récupérées pour traiter de nouveaux contextes (Clement, 1989). Finalement, la notion classique de concept (un concept est défini par des conditions nécessaires et suffisantes) parfois employée dans la littérature lui semble trop floue : « without a clear notion of what a concept is, the standard model really only begs the question of what counts as a conceptual change. » (diSessa & Sherin, 1998, p. 1158) DiSessa préconise donc l'adoption d'un grain d'analyse petit pour l'étude du processus de changement conceptuel :

« Only with a more appropriate, sub-conceptual grain size can we describe the structure (and, in consequence, define and evaluate coherence) of naïve ideas, and only at that level can we track the re-constitution of naïve elements into normative concepts. » (diSessa, 2008, p. 38)

Les entités du modèle

DiSessa tient à s'émanciper des approches traditionnelles et à se créer un espace de manoeuvre concernant la nature des entités épistémiques à la base de la connaissance des élèves. Son approche est originale : il propose l'idée que plusieurs concepts employés en physique mécanique (et en science en général) sont d'une nature spécifique : ce sont des classes de coordination.

Une classe de coordination constitue un ensemble de façons systématiquement connectées d'obtenir de l'information sur le monde (diSessa & Sherin, 1998, p. 1171). Selon diSessa, les concepts de vitesse et de force constituent des exemples typiques de classes de coordination. Elles sont composées de deux éléments : d'une part les « stratégies de lecture » d'information (*readout strategies*) sur la situation, et d'autre part le réseau causal (*causal net*) permettant de relier cette information à celle désirée mais non directement observable. Pour développer une classe de coordination utile, il s'agit de bien coordonner une ou plusieurs stratégies de lecture avec une ou plusieurs inférences du réseau causal, et d'être capable d'utiliser différentes de ces combinaisons pour obtenir la même information dans différents contextes (diSessa, 2002, p. 45). Par exemple, pour pouvoir appliquer le concept

newtonien de force de manière constante à travers les contextes, il est nécessaire de coordonner au sein d'une structure cognitive complexe plusieurs stratégies de lecture d'information de même que plusieurs relations causales. Du fait de leur complexité, les classes de coordination pourraient bien ne pas encore exister au niveau de la physique naïve (diSessa, 2002, p. 43).

Le réseau causal est constitué à son tour de deux types d'éléments : des équations et des primitives phénoménologiques (p-prims). Les p-prims peuvent être conçues comme des relations causales intuitives entre deux ou plusieurs quantités ou qualités. Elles forment ce que diSessa appelle le « *sense of mechanism* », le cœur de la physique intuitive. Les p-prims sont phénoménologiques pour deux raisons :

« They are *phenomenological* in the sense that they often originate in a nearly superficial interpretations of experienced reality. They are also phenomenological in the sense that, once established, p-prims 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. » (diSessa, 1993, p. 112)

Les p-prims sont primitives parce qu'elles sont employées sans justification (elles sont perçues comme évidentes) et qu'elles constituent des structures mentales atomiques, monolithiques. Les p-prims sont très nombreuses : il en existe des centaines, voire des milliers (diSessa, 2002, p. 39). L'exemple paradigmatique est la « p-prim d'Ohm » : un agent agit pour produire un résultat contre une résistance. En plus de son utilisation éponyme en électricité,

« [...] 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. » (Potvin, 2002, p. 51)

Un autre exemple de p-prim est celle « *working harder* » : davantage d'efforts (ou l'indice d'un effort plus grand) peut être interprété comme si l'effort supplémentaire visait à compenser pour une résistance accrue. Un bon exemple d'emploi de cette p-prim est lorsqu'un sujet a l'impression qu'un aspirateur que l'on obstrue et qui est plus bruyant « travaille plus fort », alors qu'en réalité le moteur tourne à vide puisqu'il n'a pas à recréer une différence de pression (diSessa, 1993, p. 219).

Les p-prims sont activées par les caractéristiques du contexte jugées saillantes pour le phénomène considéré :

« P-prims act largely by being recognized [which] means being cued to an active state on the basis of perceived configuration, which are themselves previously activated knowledge structures. [...] Learning should provide that p-prims are activated in appropriated circumstances. » (diSessa, 1993, p. 112)

Ceci permet d'expliquer, selon diSessa, la grande variabilité des réponses des sujets à travers les contextes : la modification d'un aspect superficiel (selon la perspective newtonienne) serait suffisant pour faire activer une p-prim alternative et donc modifier la prédiction ou l'explication fournie par le sujet.

L'évolution de la structure cognitive

En ce qui concerne l'évolution de la physique naïve, il est clair que ce ne sont pas les p-prims qui évoluent (puisque elles sont atomiques), mais bien leur utilisation et leur fonction à l'intérieur d'une classe de coordination :

« The development from naive to expert physical intuition is hypothesized to occur in the following ways. First, the rather large but relatively unstructured collection of p-prims present in naive individuals gets tuned toward use in instructed physics. *Unstructured* means cuing and reliability are only established in small neighborhoods within the network. Priority is local, and there may be no central and dominate elements. There may even be no sense-of-mechanism-based way to decide which of two p-prims actually should apply in a case of conflict. During "turning toward expertise," the priority of some p-prims becomes greatly enhanced or reduced, and contexts of activation may migrate, expand, or contract, depending on the elements' new role in the developing physics knowledge systems. »

« Undoubtedly some entirely new p-prims are generated as the learner's descriptive apparatus changes to focus on different features and configurations in the physical world. But, a more drastic revision in the intuitive knowledge system is in the change in function of p-prims. They can no longer be self-explanatory but must defer to much more complex knowledge structures, such as physics laws, for justification. [...] I call this reuse and integration of intuitive knowledge structures into the functional encoding of expertise distributed encoding. This name is intended to imply that the encoding of, for example, a physical law may be spread over many intuitive contributors that each plays some small role in "knowing the law." » (diSessa, 1993, pp. 114-115)

Ainsi, l'apprentissage de la physique newtonienne ne se fait pas à l'occasion d'un remplacement de la physique spontanée, mais plutôt par un travail complexe d'intégration, au sein d'une classe de coordination, des bribes d'intuitions éparses qui la constituent. En ce sens, cet apprentissage peut être vu comme une domestication de l'intuition physique.

Les modèles mentaux de Vosniadou

À l'instar de diSessa, la psychologue Stella Vosniadou a opté pour un modèle microscopique et de type psychologique pour expliquer les conceptions spontanées

des élèves et leur évolution. Mais contrairement à diSessa, qui défend l'idée d'une connaissance spontanée constituée d'éléments fragmentés qu'il s'agirait d'organiser, Vosniadou considère que cette connaissance spontanée est constituée d'éléments qui sont organisés et qui forment une structure qu'il s'agit de réorganiser (Vosniadou, 2002, p. 67). Du fait de cette cohérence, Vosniadou aborde les conceptions initiales comme des théories (dans un sens faible) :

« The term “theory” is used relatively freely to denote an explanatory system with some coherence. Unlike Gopnik (1996) it is assumed that this system differs in many respects from a scientific theory. It lacks the systematicity of a scientific theory as well as other characteristics of scientific theories such as their abstractness, and social/institutional nature. It is also assumed that children differ from scientists in important ways, for example in the strategies they use to evaluate evidence or in that they lack metaconceptual awareness of their naïve theories [...] » (Vosniadou, 2002, p. 64).

Les entités du modèle

Selon Vosniadou, les réponses des enfants lors des tests sont produites à l'aide d'un modèle mental, i.e. une représentation dynamique que les élèves emploient pour penser le phénomène. Les modèles mentaux sont bien souvent construits sur mesure pour la situation rencontrée : ce sont des structures cognitives de surface et bien souvent temporaires (Vosniadou, 1994, p. 48). Ces modèles mentaux sont déterminés par des éléments cognitifs plus profonds : les théories cadres (*framework theory*) et les théories spécifiques. Une théorie cadre représente l'ensemble des présuppositions à la base de la compréhension d'un phénomène.

« [W]e have used the term “framework theory” to refer to the conceptual system that young children form to interpret their observations about the physical world, as well as their interpretations of the information provided by the culture. The term “theory” is used relatively freely to denote an explanatory system with some coherence. » (Vosniadou, 2002, p. 64)

« This framework theory of physics constrains the process of acquiring knowledge about the physical world in ways analogous to those that research programs and paradigms have been thought to constrain the development of scientific theories (Kuhn, 1977; Lakatos, 1970). » (Vosniadou, 1994)

Les théories cadres sont formées de deux types de présuppositions. Les présuppositions ontologiques portent sur les types d'entités supposées existantes et la façon dont elles sont catégorisées (par exemple à propos des mouvements : « il existe des objets physiques et ceux-ci sont soit animés ou inanimés »). Les présuppositions épistémologiques concernent quant à elles la nature des explications et la nature de

l'apprentissage (par exemple : « le mouvement d'un objet non vivant doit être expliqué »; « les explications doivent être basées sur des mécanismes causaux »).³⁰

Les théories spécifiques constituent un ensemble de propositions ou croyances reliées, qui décrivent les propriétés et les comportements des objets physiques. Ces croyances sont générées par l'observation et l'information présentée par la culture, et ce, sous les contraintes de la théorie cadre (Vosniadou & Ioannides, 1998, p. 1216).

La théorie spécifique constitue la base à partir de laquelle est généré, pour une situation spécifique, un modèle mental. Celui-ci est alors manipulé pour fournir des explications causales ou des prédictions à propos des phénomènes physiques. L'exemple typique est le modèle des enfants à propos de la Terre. Leur modèle mental est souvent celui d'une Terre plate. Selon Vosniadou et Brewer (1992), ce modèle est déterminé par les éléments formant leurs théories cadre et spécifique (voir l'exemple de la figure 7).

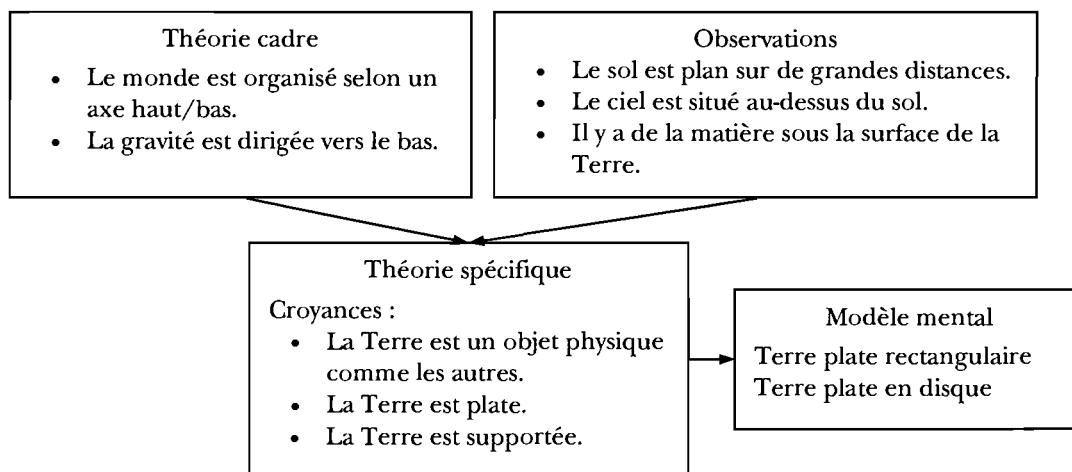


Figure 7. Exemple de structure conceptuelle à la base d'un modèle mental initial de la Terre. Tiré avec simplification de Vosniadou (1994).

L'évolution de la structure cognitive

La structure cognitive proposée dans le modèle de Vosniadou comporte plusieurs niveaux et les changements sont par conséquent susceptibles de se produire à

³⁰ Ainsi, les présuppositions épistémologiques dans le modèle de Vosniadou semblent concerner moins les valeurs épistémologiques des élèves (comme un souci de cohérence, simplicité, pouvoir explicatif, etc.) que leurs « idéaux d'ordre naturel » (Toulmin, 1961) qui, tout en ne requérant pas eux-mêmes d'explication, déterminent l'éventail des phénomènes qui doivent en recevoir.

plusieurs endroits. Vosniadou propose deux types de changement : par enrichissement et par révision. L'apprentissage par enrichissement consiste en l'ajout de nouvelles observations ou informations dans la structure cognitive, sans remise en question de la théorie cadre (par exemple : l'apprentissage que la Lune possède des cratères). Une révision au niveau de la théorie cadre constitue cependant un changement ardu, car il a beaucoup d'implications (Vosniadou, 1994, p. 49).

Lorsque des révisions doivent être effectuées dans la théorie cadre, des échecs d'apprentissage sont susceptibles de survenir. Lorsque l'élève intègre de l'information sans pour autant changer certaines présuppositions qui devraient pourtant l'être, un modèle mental erroné (« modèle synthétique ») est produit. La figure 8 présente des exemples de modèles mentaux synthétiques à propos de la Terre. Pour gérer l'inconsistance de l'information culturelle « la Terre est ronde (ou sphérique) » avec ses théories cadre et spécifique, l'élève peut générer différents modèles synthétiques : a) une Terre aplatie; b) une Terre creuse (les humains vivent sur un plan à l'intérieur de la Terre qui est sphérique); c) une Terre duale (il existe deux Terres, l'une plate où les humains vivent, et une autre sphérique). Dans ces trois modèles synthétiques, plusieurs composantes de la théorie cadre demeurent inchangées : l'objet Terre est encore soumis à une organisation haut/bas, à une gravité dirigée vers le bas, et à un réalisme très naïf (responsable du fait que les modèles ont tous une partie plate). Le troisième modèle conserve de plus la présupposition que l'objet Terre a besoin d'un support.

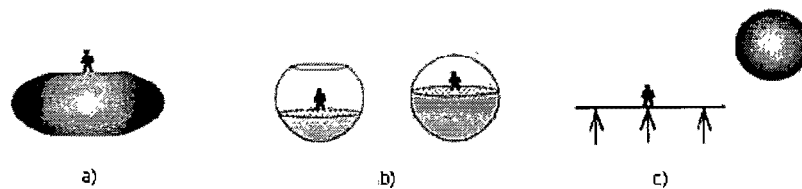


Figure 8. Modèles synthétiques de la Terre : a) la Terre aplatie, b) la sphère creuse, c) la Terre duale. Tiré de Vosniadou et Brewer (1992, p. 549).

Pour qu'un changement conceptuel soit réussi, il est nécessaire que les présuppositions fondamentales soient correctement modifiées. Dans le cas du modèle de la Terre, il faut que cette dernière soit considérée non plus comme un objet physique ordinaire, soumis à la gravité et à la distinction haut/bas, mais plutôt comme un objet astronomique auquel ne s'appliquent pas ces présuppositions. Ce

type de modification est similaire aux changements de catégories ontologiques proposés par Chi (voir plus loin) de même qu'à la révolution copernicienne telle que présentée par Thagard (1992) (Vosniadou, 2003, p. 391).³¹

Discussion des modèles microscopiques

DiSessa a élaboré un modèle innovateur et puissant pour expliquer dans le détail l'émergence d'un sens newtonien de la physique. De l'aveu de son auteur, ce modèle est d'autant plus pertinent que le domaine où il est appliqué est phénoménologiquement riche et ancré dans l'expérience (diSessa, 2008, p. 37), ce qui peut expliquer pourquoi il n'a été appliqué de manière aussi convaincante à d'autres domaines que la mécanique.³² Dans l'espace de la problématique du changement conceptuel, le modèle de diSessa occupe donc un endroit limité. Et, comme nous l'avons mentionné plus haut, ce modèle est clairement microscopique et psychologique, et, en s'intéressant au *sens of mechanism*, diSessa est exclusivement concerné par la question de la compréhension et n'aborde pas celle de la croyance ou l'acceptation.

DiSessa a été fort critique en sommant les chercheurs de proposer des structures cognitives plus fines et des mécanismes d'apprentissage plus détaillés pour expliquer le changement conceptuel. À notre avis, le modèle proposé par Stella Vosniadou est un modèle qui a incarné au moins partiellement ces nouvelles attentes. En effet, en proposant un modèle microscopique, Vosniadou (2002, p. 63) parvient à montrer le caractère graduel du processus d'apprentissage (ce qui se constate notamment dans l'existence des modèles synthétiques). De plus, comme diSessa, son modèle se préoccupe essentiellement de la compréhension. Le fait que ces deux modèles ne se

³¹ À notre avis, les modèles de l'atome recueillis par Petri et Niedderer que nous avons présentés à la section 1.2 pourraient aisément être interprétés selon le modèle de Vosniadou.

³² Mentionnons l'utilisation par Wittman (2002) de la notion de classe de coordination pour comprendre l'apprentissage de la physique ondulatoire. En biologie, Southerland et ses collègues ont proposé l'existence d'une p-prim « need as a rationale for change » pour expliquer les explications téléologiques fournies par les élèves à propos de l'évolution des espèces (Southerland, Abrams, Cummins, & Anzelmo, 2001). En mathématique, Stavy, Tsamir et Tirosh (2002) proposent l'existence de règles mathématiques intuitives telles « more A – more B », qui nous semblent être très similaires aux p-prim. En chimie, Taber (2008) avance que la conception de l'octet tire son attrait d'une p-prim du type « complet / symétrique = désirable ». Finalement, mentionnons que diSessa et ses collègues ont adapté leur approche à l'étude des « épistémologies naïves » des étudiants (Hammer & Elby, 2002; diSessa, Elby, & Hammer, 2003).

soient pas soucieux d'inclure la question de l'acceptation est probablement dû au fait que celle-ci porte souvent sur le tout qu'est une conception et non sur les composantes de sa structure interne, le foyer d'attention de ces modèles.

Les modèles mentaux initialement étudiés par Vosniadou portaient sur la Terre et son modèle de changement conceptuel n'a pas vraiment subi de critiques pour ce domaine d'application. Mais Vosniadou et ses collègues ont par la suite appliqué avec succès le modèle à la mécanique intuitive (Ioannides & Vosniadou, 2002), résultat par ailleurs vivement contesté par diSessa (diSessa, Gillepsie, & Esterly, 2004). Cette confrontation est peut-être l'une des seules jusqu'à maintenant dans le programme de recherche à répondre aux critères de ce que l'on pourrait appeler une « confrontation authentique » : deux modèles théoriquement et empiriquement élaborés, tentant d'occuper le même espace dans la problématique du changement conceptuel, au moins partiellement incompatibles et ouvertement en opposition.

2.2.2.3 Trois modèles épistémologiques intermédiaires

En plus de l'approche macroscopique, qui aborde les conceptions en tant que tout, et de celle, microscopique, qui cherche à comprendre l'évolution de la structure interne des conceptions, s'en trouve une troisième. Sans dire que celle-ci forme une catégorie fourre-tout, nous devons reconnaître que sa caractérisation est plus difficile.

Les modèles microscopiques tentent de comprendre la nature psychologique de la structure interne des conceptions, afin d'expliquer la gradualité de leur évolution et ses ratés occasionnels. Cette approche est ascendante : le point de vue adopté est celui de la structure actuelle ; le savoir scientifique n'est qu'un des possibles futurs et ne reçoit pas d'attention particulière dans l'analyse. La troisième approche que nous présentons est différente. À l'instar des modèles microscopiques, on y considère que les conceptions des élèves reposent sur des fondations qu'il faut comprendre. Mais il s'agit cette fois d'une approche épistémologique descendante : à partir du point de vue des savoirs scientifiques, on cherche à se doter d'outils d'analyse pour comprendre ce qu'il manque (ou ce qu'il y a de trop) à la pensée des élèves pour qu'elle puisse nous rejoindre. À ces outils n'ont pas à correspondre directement des structures cognitives bien identifiées : on leur demande plutôt d'être utiles pour analyser les *savoirs*, ceux des élèves et ceux scientifiques, et surtout, leurs différences.

Nous plaçons dans cette famille de modèles l'approche par obstacles, proposée par Bachelard et reprise par la didactique francophone, le modèle des catégories ontologiques de Chi et finalement l'approche par modèles de Chinn et Samarapungavan.³³

Les obstacles

Les obstacles épistémologiques de Bachelard

Gaston Bachelard est certainement l'épistémologue qui a le plus influencé la didactique francophone. Même si son livre phare *La formation de l'esprit scientifique* date de 1938, la notion d'obstacle épistémologique qu'il y présente a grandement aidé les didacticiens à comprendre le phénomène des conceptions des élèves. Bachelard résume ainsi sa position :

« Les professeurs de sciences imaginent que l'esprit commence comme une leçon [...]. Ils n'ont pas réfléchi au fait que l'adolescent arrive dans la classe de Physique avec des connaissances empiriques déjà constituées : il s'agit alors, non pas d'acquérir une culture expérimentale, mais bien de changer de culture expérimentale, de renverser les obstacles déjà amoncelés par la vie quotidienne. [...]

Ainsi, toute culture scientifique doit commencer, comme nous l'expliquerons longuement, par une catharsis intellectuelle et affective. Reste ensuite la tâche la plus difficile : mettre la culture scientifique en état de mobilisation permanente, remplacer le savoir fermé et statique par une connaissance ouverte et dynamique [...]. » (Bachelard, 1938/1999, p. 18)

Selon Bachelard, la pensée des élèves est caractérisée par sa nature concrète : c'est une pensée qui s'intéresse avant tout aux faits, qui est motivée par l'utilité, qui est animée par une curiosité naïve recherchant la variété des phénomènes, qui « joue à la physique pour se distraire ». À l'opposé, la pensée scientifique se construit dans l'abstrait, de manière volontairement détachée de l'expérience immédiate et prête à confronter l'intuition du réel ; c'est une pensée dynamique, qui cultive le problème, car c'est par lui que les connaissances sont amenées à se réorganiser (Bachelard, 1938/1999, pp. 8-9). Pour accéder à la pensée scientifique, l'élève doit rompre avec son mode de pensée initial : il doit changer de culture expérimentale.³⁴

³³ Mais n'oublions pas que psychologie et épistémologie sont pour nous des pôles (section 2.2.1.2), de sorte qu'il est possible pour un modèle d'alterner entre les deux points de vue, ou même de les combiner. Nous pensons cependant que les modèles que nous présentons dans cette section adoptent, plus que les précédents, un point de vue épistémologique.

³⁴ L'idée que l'accès à une saine culture expérimentale passe par une rupture dans la façon de penser n'est pas exclusive à Bachelard. On la retrouve notamment chez Bacon (1620/2000), qui a distingué quatre types d'illusions (celles qui provenant de la nature humaine, celles relatives à chaque personne, celles provenant des mots et celles résidant dans les dogmes des différentes philosophies) devant être dépassées pour faire

Pour Bachelard, ce qui s'avère problématique n'est pas l'existence d'une pensée initiale en soi, mais plutôt l'immobilisme confortable que cette pensée entretient tout naturellement et qui empêche la constitution de la pensée scientifique. Dit autrement, la pensée initiale fait obstacle à celle scientifique.

« Voilà pourquoi c'est bien en termes d'obstacles que se pose le problème de la connaissance scientifique. L'obstacle est ce qui empêche la pensée d'effectuer la rupture productrice de connaissances nouvelles. L'obstacle désigne la résistance intellectuelle. [...] Contrairement à ce que suggère l'étymologie, l'obstacle n'est pas ce contre quoi vient buter la pensée (*obstare* : 'être posé là-devant' !). Il réside dans la pensée même. » (Fabre, 2001, p. 35)

Et puisque la pensée scientifique est dynamique, toute connaissance est susceptible de se constituer obstacle si elle se rigidifie, si elle n'a plus la vigueur de s'examiner et qu'elle s'immobilise dans le concret produit :

« Une connaissance acquise par un effort scientifique peut elle-même décliner. La question abstraite et franche s'use : la réponse concrète reste. Dès lors, l'activité spirituelle s'invertit et se bloque. Un obstacle épistémologique s'incruste sur la connaissance non questionnée. Des habitudes intellectuelles qui furent utiles et saines peuvent, à la longue, entraver la recherche. » (Bachelard, 1938/1999, p. 14)

Un obstacle épistémologique, c'est donc tout ce déjà-là susceptible d'entraver l'accès à une connaissance autre : « affirmations supposées vraies sur le monde ; systèmes de concepts employés pour formuler de telles affirmations ; types récurrents de raisonnements ; images et analogies prégnantes ... Plus toute une nébuleuse de présupposés et de valeurs implicites [...]. » (Soler, 2000, p. 166)

Parmi les obstacles présents dans la culture initiale des élèves et identifiés par Bachelard (1938/1999), nous retrouvons :³⁵

- L'observation première ou le piège du concret. L'esprit préscientifique est entraîné vers le concret immédiatement accessible ; il recherche et admire la diversité qui satisfait sa curiosité. (La science fait au contraire un long effort d'abstraction qui seule permet, à la fin, de revenir au concret et d'y voir par-dessus les apparences.)
- La généralisation hâtive. L'esprit préscientifique prend plaisir à généraliser hâtivement, mais cela au coût d'une perte de précision. La connaissance résultante est alors trop générale et floue pour déboucher sur des problèmes précis : tout trouve une place, causant l'immobilité de la pensée.

place à l'activité véritablement scientifique. « Therefore the best thing would be to set out these errors: for every error that has been and obstacle in the past is an argument of hope for the future. » (p. 78-79)

³⁵ Voir aussi le résumé qu'offre Migne (1994).

- L'obstacle verbal. Un tel obstacle consiste en la fausse explication que produit un terme explicatif. Un exemple typique : les corps tombent à cause de l'attraction. « Ces phénomènes, on les exprime : on croit donc les expliquer. On les reconnaît : on croit donc les connaître. » (p. 73)
- L'obstacle substantialiste. Il consiste à attribuer à l'objet des qualités ou des attributs alors que ceux-ci sont les effets d'un système de relations dans lequel se trouve l'objet. Ce serait, par exemple, expliquer pourquoi l'opium aide à dormir en invoquant une « vertu dormitive ». « Le phénomène immédiat va être pris comme le signe d'une propriété substantielle : aussitôt toute enquête scientifique sera arrêtée ; la réponse substantialiste étouffe toutes les questions. » (p. 102)
- L'obstacle quantitatif. La précision quantitative produit chez l'esprit préscientifique une illusion de rigueur. « Une valeur purificatrice semble s'attacher aux traitements mathématiques de données, même si la valeur de celles-ci était douteuse. » (Migne, 1994, p. 115)

Obstacles et conceptions

Les didacticiens des sciences ont eu tôt fait de rapprocher la notion d'obstacle à celle de conception. Puisque les utilisations de ces notions peuvent être variées, nous limiterons au cas représentatif de Jean-Pierre Astolfi et sa collègue Brigitte Peterfalvi. Ces chercheurs conçoivent les obstacles comme le « noyau dur » des conceptions :

« L'idée d'obstacle entretient évidemment des relations avec celle de représentations ou de conceptions des élèves, mais on peut la décrire comme plus forte. Ce n'est pas seulement que les élèves pensent différemment et que l'on peut identifier leur logique cognitive, c'est qu'existe une certaine nécessité au maintien de ce système de pensée. On peut dire que l'obstacle présente un caractère plus général et plus transversal que la représentation : il est ce qui, en profondeur, l'explique et la stabilise. Diverses représentations, qui portent sur des notions sans lien apparent, peuvent en effet apparaître, à l'analyse, comme les points d'émergence d'un même obstacle. » (Astolfi & Peterfalvi, 1993, p. 106)

Les obstacles sont des structures et des modes de pensée résistants sur lesquels s'appuient les conceptions. L'apprentissage des conceptions scientifiques passe alors par le dépassement des obstacles situés à leur base, ce qui demande des efforts importants. Dans cette optique, « dépasser un obstacle n'est pas surmonter une difficulté mais renoncer coûteusement à un fonctionnement (trop) bien installé » (Astolfi & Peterfalvi, 1997, p. 194).

Enfin, comment un obstacle est-il dépassé ? Astolfi et Peterfalvi (1997) proposent les principes dynamiques suivants, qui n'ont pas à être compris comme séquentiels :

- Les conceptions des élèves sont explicitées, ce qui peut avoir comme effet de renforcer temporairement l'obstacle sous-jacent. L'élève prend conscience des insuffisances associées à sa conception.
- L'alternative conceptuelle est construite, puis sa validité constatée par l'élève. L'élève doit se sentir à l'aise avec l'utilisation de cette nouvelle conception.
- L'obstacle sous-jacent à la conception initiale est explicité et l'élève apprend à reconnaître l'obstacle pour prévenir sa résurgence dans d'autres circonstances.

Les changements d'ontologie de Chi

Alors que les obstacles épistémologiques de Bachelard réfèrent aux modes de pensée qui entravent le développement de la pensée scientifique, la psychologue Michelene Chi (Chi, 1992; Chi, Slotta, & de Leeuw, 1994; Chi & Roscoe, 2002) propose en quelque sorte l'existence d'obstacles ontologiques : si certaines conceptions sont difficiles à apprendre, c'est qu'ils sollicitent des objets ontologiquement nouveaux.

Les entités du modèle

Selon Chi (2008), une conception consiste au niveau psychologique en un modèle mental (comme pour Vosniadou). Ce dernier est élaboré à partir d'un système de propositions, qui à leur tour sont construites à l'aide de concepts. En psychologie cognitive, les concepts sont généralement associés à la notion de catégorie, qui est définie comme un ensemble d'objets considérés comme allant ensemble sur la base d'attributs (Chi, 1997, p. 210). C'est par cette notion de catégorie que Chi aborde la question du changement conceptuel.

Chi (1992) propose de distinguer différentes catégories ontologiques et de les regrouper en au moins trois « arbres » ontologiques totalement distincts : la matière, les processus et les états mentaux. À leur tour, ces arbres peuvent être subdivisés en branches ontologiquement distinctes (voir figure 9). Par exemple, parmi les processus, Chi distingue les procédures, les événements (ou processus directs) et les processus émergents. Ces branches peuvent également faire l'objet de ramification à l'aide de distinctions ontologiques encore plus fines.

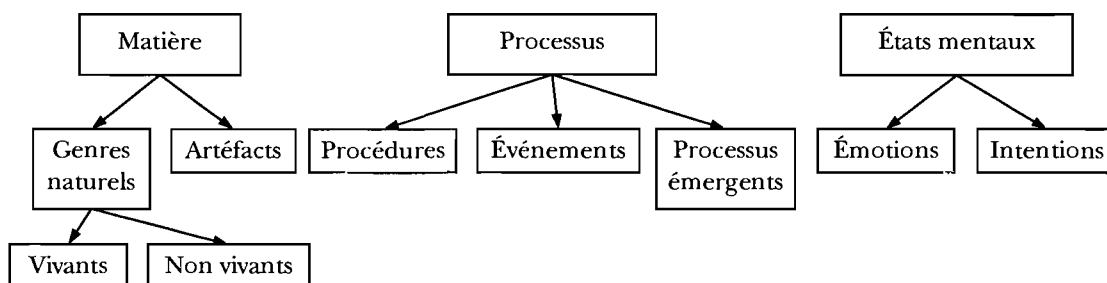


Figure 9. Les principales catégories ontologiques selon Chi (Chi et al., 1994).

Les arbres et les branches se distinguent ontologiquement dans le fait que les entités qu'elles renferment sont soumises à différentes contraintes et qu'aucune opération ne peut transformer une entité d'une catégorie en une entité d'une autre catégorie (par exemple, un chat ne peut être transformé en pierre, et encore moins en un événement ou une émotion). Ceci se répercute au niveau psychologique dans le fait que des entités appartenant à des catégories ontologiques différentes reçoivent des prédicats fort différents. Par exemple, une entité appartenant à la catégorie matière peut avoir une couleur, peut avoir un poids, peut être accumulée ou dissipée (pour les substances), peut mourir (pour les êtres vivants), peut être brisée (pour les artéfacts), etc. Autant de prédicats qui ne s'appliquent pas aux processus ou aux émotions.³⁶

Chi accorde une importance particulière à la distinction entre les processus directs (ou événements) et les processus émergents (Chi, 2005; Chi & Roscoe, 2002). Un processus direct (comme la circulation sanguine) est caractérisé, entre autres, par le fait que : ses composantes sont clairement distinctes (le coeur, les artères, le sang, les poumons, etc.) ; l'interaction entre les composantes s'effectue de manière séquentielle et dépendante (le ventricule ne doit se contracter qu'après l'oreillette) ; il se termine (le coeur est arrêté lorsqu'il n'y a plus de circulation). Un processus émergent (comme la diffusion d'une teinture dans de l'eau) est très différent, puisque : ses composantes sont de nature uniforme (les molécules de la teinture sont identiques, de même celle de l'eau) ; les interactions ne forment pas une séquence et

³⁶ Chi (1997) reconnaît que certains prédicats ontologiques peuvent être employés pour des entités d'un arbre différent, comme dans les phrases suivantes : « ses frustrations s'accumulent », ou que « sa colère s'est dissipée ». Cet usage est cependant métaphorique, ce qui par ailleurs peut constituer une source intéressante de créativité.

sont indépendantes; il ne se termine pas (les collisions entre molécules se poursuivent même après l'atteinte d'un équilibre macroscopique); les interactions ne servent aucun objectif global.

Le changement conceptuel

Selon Chi, la modification d'une croyance erronée ou d'un modèle mental inadéquat n'est pas problématique lorsque les concepts employés ne sont pas modifiés, ou s'ils sont modifiés tout en demeurant dans la même catégorie ontologique. Un apprentissage de ce type se produirait par exemple lorsqu'un apprenant posséderait initialement un modèle de la circulation sanguine où le coeur ferait circuler le sang à travers une seule boucle dans le corps (alors qu'il y a deux boucles de circulation : une vers les poumons, l'autre vers le reste du corps).

Chi réserve le terme changement conceptuel pour les cas plus radicaux où les concepts doivent être réassignés dans une catégorie ontologique différente.³⁷ Par exemple, une conception fréquente chez les élèves consiste à concevoir plusieurs quantités (comme les forces, la lumière, la chaleur et l'électricité) en termes de substances (Reiner, Slotta, Chi, & Resnick, 2000). L'apprentissage requiert dans ces cas un changement conceptuel puisque ces concepts scientifiques appartiennent plutôt à la catégorie des processus. L'apprentissage de la nature et du rôle du code génétique constitue un autre exemple de changement conceptuel important. Alors que les élèves sont capables de faire passer les gènes de la catégorie de substance passive à celle de substance active, ils ont beaucoup de difficulté à les concevoir en tant que processus, i.e. un événement, mettant en oeuvre une procédure de production de protéines (Tsui & Treagust, 2004).

La compréhension du phénomène de diffusion est un exemple de changement conceptuel non pas entre deux arbres ontologiques, mais entre deux branches du même arbre. La diffusion semble à première vue être un processus direct, comme le serait l'écoulement d'une rivière, mais c'est en fait un processus émergent plus complexe (Chi, 1997, p. 228).

³⁷ L'idée d'un changement conceptuel comme changement de localisation dans l'arbre ontologique se retrouve également chez Thagard (1992).

Selon Chi, la difficulté d'un changement conceptuel ne réside pas dans le fait de devoir réassigner un concept à une nouvelle catégorie ontologique. Plutôt, cette difficulté tiendrait d'une part à l'absence de prise de conscience par l'apprenant qu'une modification radicale du concept est nécessaire, mais surtout à l'inexistence chez celui-ci de la catégorie ontologique visée. Par exemple, plusieurs concepts courants en science (tels les courants électriques, les transferts de chaleur, la sélection naturelle, etc.) appartiennent à la catégorie des processus émergents, alors que celle-ci est souvent inexistante chez les élèves. Pour permettre le changement conceptuel, cette catégorie doit d'abord être créée de manière générale, pour qu'ensuite elle puisse accueillir le concept à être réassigné (Chi, 1992; Slotta & Chi, 2006).

L'approche par modèles de Chinn et Samarapungavan

Au fil des années, le programme de recherche sur le changement conceptuel a exploré de nombreuses avenues sans toutefois les intégrer dans une perspective cohérente. La contribution de Chinn et Samarapungavan (2008) s'est donc avérée fort utile puisque ces auteurs se sont efforcés de rassembler les acquis des recherches sur le changement conceptuel au sein d'une approche unique et de faciliter leur traduction en conséquences pratiques pour l'enseignement.

Les entités employées

En suivant une approche proposée par certains épistémologues au penchant cognitif (Giere, 1988, 2004; Nersessian, 2002), Chinn et Samarapungavan adoptent les modèles scientifiques comme outil d'analyse.^{38,39} Afin d'éviter la confusion, il faut distinguer la notion de modèle scientifique et celle de modèle mental :

« Scientific models are representational. They are intended to represent real situations. But real situations are never directly apprehended by people; real situations themselves can only be represented through mental representations. Thus, scientific models are representations that are in turn linked to mental representations of real situations. » (Chinn & Samarapungavan, 2008)

³⁸ Selon Giere (2004, p. 746), le terme « théorie » est utilisé de manière très large en science et en philosophie. Cet auteur préfère l'approche selon laquelle cette notion de « théorie » doit en fait être comprise comme des modèles et des familles de modèles, situés à différents niveaux d'abstraction.

³⁹ Les modèles (et les activités de modélisation) reçoivent également un intérêt croissant en didactique (voir par exemple : Halloun, 1996, 2004; J. K. Gilbert, 2004; Coll, France, & Taylor, 2005; Lehrer & Shauble, 2006).

Nous qualifions l'approche de Chinn et Samarapungavan d'épistémologique car ces derniers tentent de caractériser la nature des modèles scientifiques et les difficultés associées à leur apprentissage.

À la suite de Machamer, Darden et Craver (2000, p. 3), Chinn et Samarapungavan proposent que la modélisation de mécanismes s'effectue à l'aide de deux composantes : des entités (possédant certaines propriétés) et des activités (gouvernées par des règles). Pour décrire l'évolution d'un mécanisme, il est de plus nécessaire de spécifier des conditions initiales, intermédiaires, et/ou finales. La continuité dans l'évolution d'un mécanisme est par ailleurs essentielle à sa description complète et intelligible. La modélisation des mécanismes s'effectue souvent à plusieurs niveaux d'analyse, le niveau de base étant considéré comme fondamental pour les besoins du scientifique ou de sa discipline (cette fondation étant relative aux intérêts de recherche de la discipline (Machamer et al., 2000, p. 13)).

Les obstacles au changement conceptuel

Dans leur synthèse de la littérature, Chinn et Samarapungavan (2008) proposent de cataloguer les obstacles à l'apprentissage des nouveaux modèles à l'aide de deux rubriques : les obstacles concernant les changements croyance et ceux relatifs à la compréhension. Puisque la plupart des facteurs affectant le changement de croyance sont présentés ailleurs dans notre revue (voir particulièrement la section 2.2.3.1), nous nous limiterons ici à la présentation des trois principales familles d'obstacles à la compréhension des modèles scientifiques.

La première famille d'obstacle est de nature épistémologique. Les élèves de niveau primaire et secondaire montrent des lacunes importantes dans leur compréhension de la nature des modèles (Grosslight, Unger, Jay, & Smith, 1991). Ainsi, leur apprentissage serait facilité par une meilleure compréhension à ce niveau : les modèles constituent des idéalizations par rapport à la réalité; une pluralité des modèles peut aide à une meilleure compréhension d'un phénomène ; les modèles erronés peuvent tout de même s'avérer utiles en science; etc.

Une deuxième famille d'obstacles porte sur les différences conceptuelles entre les modèles antérieurs et ceux faisant l'objet de l'apprentissage. Chinn et Samarapungavan remarquent tout d'abord qu'il existe différents types de structure

de modèles : 1) les modèles causaux, basés sur des relations de cause à effet; 2) les modèles fonctionnels, intentionnels ou téléologiques, basés sur l'accomplissement de fonctions, désirs, etc.; 3) les modèles basés sur des régularités, qui ne font pas intervenir de causalité (comme ceux gouvernés par des principes de conservation ou des contraintes numériques). Les modèles causaux sont particulièrement présents à l'école, de sorte que ces chercheurs accordent une attention particulière à l'identification de leurs caractéristiques, qui peuvent différer des modèles initiaux possédés par les élèves et ainsi causer d'importantes difficultés d'apprentissage. Les modèles causaux peuvent varier quant :

- À l'emplacement de l'agent causal : la cause affectant l'entité peut être soit dans l'environnement, soit à l'intérieur même de l'entité modélisée;
- À la complexité des modèles : des modèles complexes peuvent faire intervenir des causes multiples et parallèles, des relations cause à effet non linéaires, des réservoirs et des débits, etc.
- Au niveau du mécanisme causal : les élèves auraient tendance à recourir à des causes superficielles ou intentionnelles, mais auraient des difficultés avec les mécanismes faisant intervenir des variables non observables (comme l'accélération) de même qu'avec les causes relationnelles (comme les forces) et abstraites (comme la notion de culture par exemple);
- Au type de causalité fondamentale : par exemple, les élèves ont davantage de facilité avec les processus causaux fonctionnant par contact qu'avec ceux faisant intervenir des actions à distance.⁴⁰

Mais ces différences de structure entre modèles initiaux et modèles scientifiques ne constituent pas les seules difficultés. Un modèle scientifique, même compris, doit pour être employé être coordonné à la représentation mentale de la situation. Ce travail de coordination peut occasionner plusieurs difficultés. Par exemple, les entités du modèle peuvent être différentes de celles formant la représentation mentale :

- La coordination des entités une à une est probablement plus aisée qu'une coordination « une à plusieurs » ou « plusieurs à une ».
- Les propriétés des entités du modèle scientifique peuvent être absentes ou non saillantes dans le modèle initial des élèves.
- Certains modèles scientifiques peuvent omettre certaines entités ou propriétés importantes dans le modèle initial.

⁴⁰ Pour une intéressante typologie alternative de la complexité des mécanismes causaux et de leur apprentissage, voir Perkins & Grotzer (2005) et Grotzer (2003) respectivement.

- Ce qui est une entité pour le modèle initial peut être une propriété ou un processus dans le modèle scientifique.⁴¹

Finalement, une troisième famille d'obstacle à la compréhension des modèles concerne les relations existant entre les différents modèles scientifiques. En effet, l'apprentissage peut être compromis si l'élève ne parvient à effectuer un certain nombre de liens entre les divers modèles employés :

- Les liens contrastants entre deux instances d'un même modèle peuvent aider à mettre en évidence des aspects non saillants de ce modèle. Par exemple, pour favoriser la compréhension de l'effet des liens intermoléculaires sur le taux d'évaporation, il est utile de comparer deux instances du modèle qui se comportent différemment, comme l'eau et un alcool.
- Les modèles appartiennent à des familles de modèles, et une des caractéristiques des experts est la construction et l'accès à ces modèles plus haut dans la hiérarchie (Giere, 1994). Par exemple, pour l'expert, le modèle du pendule et celui du ressort appartiennent tous deux à la famille définie par le modèle plus abstrait de l'oscillateur harmonique.

Discussion

En qualifiant les trois derniers modèles de changement conceptuel d'intermédiaires et épistémologiques, nous avons tenté de faire ressortir que ces modèles s'efforçaient moins d'identifier la structure cognitive derrière les conceptions des élèves (comme le font les deux modèles microscopiques que nous avons présentés) que de trouver une façon de comprendre l'originalité des savoirs scientifiques par rapport aux conceptions spontanées et d'ainsi mieux apprécier l'ampleur de l'apprentissage demandé aux élèves.

Dans le cas de Bachelard et des didacticiens qui reprennent son concept d'obstacle épistémologique, on souligne que le savoir scientifique demande le dépassement de certaines habitudes faciles de l'esprit qui tendent à l'immobiliser. Pour Chi, le savoir scientifique requiert de réassigner certains concepts à des catégories ontologiques différentes, et parfois même de créer des catégories nouvelles. Selon Chinn et

⁴¹ Aux différences relatives aux entités (et à leurs propriétés), s'ajoutent celles relatives aux contraintes subies par les entités, que nous ne présenterons pas.

Samarapungavan, les modèles scientifiques sont parfois d'une nature bien différente des modèles initiaux des élèves.

Du fait que ces approches visent d'abord à caractériser les savoirs scientifiques de la manière la plus pertinente possible au regard de leur apprentissage, nous sommes en droit de penser qu'elles parviennent plus difficilement à exposer la dynamique psychologique de l'apprentissage, dans sa gradualité et ses errances. Mais cela n'empêche aucunement ces modèles d'être très utiles, car ils peuvent grandement éclairer l'enseignement. L'approche de Chinn et Samarapungavan le démontre sans équivoque. En fait, nous pouvons renverser la question et nous demander sans offrir de réponse si les modèles microscopiques qui s'efforcent de décrire finement la structure cognitive (comme le fait en particulier diSessa) représentent les investissements théoriques les plus susceptibles de rapporter au niveau des retombées sur les pratiques enseignantes.

2.2.3 Quelques facteurs affectant le changement conceptuel

Une partie importante des recherches sur le changement conceptuel a porté non pas sur la nature de celui-ci, mais plutôt sur les facteurs susceptibles de l'influencer. Sans prétendre à l'exhaustivité, cette troisième section de notre revue du programme de recherche vise à montrer que les notions de conflit cognitif, de croyance épistémologique, d'engagement émotif et de socialisation permettent de donner une perspective plus complète sur ce type d'apprentissage.

2.2.3.1 Du conflit cognitif à la modélisation de l'évaluation des données

La stratégie du conflit cognitif

Après la mise évidence l'existence de conceptions initiales étonnamment résistantes chez les élèves, plusieurs chercheurs ont proposé et testé des stratégies d'enseignement basées sur un minage de ces conceptions. Cette approche est parfaitement compréhensible : lorsqu'un rocher se trouve sur le site de construction d'un immeuble, quoi de plus naturel que de le dynamiter d'abord ? Plusieurs stratégies ont donc privilégié le recours aux conflits cognitifs pour provoquer un réel

apprentissage.⁴² Cette idée est notamment suggérée de manière implicite par le modèle très influent de Posner et al., du fait qu'il accorde une place importante aux anomalies formulées à l'endroit d'une conception.

La notion de conflit cognitif n'est évidemment pas nouvelle en psychologie. Chez Piaget, le conflit cognitif consiste en une incapacité de l'enfant à assimiler un objet ou un événement par ses structures cognitives actuelles, ce qui peut causer un déséquilibre motivant la recherche de meilleures formes de connaissances. Le conflit est alors conçu comme l'un des principaux moteurs du développement cognitif. En psychologie sociale, la notion de dissonance cognitive proposée par Festinger (1957) joue un rôle similaire : une personne vivant une dissonance cognitive entre deux éléments de cognition (à propos d'elle-même, de son comportement, ou de son environnement) ressentira un inconfort croissant avec l'importance de la dissonance, ce qui l'amènera à réduire celle-ci, soit en altérant un élément de cognition, soit en en ajoutant de nouveaux afin de la neutraliser ou encore de la submerger.

Quoi qu'il en soit, l'étude du conflit cognitif a pris un nouveau départ en didactique des sciences avec le programme de recherche sur le changement conceptuel.⁴³ Dans les années 80, de nombreuses recherches ont testé l'efficacité de son utilisation en classe. Dans leur méta-analyse publiée en 1993, Guzzetti et ses collègues (Guzzetti, Snyder, Glass, & Gamas, 1993, p. 149) ont conclu à l'efficacité globale des stratégies d'enseignement basées sur les conflits cognitifs. Mais plusieurs auteurs sont sceptiques et ne voient pas dans le conflit cognitif la pierre philosophale de l'enseignement des sciences. Deux types de problèmes sont rencontrés par cette stratégie : la difficulté à obtenir un conflit cognitif saillant chez l'élève et le fait que les conflits peuvent se résorber par des manières autres que celle prévue par l'enseignant (Dreyfus, Jungwirth, & Eliovitch, 1990, p. 567).

⁴² Pour un survol des stratégies à base de conflit cognitif proposées jusqu'au début des années 90, voir Scott, Asoko et Driver (1992).

⁴³ Pour une présentation alternative du rôle du conflit cognitif et de la dissonance dans la littérature sur le changement conceptuel, voir par exemple Ramirez & Clement (1998) et Limón (2001).

Le problème de l'importance du conflit cognitif

Certains auteurs expliquent la tendance, surtout chez les élèves, à être indifférents face aux conflits cognitifs par leur incapacité à les détecter du fait de leur niveau de développement intellectuel (D. Kuhn, Amsel, & O'Loughlin, 1988; Schauble, 1990; Campanario, 2002). D'autres auteurs sont d'avis contraire : même des élèves de niveau primaire ont la capacité de distinguer les évidences des théories et de changer de manière appropriée leurs croyances en fonction de ces évidences (Samarapungavan, 1992; Chinn & Malhotra, 2002). Les difficultés à produire un conflit cognitif saillant résideraient ailleurs. Comme le résume bien Margarita Limón, plusieurs aspects non cognitifs influencent grandement l'efficacité de la stratégie du conflit cognitif en classe, et une partie importante des insuccès rapportés dans la littérature seraient en fait attribuables à ces facteurs :

« Therefore, the cognitive conflict paradigm as an instructional strategy centered only on students' cognitive aspects neglects many other variables that influence students' learning in the school setting. [...] What is necessary for students to reach a stage of meaningful conflict? To consider new data or new information presented as meaningful, the problems and the topics introduced to students have to be relevant for them. That is, they need to feel curiosity and to be *motivated* about the learning activities. They also need to have a certain amount of *prior knowledge* to be able to understand the new information. The *learning strategies* students use to process the new information and to understand the task the teacher poses could also be relevant factors to promote a meaningful conflict. Students' *attitudes* and *epistemological beliefs* about learning and teaching and about the subjects-matter introduced in the topic could help or hinder their view of the task introduced by the teacher as something meaningful. Also *discussion and work with peers* could help some students to look at the task introduced by the teacher as meaningful. » (Limón, 2001, p. 365)

Les réponses aux données anormales

Mais même à supposer la présence d'un conflit cognitif saillant, rien n'indique que celui-ci conduise automatiquement à l'adoption de la théorie scientifique visée en classe. En fait, une anomalie (ou « donnée anormale ») peut être gérée de bien des façons : la théorie initiale n'est pas nécessairement la coupable.⁴⁴ Chinn et Brewer (1993; 1998a) proposent en fait une taxonomie comprenant pas moins de huit types de réponses aux données anormales. En ordre d'impact sur la théorie initiale, nous avons les réponses suivantes : ignorer tout simplement la donnée anormale ; la rejeter par une explication ; la déclarer incertaine ; l'exclure du domaine de la théorie ; la

⁴⁴ En épistémologie, c'est une thèse que Duhem (1914/1981) a été le premier à défendre.

mettre en suspend ; la réinterpréter par la théorie ; changer la théorie dans sa périphérie ; changer complètement de théorie.

Selon ces auteurs, le type de réponse employée par l'élève dépendra d'une multitude de facteurs, dont : les caractéristiques des connaissances antérieures (poids de la théorie antérieure, croyances ontologiques, engagements épistémologiques, etc.), celles de la théorie de rechange (sa disponibilité, son intelligibilité, sa précision, sa consistance, etc.), de même que celles des données anormales (leur crédibilité, leur ambiguïté, leur nombre, etc.).

La modélisation de l'évaluation des données

L'étude *descriptive* des réponses aux données anormales est donc venue expliquer, au début des années 1990, une partie des difficultés associées à la stratégie du conflit cognitif. Mais du point de vue des modèles de changement conceptuel, son intérêt réside dans la question plus générale qu'elle soulève : comment se fait le pont entre les conceptions et les données (observations) ? Le programme de recherche sur le changement conceptuel ayant cherché à caractériser de différentes façons la structure cognitive des élèves, il est surprenant que la relation entre ces conceptions et les données n'ait pas à son tour fait l'objet d'efforts comparables.

Heureusement, après avoir proposé leur typologie des réponses face aux données anormales, Chinn et Brewer ont proposé un cadre théorique (« models-of-data ») permettant d'étudier les liens complexes qu'emploient les individus lorsqu'ils veulent lier les données aux théories. Faute d'espace, nous nous contenterons de laisser à ces deux auteurs le soin de résumer leur approche de la manière suivante :

« We postulate that when individuals evaluate data, they first construct cognitive models in which data are integrated with theoretical interpretations [...]. These models of data are initially constructed from the perspective of someone who believes the data and the proposed interpretation. The distinctive feature of the models-of-data framework is its set of assumptions about how the data and the theoretical interpretations are represented. We assert that models of data consist largely of events connected through five types of inferential links: causal links, impossible causal links, inductive kinks, analogical kinks, and contrastive links. The majority of the events are connected causally. Individuals evaluate models of data by evaluating the plausibility of these links. » (Chinn & Brewer, 2001, pp. 329-330)

2.2.3.2 L'interaction avec les croyances épistémologiques

Quelques modèles ont souligné l'influence potentiellement majeure des engagements épistémologiques des individus sur le processus de changement conceptuel. Déjà le modèle de Posner et al. intégrait dans l'écologie conceptuelle des apprenants leurs engagements épistémologiques, en suggérant que des engagements envers l'économie et la consistance étaient essentiels afin de créer une pression écologique suffisante pour induire un changement conceptuel :

« Metaphysical beliefs and epistemological commitments form the basis on which judgments are made about new knowledge. Thus, a conceptual change will be rational to the extent that students have at their disposal the requisite standards of judgment necessary for the change. If a change to special relativity requires a commitment to the parsimony and symmetry of physical theories (as it did for Einstein), then students without these commitments will have no rational basis for such a change. Faced with such a situation students, if they are to accept the theory, will be forced to do so on non-rational bases, for example, because the book or the instructors says it is "true". » (Posner et al., 1982, p. 224)

Mais plusieurs auteurs ont attaqué ce modèle en affirmant que celui-ci accorde une place trop exclusive aux changements de théories. Souvent en s'inspirant du modèle triadique de Laudan (1984),⁴⁵ ces critiques proposent de considérer comme aussi importants les changements de méthodologies (ou stratégies de résolution de problème) et ceux dans les visées et valeurs (E. L. Smith, 1987; Villani, 1992). Citons par exemple Gil-Pérez et Carracosca :

« We must not forget that Aristotelian conceptions were only displaced, after being in use for centuries. This was due to a methodological change, which overcame the 'natural' tendency of people to generalize acritically on the basis of limited and uncontrolled observations. » (Gil-Pérez & Carracosca, 1985, p. 234)

« In fact, the common sense paradigm could only be overwhelmed thanks to a new methodology which combines the creativity of divergent thinking and the rigour of hypotheses-checking through experiments under controlled conditions. » (Gil-Pérez & Carracosca, 1990, p. 534)

Les changements ne doivent plus alors être conçus comme holistiques : les théories, méthodologies et visées peuvent être modifiées séparément, et ces modifications peuvent en retour stimuler le développement des autres pôles de la triade (Perkins, 1988; Duschl & Gitomer, 1991).

⁴⁵ Une brève présentation du modèle triadique de Laudan est incluse à la section 3.1.2.2.

Dans cette perspective, le changement conceptuel n'est plus simplement contraint par les engagements (ou croyances) épistémologiques : les deux sont en développement interactif. Cette interaction, possiblement complexe, peut alors devenir un objet d'étude pour les recherches sur le changement conceptuel. Cette piste demeure cependant encore insuffisamment exploitée à l'heure actuelle :

« Conceptual change at the content level is closely linked to changes at meta-levels such as views about the nature of science knowledge (McComas, 1998) and metacognitive views about learning. However, to date little is known about the *interactions* of these conceptual changes. Research should put more emphasis on that in the coming years. » (Duit & Treagust, 2003, p. 676)

2.2.3.3 L'importance des aspects non épistémiques

Il a vite été reconnu que la réalisation d'un changement conceptuel est particulièrement exigeante au niveau cognitif. Par exemple, les jugements d'insatisfaction, de plausibilité et de fertilité dans le modèle de Posner et al. requièrent une réflexion profonde, un contrôle conscient sur l'apprentissage (White, 1989). De manière analogue, Vosniadou reconnaît qu'une modification des présuppositions de la théorie cadre exige souvent une prise de conscience (*awareness*) difficile de la part des élèves (Vosniadou, 1994, p. 67). De plus, cette métacognition serait nécessaire à la durabilité du changement conceptuel et à la capacité à transférer cet apprentissage à de nouvelles situations (Georghiades, 2000).

Le changement conceptuel demande ainsi d'importants efforts de la part de l'élève. L'engagement de ce dernier dans le processus d'apprentissage est donc essentiel. Mais cet engagement est en retour dépendant de nombreux facteurs non épistémiques.

L'importance des aspects motivationnels, contextuels et émotionnels

L'article de Pintrich, Marx et Boyle (1993) a été le premier à effectuer un plaidoyer vigoureux en faveur de l'inclusion de ces facteurs dans l'étude du changement conceptuel. En faisant référence au modèle de Posner et al., ces auteurs affirment :

« [T]he model states four conditions for conceptual change (dissatisfaction, intelligibility, plausibility, and fruitfulness). These four conditions are depicted as if they operated in a cold, rational manner that ignores the influence that motivational constructs might play regarding whether these conditions might be met. » (Pintrich et al., 1993, p. 192)

Il serait donc impératif de se tourner vers un modèle « chaud » de l'apprentissage, et en particulier dans le cas des changements conceptuels. Pour ce faire, les construits motivationnels disponibles en psychologie sont nombreux. L'exploitation de cette avenue de recherche consiste en l'identification des relations causales, directes ou indirectes, entre ces construits et le processus de changement conceptuel. Un premier construit particulièrement important est celui des objectifs d'apprentissage que se donne l'élève. Deux types d'objectif sont généralement distingués : maîtrise et performance.

« A student with a mastery goal orientation engages in achievement activities in order to learn, improve, and better understand with is being taught. [...] In contrast, a student with a performance goal orientation is taking part in the activity in order to demonstrate his or her ability, often in comparison to others [...]. » (Linnenbrink & Pintrich, 2003, pp. 351-352)

Il va sans dire qu'un élève adoptant un objectif de maîtrise est plus susceptible d'effectuer un traitement cognitif profond de l'information qu'il reçoit, et améliore ainsi ses chances d'accomplir le changement conceptuel visé.

Un second construit souvent mentionné est celui des croyances sur la nature de la connaissance. En effet, ces croyances peuvent influencer leur décision de s'engager ou non dans le processus d'apprentissage :

« More advanced beliefs seem to activate and support students' deliberate efforts to produce conceptual change, on a cognitive and motivational plane. A student who believes that knowledge is absolute, certain and simple, composed of information items to be learned in isolation and reproduced as such, and what is known remains stable otherwise the truth would not exist, is much less likely to engage in conceptual change process than a student who believes that knowledge is tentative and evolving, what is true today may be may be rejected in the future in the light of new evidence, and meaningful learning requires establishing connections between concepts and integrating them consistently. » (Mason, 2002, p. 321)

De manière semblable, les intérêts et valeurs des élèves, leur confiance en soi, leur perception de la part de contrôle qu'ils ont sur leur apprentissage, l'anxiété qu'ils vivent, sont tous des facteurs pouvant affecter de diverses façons l'engagement et donc le changement conceptuel (Pintrich, 1999; Linnenbrink & Pintrich, 2003). Ces influences sont complexes et nombreuses, mais encore peu connues (Sinatra, 2002, p. 193).

Récemment, plusieurs de ces aspects motivationnels et contextuels ont été regroupés sous le thème de l'intentionnalité. Dans cette perspective, l'apprenant

idéal n'est plus seulement conçu comme actif, mais aussi comme intentionnel (Bereiter & Scardamalia, 1989). Cette approche accorde une importance centrale au rôle de l'élève dans la mise en branle et le contrôle de son propre apprentissage (Southerland & Sinatra, 2003, p. 326). Plus précisément, le changement conceptuel intentionnel semble comporter au moins trois aspects :

- « Intentional conceptual change is a goal-directed activity with the goal being a change in conceptual understanding.
- Intentional conceptual change involves some metacognitive or metaconceptual awareness or consciousness that they need to change their understanding or that they have a goal of understanding.
- Intentional conceptual change involves some internal agency, volitional control, or self-regulation on the part of individuals as they strive toward this goal of changed understanding. » (Pintrich & Sinatra, 2003, pp. 430-431)

L'intentionnalité de l'apprentissage serait facultative pour les réorganisations conceptuelles mineures, mais faciliterait grandement la compréhension de certains concepts complexes en science (Vosniadou, 2003).

La persuasion

La psychologie de la persuasion s'intéresse à l'étude de l'influence des messages sur les changements d'attitudes (positive, négative, neutre) à propos des gens, des objets ou des idées (Petty, Wheeler, & Tormala, 2003).

Au cours des dernières années, certains psychologues ont tenté de transférer, en l'adaptant, la notion de persuasion au domaine de l'éducation (Murphy, 2001) et en particulier à la problématique du changement conceptuel (Dole & Sinatra, 1998; Gregoire, 2003). Le rapprochement est en effet pertinent, puisque le changement conceptuel et le changement d'attitude constituent tous deux un changement de croyance. Mais contrairement au changement d'attitude, un changement conceptuel implique aussi un changement de compréhension (Vosniadou, 2001, p. 732).

Néanmoins, au moins une idée importante a été récupérée de cette littérature, celle des processus de persuasion à deux niveaux (Chaiken, 1980; Petty & Cacioppo, 1986). Selon l'approche duale, l'individu est susceptible de s'engager plus ou moins profondément dans le traitement de l'information proposée par un message. Par exemple, Petty et Cacioppo (1986) proposent l'existence de deux voies à la persuasion. La voie centrale consiste en un traitement systématique de l'information

contenue dans le message, traitement susceptible de produire chez l'individu un changement d'attitude durable. La qualité de l'argumentation du message est alors sa caractéristique déterminante. Par contre, lorsque l'individu emprunte la voie périphérique, le message n'est traité que superficiellement, en employant diverses heuristiques, comme l'attrait et la crédibilité de la source. Un changement d'attitude est dans cette situation moins probable et celui-ci est assurément moins durable s'il survient.

En s'inspirant du modèle Petty et Cacioppo, Dole et Sinatra (1998) ont proposé un modèle de changement conceptuel au centre duquel se retrouve la notion d'engagement dans le processus de changement conceptuel. Si l'apprenant ne possède pas une motivation suffisante ou que le message qui lui est proposé ne lui apparaît pas suffisamment intelligible, cohérent, convaincant, etc., il ne s'engagera que peu dans le processus d'apprentissage et un changement conceptuel en profondeur sera par conséquent impossible à atteindre.

Discussion

Nous constatons que le modèle de Dole et Sinatra et les recherches portant sur les facteurs motivationnels et contextuels se rattachent principalement à la problématique du changement conceptuel via leur insistance sur l'engagement cognitif : un plus grand engagement implique une plus grande probabilité d'effectuer un changement conceptuel.

Nous sommes évidemment d'accord avec Sinatra lorsqu'elle affirme : « cognitive processes do not occur in a vacuum. » (Sinatra, 2002, p. 188) En effet, une connaissance adéquate des conditions motivationnelles et contextuelles à l'engagement cognitif des apprenants s'avère essentielle à la prescription d'activités d'enseignement efficaces. Mais nous considérons paradoxal le fait que ces recherches tiennent ostensiblement à se placer sous la bannière du changement conceptuel alors qu'aucune d'elles n'aide à répondre à la question de la nature des changements conceptuels, question située à notre avis à la base du programme de recherche.

2.2.3.4 L'aspect social associé au changement conceptuel

Outre les aspects motivationnels et émotifs, quelques auteurs ont tenté d'aborder le changement conceptuel sous l'angle sociocognitif. Dans cette perspective, l'apprentissage conceptuel s'effectue autant au niveau du groupé que de celui de l'individu :

« [F]rom this perspective, concept development is related to the development of practices of group members, as well as the knowledge constructed by the group. That is, as members interact over time, they shape and are shaped by discourses [...], develop situated definitions of what it means to be a scientist, reader, writer, a group member among other roles and relationships [...], and construct local knowledge that becomes common knowledge within the group or class. [...] Viewed in this way, concepts constructed within a group context become a cultural resource for the group as well as a personal resource for individual members. By extension, conceptual change is also a group process, not merely an individual process; and individual changes in concepts must be understood in relationship to the opportunities for concept development made available within and across groups. » (G. J. Kelly & Green, 1998, pp. 147-148)

Comprendre le processus de changement conceptuel, c'est alors comprendre comment le groupe et ses membres se construisent, en les négociant, des concepts, des artefacts, des attentes, des identités, etc. Formulée ainsi, cette approche vient ajouter un volet social à la problématique du changement conceptuel. Mais certains vont soutenir une idée plus radicale : les difficultés d'apprentissage résident essentiellement dans ces aspects sociaux.

« The mastery of concepts of science is the mastery not of some mystical and obscure thought processes, but of certain discursive practices or, in Vygotskian language, certain mediational means that account for the world in specific manners. There is nothing in our minds or brains that is more fundamental than that. » (Säljö, 1999, p. 89)

Mais, à l'instar de ce que nous avons écrit au sujet des facteurs motivationnels et émotionnels, bien que la prise en compte des facteurs situationnels influencent certainement le processus de changement conceptuel, l'étude de celui-ci au niveau des représentations mentales demeure fondamentale :

« Conceptual change can, and most often is, initiated, facilitated by social and cultural processes. [...] Moving in the direction of taking into consideration situational and cultural variables does not necessarily mean the abandonment of the level of mental representation and its replacement with discourse analysis as suggested by some radical situationists (e.g. Säljö, 1999). A theory of conceptual change needs to provide a description of the internal representations and processes that go on during cognitive activity but should also try to relate these internal representations to external, situational variables that influence them. » (Vosniadou et al., 2001, p. 395)

2.2.4 La perspective des conceptions multiples

Nous avons vu que diSessa remettait en question la notion « changement » conceptuel en rejetant l'idée d'un remplacement et en proposant celle d'un développement consistant en une métamorphose cognitive (l'apprentissage de la physique mécanique consiste en la mise en relation adéquate de p-prims préexistantes). Une autre façon de rejeter la thèse du remplacement est d'envisager que la conception initiale puisse être préservée lors de l'apprentissage, de sorte qu'il y a coexistence chez l'élève d'au moins deux conceptions alternatives. C'est ce que nous avons appelé l'approche par conceptions multiples.

Dans la littérature sur le changement conceptuel, ce thème est loin d'être aussi saillant que le sont les différents modèles de changement conceptuel (section 2.2.2) ou les recherches portant sur les facteurs influençant le changement conceptuel (section 2.2.3). Néanmoins, il s'agit d'un volet de recherche récurrent depuis une quinzaine d'années. Puisque le premier objectif de notre projet est de parvenir à proposer un modèle le plus complet possible du phénomène des conceptions multiples, nous prendrons le temps de présenter toutes les contributions que nous avons croisées dans la littérature sur le changement conceptuel susceptibles de l'éclairer. Le lecteur pourra constater au chapitre 3 que plusieurs des idées à la base de notre modèle sont en fait déjà présentes mais éparpillées dans la littérature.

Nous débuterons par la présentation des recherches s'étant spécifiquement penchées sur le phénomène en question, soit celles de Solomon, de Mortimer, puis de Larochelle et Désautels. Nous enchaînerons par la suite par la revue des idées disséminées ici et là dans la littérature sur le changement conceptuel.

2.2.4.1 Les domaines de connaissance de Solomon

Le constat à la base du programme de recherche sur les conceptions et le changement conceptuel est que les conceptions des élèves sont persistantes. Comme nous l'avons mentionné, plusieurs étudiants universitaires ayant pourtant suivi un cours de physique mécanique continuent à ne pas employer les concepts newtoniens dans certaines situations.

Dès le début des années 1980, le chercheur Joan Solomon a proposé l'idée que la persistance des conceptions initiales ne constituait pas un échec de l'enseignement, mais plutôt une nécessité exigeant une redéfinition des objectifs d'apprentissage.

Deux domaines de connaissance

Selon Solomon, pour comprendre cette persistance, il faut d'abord constater que plusieurs conceptions intuitives ont une origine sociale :

« In daily conversation and through the mass media, our children are confronted with implicit assumptions about how things move, their energy and other properties, which can be directly at odds with the scientific explanation that they learn at school. Outside the school laboratory, these adolescents are continually being *socialized* into a whole repertoire of non-scientific explanations. » (Solomon, 1983, p. 49)

Non seulement ces idées ont un grand support social, mais elles s'avèrent nécessaires à la communication efficace en contexte non scientifique, de sorte qu'il n'est pas souhaitable, selon Solomon, de viser leur éradication :

« Such socialized knowledge cannot ever, by its very nature, be extinguished. Whether or not our pupils become successful in science, they must never lose the ability to communicate. It would indeed be a poor return for our science lessons if they could no longer comprehend remarks like 'wool is warm' or 'we are using up all our energy'. What we are asking from our pupils, then, is that they should be able to think and operate in two different *domains of knowledge* and be capable of distinguishing between them. » (Solomon, 1983, p. 50)

L'objectif de l'éducation scientifique est donc redéfini : il s'agit de distinguer les deux domaines de connaissance.⁴⁶

De plus, Solomon rapporte qu'une discrimination entre les deux domaines aide les élèves à employer des connaissances scientifiques introduites, puisqu'ils effectuent alors un choix conscient :

« [W]e can see a strong connection between pupils realizing that the two meanings for the word are *different* and providing a *correct* definition. This suggests that the switch of thinking into the domain of physics may be more than just an automatic cognitive reflex to being in the physics laboratory. The more successful of these middle-ability pupils had become aware of the two different levels of their knowledge, and this may have been responsible, at least in part, for their ability to choose the more appropriate one. » (Solomon, 1984, p. 281)

⁴⁶ Solomon renvoie ici à la distinction faite par le philosophe Schutz (Schutz & Luckmann, 1973) entre la « life-world knowledge » et les « symbolic universes of knowledge ». La première est renforcée par la communication et le langage lui-même, et possède une grande valeur sociale. La deuxième, qui vient s'ajouter à la première par l'éducation, est davantage fragile et possède une valeur sociale plus limitée.

Passage et asymétrie entre les deux domaines de connaissance

Penser à l'aide de deux domaines conceptuellement et socialement différents n'est pas une tâche facile. Tout d'abord, la relation entre les deux domaines n'est pas symétrique :

« [F]rom the everyday perspective, gaps of problems in the symbolic domain can be ignored, whereas experiences in the real world draw our attention back from the symbolic level to the habitual knowledge of the life-world. Thus *ease of movement* between these two domains is not *symmetrical* for the two different directions. » (Solomon, 1983, p. 50)

Les conceptions ordinaires constituent en quelque sorte l'option par défaut des élèves, alors que les conceptions scientifiques requièrent, pour être activées, la détection de signaux (*cues*)⁴⁷ dans les énoncés des questions ou des problèmes. De plus, en l'absence de renforcement à moyen ou long terme, les connaissances scientifiques sont de moins en moins susceptibles d'être sélectionnées.

Ensuite, la circulation délibérée entre les deux domaines n'est pas aisée. Le passage de l'un à l'autre impliquerait une discontinuité dans la pensée semblable à celle vécue à l'occasion d'un réveil (Solomon, 1983, p. 50).⁴⁸ Étant donné ce coût, transiter d'un domaine à l'autre s'avère plus difficile que de n'opérer qu'à l'intérieur d'un seul domaine. Mais il y a, dans cette capacité à migrer d'un domaine à l'autre, la marque d'une compréhension plus profonde :

« The deepest levels of understanding are achieved neither in the abstract heights of 'pure' physics, nor by a struggle to eliminate the inexact structures of social communication, but by fluency and discrimination with which we learn to move between these two contrasting domains of knowledge. » (Solomon, 1983, p. 58)

2.2.4.2 Les jeux de la connaissance de Larochelle et Désautels

Dans la vague d'innovations théoriques qui a alimenté le programme de recherche sur le changement conceptuel au début des années 1990 se trouve l'approche par « jeux de la connaissance » de Marie Larochelle et Jacques Désautels (1992). Tout comme Solomon, ces chercheurs rejettent l'idée d'un changement conceptuel conçu comme remplacement des conceptions initiales. Ces dernières possèdent et conservent leur contexte de validité :

⁴⁷ Dans le domaine musical, le terme « *cue* » est traduit par « signal d'entrée ».

⁴⁸ Ainsi décrite, cette transition aurait des affinités avec l'idée de changement de gestalt telle que reprise par Kuhn à propos des révolutions scientifiques.

« 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 des diverses conceptions. » (p. 42)

L'importance des présuppositions épistémologiques

Dans leur analyse, Laroche et Désautels accordent une longue réflexion au modèle de Posner et al., auxquels ils reprochent entre autres d'avoir été « très peu loquaces sur les articulations des niveaux d'organisation » au sein de l'écologie conceptuelle de l'apprenant (p. 55) :

« Ainsi, les analogies et les métaphores, dont on peut faire usage pour se rendre intelligible un savoir ou pour explorer une nouvelle situation, font partie du même niveau d'organisation que les notions et concepts que l'on a construits. Mais les uns et les autres ne prennent sens que par l'intermédiaire d'un autre niveau d'organisation, soit celui de leurs significations épistémologiques. [...] On pourrait penser que les engagements épistémologiques et métaphysiques jouent le rôle de commande par rapport au sous-système constitué par la structure conceptuelle. » (p. 56)

Ces chercheurs proposent donc de donner un relief à l'écologie conceptuelle : les engagements épistémologiques et métaphysiques chapeauteraient les conceptions et les éléments de l'écologie conceptuelle qui leur donnent sens et les supportent. Dans cette perspective, la préservation des conceptions initiales dans le processus de changement conceptuel peut être comprise comme requérant une discrimination entre deux ensembles d'engagements épistémologiques et métaphysiques : ceux aux commandes des conceptions de la vie quotidienne et ceux derrière les conceptions scientifiques.

Or, il est déplorable que ce soit « toujours la promotion des conceptions scientifiques qui prime au détriment de celles que se sont construites les apprenants. » (p. 61). Selon ces auteurs, cette oppression prendrait source au niveau des engagements épistémologiques et métaphysiques :

« De notre point de vue, ces problèmes [i.e. les problèmes du modèle de Posner al. et d'autres approches antérieures] résident essentiellement dans le fait que le seul statut épistémologique accordé aux apprenants est celui de reproducteur des explications trouvées par les autres. Cela conduit notamment à envisager le contenu de leurs conceptions [...] non pas à partir des critères de crédibilité et de viabilité qui les fondent, mais bien selon les critères de validité et de compréhension théorique utilisés dans les disciplines dont on fait la promotion.

Pourtant, si l'on met en suspens un tant soit peu la valorisation induite dont font l'objet les conceptions scientifiques, on peut se demander en quoi leur inculcation peut légitimement prétendre à modifier les conceptions des apprenants, puisque les unes et les autres relèvent de croyances et de postulats différents et ne poursuivent pas les mêmes finalités. » (p. 62)

Les jeux de la connaissance

Un ensemble particulier d'engagements épistémologiques et métaphysiques forment pour Larochelle et Désautels l'essence d'un jeu de la connaissance, qui définit en quelque sorte les règles de production et d'évaluation des conceptions qu'elles chapeautent.

« Éduquer à la science dans une perspective constructiviste signifie pour nous faciliter l'accès à l'un des nombreux « jeux de la connaissance » qui constituent le patrimoine culturel de l'humanité. On peut ainsi distinguer le jeu de la connaissance ordinaire ou commune du jeu de la connaissance religieuse, ou encore de ceux de la connaissance magique, littéraire, philosophique, historique, scientifique, etc. Chacun de ces jeux, à une époque donnée, a un domaine de légitimité circonscrit par les postulats et les règles qui permettent d'y jouer. Par exemple, comme l'a illustré Merchant (1983), il a été nécessaire pour établir le jeu du savoir scientifique moderne de supposer qu'aucune intention n'était à l'oeuvre dans l'univers et d'institutionnaliser le recours systématique à l'expérimentation et à la mathématisation comme règles du jeu.

[Un jeu de la connaissance est] un jeu très sérieux, qui comporte tout de même un caractère ludique, notamment par sa non-prétention explicite à la vérité et à la divulgation de la réalité. À l'instar de tout jeu, il ne prend sa valeur qu'à l'intérieur d'un domaine de légitimité défini par les postulats qui le fondent et les règles à observer pour le jouer. Autrement dit, c'est n'admettre aucune hiérarchie de valeur dans l'ordre de la connaissance, aucune possibilité d'un méta-jeu qui serait le jeu des jeux. » (p. 64)

Les deux jeux de la connaissance qui intéressent Larochelle et Désautels sont évidemment le jeu de la connaissance commune et celui de la connaissance scientifique. L'enseignement de la science doit permettre aux étudiants de s'initier à l'existence d'une multiplicité de jeux de la connaissance,

« Car, somme toute, le problème ne réside ni dans les conceptions antérieures des apprenants ni dans celles qu'on leur propose lors d'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 interchangeables [...]. » (p. 72)

Afin de favoriser l'initiation aux jeux de la connaissance, Larochelle et Désautels avancent la stratégie du dérangement épistémologique, « qui consiste essentiellement à promouvoir une réflexion critique sur les postulats et les finalités qui orientent toute production de connaissance, dont celle du savoir scientifique. » (p. 77) L'étudiant doit réaliser qu'il est en train d'apprendre un autre jeu de la connaissance (celui de la connaissance scientifique), répondant à des finalités spécifiques, et qui n'a pas de ce fait à être considéré comme étant en compétition avec le jeu de la connaissance commune.

« Cet accès aux jeux de la connaissance requiert, comme nous l'avons montré, que les étudiants prennent conscience du statut épistémologique de leurs propres connaissances et reconnaissent l'intérêt et la possibilité des autres jeux de la connaissance. Dans cette optique,

il est donc nécessaire qu'ils remettent en question leurs représentations de la production des connaissances en vue de les dépasser, et ce, grâce au développement d'une capacité à réfléchir et d'interroger, de manière critique, les postulats qui supportent leurs stratégies de construction de connaissance et celles des autres. En somme, il s'agit d'une forme de complexification conceptuelle ayant pour thème la nature et la production des connaissances [...]. » (p. 211)⁴⁹

Le relativisme des jeux de la connaissance

Le modèle de Larochelle et Désautels peut être vu comme un des éléments importants d'une argumentation épistémologique plus vaste, où est tentée une modification en profondeur des rapports aux savoirs des étudiants. L'objectif est de redonner aux citoyens (donc les étudiants actuels) leur droit de parole sur toute question d'ordre scientifique ou technologique affectant la société dans laquelle ils vivent et qu'ils contribuent à former, droit dont ils seraient présentement indûment privés du fait de la domination de la communauté scientifique.

« C'est bien là que l'on se rend compte que l'on ne peut dissocier l'épistémologie et la politique. Tant et aussi longtemps que le caractère arbitraire de la hiérarchie sociale des savoirs, au sommet de laquelle trônent les technosciences et les mathématiques, n'est pas apparent aux yeux de la plupart des citoyens et des citoyennes, les experts et les expertes peuvent dormir en paix car leur pouvoir ne sera pas contesté. » (Désautels, 2001, pp. 7-8)

Améliorer le rapport aux savoirs des étudiants est une visée certainement louable, mais le prix que Désautels propose de payer est élevé : la reconnaissance de la valeur *arbitraire* accordée à la science, i.e. l'adoption d'une position relativiste forte. Ce caractère arbitraire vient, selon les auteurs, de l'impossibilité d'avoir un métajeu légitime qui, de haut, viendrait ordonner les jeux entre eux.⁵⁰ Si le jeu de la

⁴⁹ Bien que Larochelle et Désautels n'y fassent pas référence dans leur ouvrage, leur approche et leur visée sont consonantes avec celles avancées par Garrison et Bentley (1990). En reprenant la notion de conception du monde (*Weltbider*) de Wittgenstein, ces auteurs affirment :

« We believe that the original acquisition of science greatly resembles the acquisition of a *second* world-picture. Learning to live in such a world can never be an entirely rational process. This is because coming to occupy a *Weltbider*, in part, *is* learning what counts as valid reasoning and sound evidence in that language game. [...] To some degree science can only be acquired by conversion. » (p. 30-31)

« Each discipline provides a distinct set of concepts, criteria or rationality, dispositions, interests, values etc., each different from those of everyday life, that allows us to organize and structure experience in unique ways. The disciplined mind is simply able to avail itself of experiences that are unavailable to be undisciplined mind, wherein lies liberal education's ability to free the mind from the tyranny of indoctrination and one world. » (p. 32)

⁵⁰ L'illégitimité d'un métajeu, telle que défendue par Larochelle et Désautels, n'implique pas l'illégitimité d'un métadiscours, c'est-à-dire d'énoncés ayant pour objets les jeux eux-mêmes, l'argumentation de ces auteurs à l'endroit des jeux de la connaissance constituant lui-même un métadiscours. Larochelle et

connaissance scientifique vient à être dominant, ce ne peut être sur une base épistémologique, mais pour des raisons sociopolitiques.⁵¹

Étant donné l'importance du modèle de Larochelle et Désautels pour l'étude du phénomène des conceptions multiples (à notre avis, il constitue la contribution la plus détaillée) et sa position clairement relativiste (étonnante pour des didacticiens des sciences), nous en présenterons une critique détaillée à la section 3.1.2 lorsque nous l'opposerons à notre propre approche. Pour l'instant, poursuivons notre revue de la littérature sur les conceptions multiples.

2.2.4.3 Les profils conceptuels de Mortimer

Une troisième modélisation a été proposée par Eduardo Mortimer (1995). À l'instar de Solomon, de Larochelle et Désautels, de même que de plusieurs autres contributeurs, Mortimer juge irréaliste l'idée du changement conceptuel comme suppression, idée souvent implicite dans les recherches.

« [T]o suppress the alternative conceptions sometimes means suppressing common-sense thought and its mode of expression, everyday language, which is the most comprehensive way of sharing meaning in a culture and permits communication between all the various specialised groups that share the same mother tongue. To suppress it means suppressing the possibility of different groups sharing meaning with the same culture. » (Mortimer, 1995, p. 276)

Selon Mortimer, l'apprentissage entraîne non pas un remplacement de conception, mais plutôt la formation d'un profil conceptuel composé de plusieurs conceptions. Ce modèle prend source dans la notion de profil épistémologique proposée par Bachelard.

Désautels reconnaissent que les jeux peuvent être comparés de manière descriptive, mais rejettent l'idée que leur valeur soit ordonnée (Larochelle & Désautels, 1992, pp. 67-68n).

⁵¹ Une telle affirmation peut surprendre lorsque prononcée de la part de didacticiens des sciences. En effet, puisque le jeu de la connaissance scientifique n'est pas plus important que n'importe quel autre jeu de la connaissance aussi excentrique soit-il, pourquoi alors y accorder une si grande place à l'école ? Et pourquoi y accorder une place tout court ? Le seul argument alors disponible pour prévenir une sous-représentation de l'éducation scientifique, voire son éradication complète, semble être l'affirmation que cette formation est nécessaire aux futurs citoyens afin de les outiller pour la remise en question de cette hiérarchie sociale arbitraire des savoirs dont ils sont autrement voués à être les victimes. Des objectifs d'éducation favorisant l'esprit critique sans toutefois être relativistes nous apparaissent cependant être plus prometteurs (voir par exemple Siegel, 1988, 2001).

Des profils épistémologiques aux profils conceptuels

Pour Bachelard, toute notion scientifique est complexe, au sens où elle se disperse sur plusieurs niveaux, chacun défini par une approche épistémologique. Pour le concept de masse, Bachelard (1940/2002) distingue cinq niveaux qui se sont historiquement succédés :

- Le niveau réaliste naïf, où la masse est conçue comme une « appréciation quantitative grossière » et elle est en conséquence fortement influencée par la grosseur perçue d'un objet (un objet très petit n'aura pas de masse);
- Le niveau empiriste, où la masse correspond à la quantité mesurée par une balance;
- Le niveau rationaliste classique, où la masse, dans la théorie newtonienne, se trouve définie par (et contribue à définir en retour) les notions de force et d'accélération;
- Le niveau rationaliste complet, où la masse cesse d'être une notion atomique, pour acquérir une structure interne (elle devient fonction de la vitesse);
- Le niveau rationaliste discursif, où la notion de masse devient dialectisée par la notion d'antimatière.

Si on construit un schéma où est tracée en ordonnée la fréquence approximative d'utilisation de chacun de ces niveaux chez une personne, on obtient le profil épistémologique de celle-ci (figure 10).

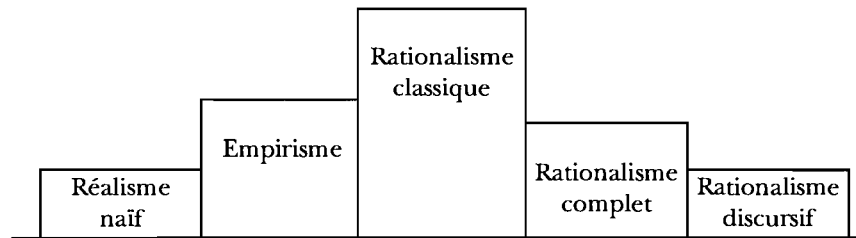


Figure 10. Le profil épistémologique personnel de Bachelard pour la notion de masse (Bachelard, 1940/2002, p. 43).

Mortimer reprend cette idée en lui apportant deux modifications. Il y ajoute tout d'abord une distinction : pour un concept, chaque tranche de profil est différente des autres non seulement par son aspect épistémologique, mais aussi ontologique. Ensuite, il considère que les portions non scientifiques des profils conceptuels sont contraintes non pas par des traditions philosophiques, mais par les engagements ontologiques et épistémologiques des individus, engagements fortement influencés par la culture.

Mortimer propose en exemple de distinguer entre les diverses zones du profil du concept d'atome chez les élèves, et ce à l'aide d'une grille d'analyse formée des catégories suivantes : continuité, substantialisme et conservation de la masse.

La première zone du profil conceptuel de l'atome est celle qu'il appelle réaliste :

« The first zone of the atomic profile is a realistic one, is characterised by the absence of any discontinuous notion of matter. This zone is characterised by a negation of atomism and its main obstacle is of the negation of the possibility of the existence of a vacuum. [...] Related to this concept of matter, there is a realistic notion of the physical states of matter closely linked with external appearances and sensible features of materials. » (Mortimer, 1995, p. 277)

La seconde zone du profil est celle de l'atomisme substantialiste :

« Substantialism is a relevant feature because it leads to the conclusion that despite using particles in their representations, the students think of such particles as matter grains that can dilate, contract, change state and so forth. Students, this, made an analogy between the behaviour of the drawn particles and that of the substances. They are not referring to the atom, as a scientific concept, but to grains of matter that show macroscopic properties. This analogy between the macroscopic and the microscopic worlds is the main epistemological obstacle for students whose concepts can be classified in this zone. » (Mortimer, 1995, pp. 277-278)

Vient ensuite la zone correspondant à la notion classique de l'atome, qui est alors conçu comme l'unité de base de la matière, unité obéissant aux lois mécaniques et qui est conservée lors des transformations chimiques. L'analogie entre l'état macroscopique et microscopique est également rejetée :

« The third zone of the profile of the physical states of matter is supported by a generalisation that is not an external characteristic of materials but has to be constructed as an explanatory model. [...] This transition from external features, linked to strong sensible aspects, to internal features, linked to imaginary models, is a great epistemological obstacle to be overcome when teaching. » (Mortimer, 1995, p. 279)

Selon Mortimer, les différences entre ces trois zones du profil conceptuel de l'atome sont d'ordre épistémologique, et non ontologique : toutes trois considèrent l'atome (ou son pendant) comme une unité de matière, qui appartient à une même catégorie ontologique, celle de substance. Ce n'est qu'avec le développement de la zone quantique du profil qu'un changement ontologique doit être opéré : l'atome cesse d'être une pure particule matérielle pour acquérir des aspects ondulatoires.

La formation d'un profil conceptuel

L'ajout de zones dans un profil conceptuel se fait en deux moments selon Mortimer. Tout d'abord, il doit y avoir acquisition de la nouvelle portion du profil, ce

qui nécessite le dépassement des obstacles épistémologiques et ontologiques propres aux niveaux précédents. Cette étape n'a rien de trivial, mais Mortimer insiste moins sur celle-ci que sur la suivante :

« The second important moment in the learning process is that of the pupil achieving consciousness of his/her own profile, which allows the comparison between different areas of the profile as well as an evaluation of their relative power. In this process, the students will be conscious of the limitations of their alternative conceptions but without giving them up. The same process will happen at a more advanced level, when students have to restrict the domain of an old scientific concept as they learn and become aware of a new level of its profile. This is what happens, for example, when they learn a quantum mechanical view of matter and can see the limitations of a classical atomic view. The process of achieving consciousness of one's own conceptual profile is not an easy task in the learning process. It involves some kind of abstraction in which the mind reflect on itself. » (Mortimer, 1995, pp. 274-275)

Au coeur de cette prise de conscience du profil conceptuel réside la capacité à discriminer les contextes de validité des différentes portions du profil de même que les relations existant entre elles :

« In this process the students should acquire consciousness not only of the new scientific concept but also of the relationships between the different levels of their conceptual profile, and when it is more convenient to use one or another of the levels. » (Mortimer, 1995, p. 275)

« The students who emerge from the teaching process would retain all the ideas that they had before. Nevertheless, I expect that those who have changed their profile and achieved consciousness of this process would be able to recognise different domains of each idea as well as their hierarchical framework, where some ideas explain others. » (Mortimer, 1995, p. 282)

2.2.4.4 L'idée de conceptions multiples dans la littérature

La remise en question de la notion de changement conceptuel comme remplacement ne s'est évidemment pas limitée à ces trois modèles, mais ceux-ci constituent certainement les contributions les plus systématiques sur ce thème. Puisque ce dernier est au coeur de nos préoccupations, nous prendrons ici le temps de retracer les diverses remarques dispersées dans la littérature, qui, dans leur ensemble, y apportent un certain nombre d'idées supplémentaires.

Vers l'idée de conceptions multiples

Dès le début du programme de recherche sur le changement conceptuel, on a constaté que les stratégies d'enseignement n'entraînaient pas toujours un remplacement, ceci étant alors conçu comme un échec partiel du processus d'apprentissage :

« It is possible for the student to basically reject the teacher's science as something that can be accepted in terms of how to view the world, but to consider it as something that must be learned, e.g., for examination purposes. The student, therefore, has two views, but the learned science viewpoint is not one that has been adopted for use outside the formal learning situation. » (J. K. Gilbert, Osborne, & Fensham, 1982, p. 629)

Dans son article publié une décennie plus tard, Villani émet davantage de réserves sur l'idée de remplacement. Il réfère à cette éventualité par l'expression « changement conceptuel au sens strict »; « changement conceptuel au sens large » renvoyant aux cas où il y a coprésence de la conception antérieure et de la nouvelle. Villani suggère que l'objectif d'un changement conceptuel au sens strict n'est viable que pour le niveau postsecondaire.

« For the primary and secondary school levels, [conceptual change lato sensu] seems to be an adequate explicit objective (Grimellini et al., 1989, 1990); the teacher must concentrate his efforts on creating activities and proposing tasks sufficiently interesting to stimulate the students' progressive intellectual involvement, without an excessive preoccupation with the students' dropping of all the spontaneous ways of thinking. During the "pursuit" phase, the aim is not to abandon spontaneous reasoning, but to "pursue" the scientific one. » (Villani, 1992, p. 234)

Ici, le non-remplacement est perçu comme un mal nécessaire et temporaire, le remplacement demeurant l'objectif ultime du processus éducatif. Quelques années plus tard, Duit ira plus loin en reconnaissant que l'idée de remplacement n'obtient somme toute aucun support empirique de la part des recherches :

« In fact, it has to be stated that there is no single study listed in the leading bibliographies of research on students' conceptions (Carmichael et al., 1990; Pfundt & Duit, 1994) in which a particular student's conception of the above deep-rooted kind could be completely extinguished and then replaced by a new idea. Most studies show that the old ideas basically stay "alive" in particular contexts and that there is only quite limited success concerning the acceptance of the new ideas. [...] Grandy (1990) provided the following metaphor. Learning, as conceptual change, is not like rearranging the furniture in one's room (wiping out the previous configuration), but like opening up a new room in which one feels uncomfortable and out of place. A return to the familiarity of the old room is likely. » (Duit, 1999, p. 270)

Dans cette métaphore intéressante, si les meubles représentent les concepts, les pièces représentent quant à elles les contextes d'utilisation. Dans cette perspective, la distinction des contextes devient essentielle à un changement conceptuel sans remplacement. Cette formulation se retrouve sous la plume de plusieurs auteurs :

« The educational problem brought to the fore by the alternative conceptions literature is not, I argue, that students have alternative conceptions or strong highly resistant to change preconceptions: The problem is that many students do not develop new meaningful relationships with the new contexts that they are introduced to within the educational environment. [...] [W]hat would, then, seem to be important is the ability to recognize a context and, in terms of this recognition, evoke an *appropriate* conception. So, instead of

depicting meaningful learning in terms of conceptual *change* we should consider depicting it in terms of conceptual *appreciation* – an appreciation that is *delimited by context*. » (Linder, 1993, p. 295)

« Many so-called naive concepts and problem solution strategies are very helpful in almost all situations of daily life. Scientific reasoning is not in the position to replace commonsense thinking. Both types do complement each other. The student has to learn to discriminate in which situations which concepts and problem solution strategies are adequate. As a consequence a new instructional goal could be formulated, the goal to promote multiple mental representations. The student should learn to see the limitations of each representation and to use them successfully in the appropriate contexts. » (Spada, 1994, p. 115)

Mais la notion de contexte est généralement employée de manière vague, sans explicitation. Claxton suggère qu'un contexte (ou une « circonstance ») est caractérisé d'une part par la nature de la situation physique telle que perçue par l'élève, et d'autre part par les objectifs perçus par ce dernier.

« We need now to be a little more precise about what we mean by 'circumstances'. Obviously we are referring to the perceptual features of the current situation: but we need to include the perceived *demand characteristics* of the situation as well. » (Claxton, 1993, p. 49)

À la notion d'objectif, certains préfèrent celle de tâche, mais l'idée est sensiblement la même :

« [P]our la tâche qu'ils avaient à accomplir, les étudiants ont activé certaines de leurs conceptions, en fonction de la tâche à accomplir. En d'autres termes, ils ont extrait de leur mémoire permanente et ont mis en mémoire de travail les conceptions conjoncturelles suffisantes pour accomplir la tâche. Cette émergence différentielle de concepts dépend à la fois de la tâche à accomplir et de l'état des conceptions de l'étudiant. » (Clément, 1994, p. 26)

Ainsi, l'apprentissage doit inclure une différenciation des contextes d'utilisation. Mais ce processus n'est pas direct, les frontières entre les contextes d'utilisation de chaque conception devant être négociées :

« It is *our* misconception if we assume, from one or two 'wrong' answers, that a student 'holds' an alternative theory that is in 'conflict' with the received theory of textbook science, which is resolved with one 'wins' and the other 'loses'. It is at least a start towards a more sensitive and accurate interpretation of the situation if we construe it more as the amicable negotiation of the appropriate limits or boundaries of both theories, each of which has an as yet ill-specified domain of situations and tasks to which it is legitimately and successfully applied. » (Claxton, 1993, p. 60)

Aussi, il ne faudrait pas penser que les contextes sont préexistants et explicites chez les élèves. Comme le souligne Halldén à propos de l'apprentissage des modèles de la Terre, cette situation se construit progressivement :

« This differentiation between contexts seems to be a gradual process. In the first instance it appears as a vague and uncertain use of different contextualizations, [... which] may result eventually in a contextual awareness. » (Halldén et al., 2002, p. 146)

Les conceptions multiples, à l'intérieur de la science

L'idée de conceptions multiples ne se limite pas à celle d'un doublet de conceptions, l'une pour la vie quotidienne et l'autre pour les cours de sciences. À l'intérieur même d'un domaine scientifique, plus d'une conception peuvent s'avérer utiles pour traiter une situation.

Par exemple, Keith Taber (2000) a étudié sur une longue période les conceptions d'un étudiant de niveau collégial à propos de la notion de lien chimique. Selon lui, l'étudiant possède plusieurs conceptions valides, dont une en termes de couche, une autre en termes de niveaux d'énergie, et une troisième basée sur l'attraction entre particules chargées électriquement. Ces conceptions ne possèdent pas des domaines d'applicabilité clairement exclusifs : plus d'une peut être employée pour expliquer une même situation. Ainsi, l'apprentissage de la chimie peut être vu, selon Taber, comme l'acquisition d'une boîte à outils conceptuelle dont il s'agit d'optimiser l'utilisation :

« Where alternative conceptions are considered to naturally coexist as part of a mental toolkit, then it is possible to study conceptual development in terms of the changing extent to which the alternatives are selected over time as the learner develops both the conceptual frameworks themselves, and judgments about the context in which they are best applied. »
(K.S. Taber, 2000, p. 414)

De manière similaire, Richard Treagust et ses collègues ont étudié de manière longitudinale les modèles⁵² de l'atome employés par des étudiants de différents niveaux. Dans une première étude, Harrison et Treagust (2000) ont constaté qu'après une demi-année scolaire, leur sujet de niveau secondaire 5 possédait trois modèles : un premier basé sur des orbitales, un autre en termes de nuages d'électrons, et un dernier iconique (par exemple, l'oxygène est représenté par ${}^{16}_8\text{O}$). À la fin de l'année, le même élève possédait en tout six modèles. Selon ces deux chercheurs, chaque modèle répond à des objectifs particuliers, et son statut (au sens de Posner et al.) dépend par conséquent du contexte. L'ensemble des modèles semble former une unité cognitive plus englobante, qui peut alors être considérée comme fertile par l'élève si elle lui permet, en tant que tout, de résoudre et expliquer

⁵² Nous suivons ici la terminologie employée par ces chercheurs au lieu d'imposer le terme « conception ».

les problèmes rencontrés. Pour être possible, cet apprentissage d'une multiplicité de modèles requerrait un certain développement épistémologique :

« Alex demonstrated an ability to choose from the range of available models, the one that best solved the problem at hand, and he was not troubled by the apparent contradictions that existed within and between models. In this sense, it is proposed that Alex had undergone an epistemological change that enabled him to see scientists' knowledge as "best-fit descriptions," rather than as positivist right/wrong dichotomies. » (Harrison & Treagust, 2000, p. 375)

Dans une étude subséquente sur le même thème auprès d'étudiants appartenant à différents niveaux de formation, Coll et Treagust (2003) constatent que malgré l'acquisition d'une gamme de modèles chimiques de l'atome par les étudiants, les modèles préférés de ces derniers ne sont pas les conceptualisations auxquelles ils ont été exposés durant leur formation (ceci étant particulièrement flagrant pour les étudiants universitaires, niveaux baccalauréat et supérieur). Les chercheurs proposent l'hypothèse que les étudiants saisissent mal les différences de statuts entre les modèles :

« So, for example, when learners are taught a new mental model for metallic bonding (such as the band theory), they are told it is a more powerful model, with more explanatory power – more "sophisticated" or "better" model. However, unless students are given compelling evidence that this is the case, they may not supplant the "old," "simple" model with the new more complete model. Thus, the learners, rather than "dropping" the old model, retain both models and use whichever model seems appropriate or adequate for the task at hand (and also draw on other concepts, as needs dictate). » (Coll & Treagust, 2003, p. 703)

Coll et Treagust proposent également l'hypothèse d'une retraite vers des positions plus « sécuritaires » dans les situations comportant un stress particulier, comme les examens ou encore les entrevues de recherche.

Vers une « théorie du contexte »

La notion de contexte, fortement liée à celle de tâche, est omniprésente dans les discussions sur les conceptions multiples : discriminer entre les contextes est une capacité qu'il est primordial d'acquérir. Mais quelle est la nature de la structure cognitive responsable de cette discrimination ? La littérature n'est pas explicite à ce niveau. Nous avons besoin, comme le souligne Richard White, d'une théorie du contexte.

« We came to realise that people can hold in their heads both the scientific explanation and an alternative belief. While I believe whole-heartedly in Newton's laws of motion, when pushing a barrow or pedaling a bicycle any thoughts that I have are essentially Aristotelian. I

suggest that along with a theory of content we need a theory of context, which consists of propositions that predict which sorts of belief will emerge in which context. » (White, 2005)

White propose ici l'existence de propositions qui, sensibles aux contextes, permettraient de sélectionner une conception plutôt qu'une autre. Cette idée a cependant été proposée quelques années plus tôt par David Palmer, dans sa recherche sur la notion de rôle biologique chez les élèves de niveaux primaire et secondaire. Lors d'entrevues, Palmer a posé des questions écrites aux élèves afin de leur faire exprimer une conception du rôle biologique joué par un animal. Palmer leur a demandé par la suite de justifier oralement leur réponse. Ceci lui a permis d'identifier l'emploi par les élèves d'une proposition « personnelle » de forme conditionnelle (« si ... alors ») pour décider quelle conception employer parmi celles disponibles dans leur « carquois ».

« The significance of the personal proposition is that it is the plan that the student uses to decide which conception is the appropriate one to use in any situation or context. [...] It could therefore be envisaged as being a higher order structure that either of these conceptions. [...] it refers to a structure that allows students to cover a broader range of contexts by selecting from a “quiver” of both scientifically acceptable and alternative conceptions. » (D. H. Palmer, 1999, p. 649)

De plus, l'existence d'une telle proposition métaconceptuelle permet d'expliquer la présence des inconsistances apparentes des élèves (i.e. l'utilisation de diverses conceptions à travers les contextes). Cette proposition jouerait ainsi un rôle clé dans le changement conceptuel, et les stratégies d'enseignement devraient y accorder une plus grande importance :

« [T]he personal proposition represents a “higher” structure in the students' minds, because it is the plan that the student uses to decide whether to apply the alternative conception or the scientifically acceptable conception. It is therefore possible that conceptual change strategies may be more successful if they are targeted at the personal proposition level of the students' understanding [...]. » (D. H. Palmer, 1999, p. 651)

Les recherches sur les représentations multiples

L'idée de conceptions multiples peut être vue d'une perspective autre que celle du changement conceptuel. Certains chercheurs en font le thème particulier d'une problématique générale : l'emploi de plusieurs représentations pour interagir avec le monde :

« Almost all forms of learning involve information that is represented in different forms. Human teachers use a range of different representation techniques to present information to students. Besides texts, teachers use diagrams, abstract mathematical models and semi-abstract stimulations [...]. Although some tasks can be performed using a single

representation, many tasks require the combined use of knowledge in different forms, or can be performed much more efficiently by the integrated use of multiple representations than by a single representation. [...] Our experience in interacting with the world in which we live, including our interaction with other people, shows an immense variety of representational forms. How do people deal with this variety? How are they able to combine information from many sources and in many representations into one integrated knowledge structure? » (van Someren, Boshuizen, De Jong, & Reimann, 1998, p. 1)

Dans cette optique, le développement d'une expertise dans un domaine scientifique requiert la possession de multiples représentations, leur coordination, de même que la capacité sélectionner la représentation la plus appropriée pour la tâche considérée (de Jong et al., 1998).

Bien que ce secteur de recherche se soit essentiellement intéressé aux multiples représentations que peut prendre une même information (texte, diagramme, équation, etc.), certains vont prôner une approche plus générale. Rohr et Reimann (1998) suggèrent de distinguer l'aspect ontologique (ou conceptuel) d'une représentation de ses aspects computationnels. Puisque deux représentations ontologiquement différentes ne convoient pas la même information sur le monde, cette suggestion vient élargir la portée de ce secteur de recherche en direction de celui du changement conceptuel, et plus particulièrement de la perspective des conceptions multiples. En retour, Rohr et Reimann sont amenés à constater que dans la littérature sur le changement conceptuel, les aspects computationnels ne sont pas étudiés :

« We consider it a weakness of most current research on conceptual change that the only kind of analysis performed is with respect to differences in concepts' content (their ontology), but not their cognitive-computational demands. » (Rohr & Reimann, 1998, p. 44)

Selon ces auteurs, ces aspects sont importants puisqu'ils affectent, entre autres, le choix d'une représentation (conception) sur une autre :

« The "decision" when to use which representation, given that more than one is available, is probably based on cost-effect considerations: *ceteris paribus* that representation will be used which imposes the least demands on cognitive resources, in particular on working memory. » (p. 42)

Ainsi, le choix d'une conception plutôt que sa ou ses concurrentes ne dépendrait pas que de la situation physique et de la tâche à accomplir, mais aussi du coût cognitif relié à l'emploi de conception. Un tel principe du moindre effort impliquerait que le choix d'une conception résulterait moins de l'emploi d'une connaissance conditionnelle (comme la proposition « si ... alors » de Palmer) qui délimiterait les

contextes de validité des conceptions alternatives, que de la rencontre d'une conception qui *suffirait* à accomplir la tâche.

Au-delà de la différenciation, l'intégration

Juan Ignacio Pozo et ses collaborateurs ont récemment contribué de manière intéressante à la perspective des conceptions multiples (Pozo, Gómez, & Sanz, 1999). Ces chercheurs ont pris comme objet d'étude l'emploi de conceptions microscopiques (scientifiques) versus macroscopiques (de la vie courante, autrement dit spontanées) à l'occasion de différentes tâches (contextes) chez des sujets appartenant à différents niveaux de formation. Pour chacun des phénomènes sélectionnés, ils leur ont soumis, par écrit, trois types de tâche :

- L'explication libre du phénomène, sans que l'énoncé emploie le jargon scientifique ou fasse référence au niveau macroscopique;
- Une question à choix de réponse, où la question employait le jargon scientifique et où les réponses proposées étaient de nature descriptive (deux réponses macroscopiques, deux microscopiques; deux vraies, deux fausses);
- Même tâche, avec des réponses de nature explicative.

Des résultats obtenus, les chercheurs tirent deux conclusions. La première est la mise en évidence de l'influence du contexte dans le choix de la conception employée : pour la tâche d'explication libre les conceptions spontanément employées (bonnes ou erronées) sont surtout de type macroscopique, alors que les questions employant le jargon scientifique reçoivent davantage de réponses de type microscopique. Ainsi, le jargon scientifique pourrait servir de signal (*cue*) pour l'activation des conceptions scientifiques.

La deuxième conclusion a trait au lien entre l'âge et le degré d'expertise d'une part, et le type de réponse obtenue d'autre part. Pozo et ses collègues remarquent que les jeunes novices (âgés de 12 à 15 ans) produisent surtout des réponses macroscopiques, alors que les novices plus vieux (étudiants en psychologie) et les étudiants experts (étudiants en chimie à la fin de leur baccalauréat) utilisent les deux. Mais au sein des étudiants plus vieux, une différence apparaît dans l'usage : les novices peuvent utiliser l'explication microscopique pour la tâche descriptive, mais retournent significativement à une représentation macroscopique pour la tâche explicative, alors que les experts utilisent davantage d'explications microscopiques

pour les tâches explicatives. Pour ces chercheurs, ces résultats montrent que l'emploi des conceptions microscopiques à des fins explicatives (et non juste descriptives) constitue une étape majeure dans le processus d'apprentissage :

« Although different groups do not differ in what kind of representation they have, they do differ in when they use them and, consequently, in the function and meaning that they attribute to each representation. [...] We consider this change in the cognitive function of microscopic representations – from descriptive to explanatory – to be a core objective of conceptual change in chemistry. Learning chemistry may not so much require the replacement of previous representations, but rather a change in their cognitive function, integrating them into new theories or conceptual models, which would provide the old representations with a different, more theoretical, meaning. » (Pozo et al., 1999, pp. 171-172)

Autrement dit, l'utilisation d'une conception microscopique dans l'explication d'un phénomène observable signifie que la conception macroscopique spontanée est maintenant déduite de l'explication microscopique scientifique. En d'autres termes, les conceptions scientifique et spontanée sont alors intégrées à l'intérieur d'une structure explicative complexe et hiérarchisée :

« Scientific and common sense theories are in some aspects compatible but are very often deeply incompatible in terms of the ontological, epistemological, and conceptual constraints within which they are built. This incompatibility must not be overcome by the replacement of old theories but rather by their differentiation and integration, as lower levels of analysis, in richer, more organized and explicit scientific theories based on more complex conceptual structures. [...] To really understand scientific theories, students not only need to multiply and differentiate contextually their representations – we assume that they must also metacognitively integrate different hierarchical levels of knowledge (Vosniadou, 1994). [...] In the same way, one can assume from the results of these studies that to learn chemistry, understanding the particulate theory of matter does not oblige one to give up the commonsense representation of matter as macroscopic, continuous, and mainly static but rather to be able, when task demands require it, to redescribe these molar representations in terms of systems of dynamic interactions between particles. For this hierarchical integration to be achieved, the simpler agent-object conceptual structures of everyday knowledge should be embedded in more complex structures of schemes based on interactions and systemic equilibrium (e.g., Chi, 1992; Chi & Roscoe, 2002). When one is searching for a “warm sweater” for the winter, one is using a simpler, agent-object causal representation instead of conceiving heat as a problem of energy interchange in search of thermic equilibrium, as it can be redescribed [...]. » (Pozo & Gómez-Crespo, 2005, p. 381)

L'idée d'intégration a été proposée de manière indépendante par Wiser et Amin à propos de l'apprentissage du concept de chaleur chez des élèves de secondaire 2. Ces chercheurs ont développé une stratégie d'enseignement efficace basée sur l'intégration des conceptions scientifique et spontanée :

« [B]y explaining hotness in terms of science heat, the students' initial conceptualization and the scientific theory were integrated into one explanatory framework. Science heat became compatible with everyday heat (as there is no incompatibility between the earth spinning and a fixed sun, and the sun appearing to move across the sky), and by being

incompatible, more easily differentiated from it. Thus, our answer to the coexistence vs. replacement question is “neither” and “both.” “Neither” because the everyday view continues to exist but in a different ontological incarnation (based on percepts rather than physical entities). “Both” because two conceptualizations coexist, but form an integrated whole which can be viewed as replacing the initial everyday view. » (Wiser & Amin, 2001, pp. 351-352)

Le cas de l'apprentissage de la mécanique quantique

Même si ce secteur est généralement coupé des recherches sur le changement conceptuel, quelques travaux en didactique de la mécanique quantique ont touché plusieurs des aspects que nous venons de couvrir. Rappelons particulièrement les résultats de Petri et Niederrerr montrant que leur sujet possédait plusieurs conceptions de l'atome s'étant développées successivement et qui coexistaient dans son état cognitif final. Ces résultats sont évidemment similaires à ceux de Taber, Harrison et Treagust présentés précédemment. Aussi, mentionnons le constat de Mashhadi concernant un manque de différenciation entre mécaniques classique et quantique chez les étudiants : « Students have incorporated the 'new' quantum phenomena into the 'older' mechanistic conceptions. [...] most students are not epistemologically aware that quantum physics constitutes a new 'paradigm'. »

Enfin, la proposition par Kalkanis, Hadzidaki et Stavrou d'une approche d'enseignement par niveaux de réalité s'insère bien dans la perspective des conceptions multiples : il existe plusieurs niveaux de réalité, conceptuellement indépendants. Ces niveaux doivent être juxtaposés pour former, dans leur tout, la « science normale » devant être apprise par les étudiants. Bien qu'indépendants, les niveaux sont cependant reliés historiquement :

« As the conceptual systems of the different levels are essentially incompatible, their association becomes possible through the understanding of the “crisis process” that led to the abandonment of the older conceptual system and the acceptance of modern one. » (Kalkanis et al., 2003, p. 261)

2.2.4.5 Résumé et discussion

Résumé

Bien que la thématique des conceptions multiples n'ait pas reçu d'attention soutenue et systématique à l'intérieur du programme de recherche sur le

changement conceptuel, il a été possible d'identifier plusieurs pistes d'analyse intéressantes.⁵³

L'intention initiale a été pour plusieurs chercheurs de remettre en question l'idée implicite, mais répandue, d'un remplacement des conceptions initiales. Cette remise en question peut provenir d'un constat empirique (par exemple, Duit), ou encore de l'adoption d'une perspective épistémologique (par exemple, Larochelle et Désautels, Mortimer). Afin de créer un espace de validité aux conceptions spontanées, quelques chercheurs ont proposé de découper l'espace cognitif en plusieurs « régions » de diverses grosseurs et délimitées de différentes façons, chacune apte à entretenir une conception :

- Deux domaines de connaissances, distingués par leur statut social;
- Plusieurs jeux de la connaissance, distingués par leurs engagements épistémologiques et ontologiques, de même que leurs intentions;
- Des contextes (ou domaines de validité), distingués par l'environnement physique et la tâche, tels que perçus par l'individu.

L'apprentissage des sciences impliquerait dans cette perspective la création d'une région cognitive proprement scientifique, définissant le contexte de validité des conceptions scientifiques. La création de cette région (par la formulation explicite de différents engagements épistémologiques, de différentes intentions, de tâches spécifiques, etc.) et sa différenciation par rapport à la région initiale sont alors conçues comme essentielles dans le processus et exigeraient une certaine sophistication épistémologique de la part de l'apprenant.

Mais à l'intérieur même de la région scientifique existeraient plusieurs sous-régions indépendantes, différents niveaux de réalité entretenant chacun un système conceptuel propre. Et pour une même sous-région, plusieurs conceptions (ou modèles) incompatibles pourraient être employées de manière complémentaire. L'idée de non-remplacement des conceptions initiales se généralise ici dans ce que nous appelons la perspective des conceptions multiples : pour un même contexte (et à plus forte raison pour des contextes différents) plusieurs alternatives peuvent être

⁵³ Nous aurions pu intégrer à cette revue de l'approche par conceptions multiples quelques réflexions davantage socioculturelles sur l'apprentissage des sciences (par exemple : Cobern, 1996), mais par simplicité, nous désirons nous limiter dans ce projet à la cognition individuelle.

employées. La métaphore de la boîte à outils (ou encore celle du carquois) devient particulièrement pertinente, en plus d'avoir l'avantage d'intégrer naturellement les aspects métacognitifs et intentionnels de même que l'idée que l'ensemble des conceptions puisse lui-même faire l'objet d'une évaluation.

Certaines contributions proposent des pistes spécifiques sur la nature de ces structures cognitives qui englobent les conceptions alternatives. Tout d'abord, la sélection d'une conception (ou d'un domaine) dépendrait de la situation, de la tâche, et des caractéristiques computationnelles des conceptions, de même que des termes employés dans les énoncés de tâches. Cette sélection pourrait être opérée par une connaissance conditionnelle (une proposition « si ... alors ») ou encore à l'aide d'un principe de suffisance. Ensuite, un lien de nature explicatif existerait entre certaines paires de conceptions alternatives (par exemple, une conception macroscopique peut être expliquée par une conception microscopique). Finalement, certaines conceptions alternatives pourraient être reliées par une structure reproduisant un argument historique. Nous croyons que l'approfondissement de ce genre d'analyses permettrait à l'approche par conceptions multiples d'intégrer davantage les questions relatives à la compréhension des conceptions elles-mêmes.

Discussion

Pour reprendre la terminologie que nous avons proposée au début de notre revue, nous pourrions dire que ce que nous venons de résumer se situe à un niveau d'élaboration qui est macroscopique : l'idée d'une multiplicité de conceptions est défendue de diverses façons (psychologiquement ou épistémologiquement), mais aucune analyse fine n'est incluse concernant sur la structure des conceptions ; elles sont considérées en tant que tout. Quelques pistes sont toutefois suggérées sur la nature des diverses structures cognitives qui auraient comme fonction de relier et subsumer ces conceptions au sein d'un tout plus complexe et performant. Il y a donc certains éléments d'une approche microscopique. Aussi, mentionnons qu'à ce niveau d'analyse, la problématique du changement conceptuel a été abordée surtout sous l'angle de l'acceptation (ou de l'adhésion, un terme plus approprié ici) dans la mesure où on a souligné le besoin de différencier les contextes de validité des

conceptions concurrentes, mais aussi sous celui de la compréhension puisque certains auteurs ont proposé le besoin d'intégrer conceptuellement les conceptions.

La perspective des conceptions multiples a été développée de manière assez indépendante des modèles présentés à la section 2.2.2. Plusieurs de ceux-ci propagent implicitement l'idée d'un remplacement, mais aucun n'est fondamentalement engagé dans cette direction et tous nous apparaissent compatibles avec l'idée de conceptions multiples.

Pour le didacticien, une meilleure connaissance du phénomène des conceptions multiples et de son développement est essentielle, ne serait-ce d'abord que pour en faire explicitement un objectif d'apprentissage. Toute recherche en ce sens possède ainsi un volet normatif innovateur, comme le soulignent Caravita et Halldén :

« We have argued that the aim of learning, science for example, is not to abandon old ideas in favour of new ones, but rather to extend our repertoire of ideas about the physical and cultural world, to refine their organization and coherence. [...] This proposal can be viewed as a normative standpoint on the aim of teaching science and about the aim of schooling. » (Caravita & Halldén, 1994, p. 106)

Vers l'approfondissement de l'idée de conceptions multiples

L'élève en classe de sciences apprend à partir des structures cognitives déjà existantes, mais les objectifs d'apprentissage sont fixés d'avance. C'est l'idée que rend la métaphore des vignes employées par Pines et West (qui la reprennent à leur tour de Vygotsky, ce dernier l'ayant proposée initialement pour décrire le mariage de la pensée et du langage) :

« The spontaneous knowledge is a product of a relatively long ontogenetic development within a culture, itself within a physical environment of experiences; the formal knowledge is a planned intervention imposed by the school. [...] We imagine each these kinds of knowledge represented by a vine. The spontaneous knowledge originating within the learner will be represented as an upward growing vine (to highlight that it is part of the organic growth of the learner); the formal knowledge is seen as a downward growing vine (suggesting its imposition on the learner from the authorities above). [...] In keeping with Vygotsky's wine metaphor, the learning of science implies that the two vines become so intertwined that they lose their separate identities, their different sources notwithstanding. » (Pines & West, 1986, pp. 587-588)

Sans toutefois souscrire à l'idée d'une fusion des identités de la connaissance spontanée et de la connaissance scientifique (ou scolaire), nous pensons que cette métaphore met bien à l'avant-scène l'idée que, du point de vue du didacticien, l'apprentissage des sciences se situe au confluent de ces deux types de connaissance.

Nous croyons que la perspective des conceptions multiples a précisément pris comme objet d'étude ce confluent, i.e. qu'elle s'est spécifiquement interrogée sur la nature de cette imbrication des vagues ascendante et descendante, en montrant, ne serait-ce que de manière exploratoire, que celle-ci est le lieu d'émergence d'une structure cognitive dont la richesse est encore méconnue.

Nous espérons avoir pu démontrer dans cette section que la littérature sur le phénomène des conceptions multiples est à l'heure actuelle très fragmentée et exploratoire. À notre avis, celle-ci bénéficierait de la proposition d'un modèle qui intégrerait, en les élaborant, plusieurs des idées présentées ici. La formulation d'un tel modèle constitue le premier objectif de notre thèse et fera l'objet du prochain chapitre.

2.2.5 Conclusion

En guise de conclusion à notre revue du programme de recherche sur le changement conceptuel, nous discuterons dans cette section d'un thème récurrent dans la littérature puis discuterons de l'évolution de ce programme de recherche.

2.2.5.1 Rupture ou continuité ?

Rupture et continuité dans le changement conceptuel

La perspective constructiviste modeste prend comme point de départ une forme de continuité : les apprenants ne peuvent se construire de nouvelles connaissances que dans la mesure où ils peuvent s'appuyer pour ce faire sur les structures cognitives déjà en place. Mais en même temps, plusieurs chercheurs suggèrent que l'apprentissage n'est pas exclusivement cumulatif : les conceptions initiales des apprenants sont en certains points fondamentalement différentes des théories scientifiques incluses dans le curriculum, et un remplacement doit être effectué. Ainsi, le processus de changement conceptuel fait face à une double contrainte :

« Or, le changement conceptuel pose problème précisément parce qu'il implique à la fois une part de continuité et une part de rupture. La première est garante d'un ancrage possible dans les représentations antérieures de l'apprenant. Celui-ci est indispensable pour donner un sens aux connaissances nouvelles. La seconde implique un écart raisonnable entre ce qui est acquis et ce qui est nouveau, écart qui peut être source d'obstacles à surmonter. Elle met l'accent sur la nécessité d'un dépassement des conceptions initiales, d'un changement qualitatif dans l'organisation même des connaissances. » (Legendre, 2002, p. 181)

Dans les termes de Giordan et de Vecchi (1987), l'élève doit donc apprendre « avec » et « contre » ses conceptions initiales. Selon Legendre, cette double contrainte se reflète dans les modèles de changement conceptuel développés et dans les approches d'enseignement qui découlent d'eux.

« Selon qu'elles mettent l'accent sur les aspects de continuité ou de rupture en jeu dans le passage d'un degré de compréhension ou de conceptualisation à un autre, les diverses approches du changement conceptuel proposent des façons différentes de décrire aussi bien les représentations initiales de l'apprenant et les connaissances visées par l'enseignement que les processus propres à assurer le passage des unes aux autres. Aussi comportent-elles des implications différentes sur le plan de l'enseignement. » (Legendre, 2002, p. 181)

Legendre (2002) classe notamment dans la perspective de la rupture l'approche de Bachelard, le modèle de Larochelle et Désautels, celui de Posner et al., de même que la stratégie du conflit cognitif en général. En contrepartie, elle fait de diSessa le champion de la perspective de la continuité. Ces deux perspectives ne sont cependant pas incompatibles : elles ne font que s'attarder complémentaires à deux facettes du même phénomène (Legendre, 2007).

Rupture et continuité dans les modèles de changement conceptuel

Les notions de rupture et de continuité constituent des catégories d'analyse des modèles de changement conceptuel qui sont différentes de celles que nous avons proposées au début de notre revue. Mais une mise en relation peut être effectuée, moyennant une distinction.

Le terme « rupture » peut posséder différentes significations. Premièrement, une rupture peut désigner un changement brusque dans l'état d'un système, un saut difficilement analysable. Par exemple, lorsqu'un système physique évolue brusquement (par exemple : une explosion chimique, le décrochage de l'écoulement autour d'une aile d'avion, etc.), il est possible d'y voir, à une certaine échelle d'analyse, une rupture fondamentale. Mais nous savons qu'il suffit de raffiner cette échelle pour y retrouver un processus continu et intelligible,⁵⁴ même si violent et instable. Dans cette perspective, la notion de rupture ne s'oppose donc que dans un sens faible à celle de continuité. Cette remarque vaut également pour les modèles de

⁵⁴ Comme nous le mentionnent Machamer, Darden et Craver (2000, p. 3) : « Complete description of mechanisms exhibit productive continuity without gaps from the setup to termination conditions. Productive continuities are what make the connections between stages intelligible. »

changement conceptuel. Les modèles macroscopiques (comme celui de Posner et al.), qui prennent comme entités épistémiques de base les conceptions elles-mêmes, conceptualisent généralement l'apprentissage des conceptions scientifiques comme une rupture : une conception est troquée pour une autre, mais du processus nous n'avons que peu de détails, seulement des conditions. Les modèles microscopiques (comme ceux de diSessa et Vosniadou) sont plus aptes à explorer les états cognitifs intermédiaires de l'apprentissage puisqu'ils se donnent les outils conceptuels pour le faire : les conceptions possèdent ici une structure interne plus ou moins complexe, susceptible d'évoluer partiellement et progressivement, d'où l'aspect continuiste de ces modèles.

Mais le terme « rupture » peut être compris dans un autre sens, celui que semble avoir à l'esprit Legendre dans les citations précédentes. La notion fait ici référence à un changement dans la nature même des savoirs des élèves à l'occasion de l'apprentissage. Il s'agit en quelque sorte d'une « rupture ontologique » plutôt qu'une « rupture dynamique ». Prise dans ce sens, la notion de rupture renvoie maintenant à la distinction entre modèle psychologique ascendant et modèle épistémologique descendant. Par exemple, le modèle microscopique de diSessa tente de montrer précisément comment les éléments à la base de la physique intuitive sont psychologiquement récupérés dans l'apprentissage et encore présents dans la connaissance finale. DiSessa est continuiste : on ne change pas de cerveau lors d'un apprentissage; on réutilise plutôt celui qu'on a. Les modèles épistémologiques descendants (Bachelard, Chi, Chinn et Samarapungavan) abordent plutôt la question de l'apprentissage par l'analyse des savoirs scientifiques : en quoi sont-ils différents des savoirs initiaux ? Chaque modèle trouvera alors un moyen de caractériser l'essence des différences. Mais encore ici, « rupture » ne vient pas s'opposer à « continuité » dans un sens fort : aucun de ces modèles épistémologiques ne niera que nous ne changeons pas de cerveau même si les savoirs qu'il contient font l'objet de réformes majeures.

En somme, entre les catégories d'analyse que nous avons employées pour caractériser les modèles de changement conceptuel (acceptation / compréhension ; macroscopique / microscopique ; psychologique / épistémologique), il n'y a pas d'opposition ou d'incompatibilité : ce ne sont là que des distinctions qui nous

permettent de mieux percevoir la position de chaque modèle dans l'espace de la problématique du changement conceptuel. Chacun de ces modèles éclaire donc, à sa façon, une facette de ce phénomène, les oppositions entre modèles antagonistes étant pour l'heure encore rares. Il n'est pas à exclure qu'une approche synthèse puisse éventuellement être formulée qui permettrait de modéliser toutes ces facettes.

2.2.5.2 Tendances dans le programme de recherche

Dans sa propre revue des modèles de changement conceptuel, Potvin suggère que l'histoire du programme de recherche peut être lue comme un passage graduel de la perspective de rupture vers celle de la continuité, qui atteindrait son achèvement dans le modèle de diSessa.

« On insistera particulièrement, tout au cours de 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. » (Potvin, 2002, p. 16)

Le point de vue de Potvin suggère que les modèles de changement conceptuel s'attaquent à une même problématique (le changement conceptuel) et que tous sont par conséquent en compétition directe, des modèles de plus en plus continuistes supplantant progressivement leurs prédécesseurs.

Notre revue nous amène à concevoir une histoire moins linéaire. Nous avons tout d'abord pris soin d'effectuer quelques distinctions visant à mieux définir l'espace de la problématique du changement conceptuel. Cet espace étant vaste, les modèles s'attaquent la plupart du temps à des aspects différents de la problématique (Chinn & Brewer, 1998b). À notre avis, l'histoire du programme de recherche est mieux caractérisée par une prise de conscience progressive de l'étendue de la problématique du changement conceptuel. Ce « programme » ne suit pas un itinéraire prédéfini : il découvre les multiples facettes de son objet de recherche. À partir du modèle de Posner et al., on a par exemple inclus des analyses plus fines de la structure conceptuelle, considéré la possibilité de conceptions multiples, amélioré la compréhension du traitement des données anormales, étudié l'influence des croyances épistémologique de même que celle des facteurs motivationnels, contextuels et émotionnels, et envisagé un rôle important au volet social de la

cognition. La tendance, s'il en est une, réside dans l'exploration de la problématique et l'intégration des perspectives (Tyson et al., 1997; Harrison & Treagust, 2001; Sinatra, 2002).

« There are many theories of why conceptual change in science is difficult. [...] What most theories have in common is an assumption that the difficulty of achieving conceptual change can be explained by positing one or several key factors that impede change. Our alternative theory takes the opposite view: Conceptual change is extremely multifaceted. There are *multiple dimensions* of conceptual change, and hence *multiple roots* of difficulty. That is, there are many different reasons why conceptual change is difficult, and the sources of difficulty may vary from topic to topic. Attempting to characterize difficulties in conceptual change as due primarily to one cluster of factors or another is a serious oversimplification of conceptual change. » (Chinn & Samarapungavan, 2008)

Mais remarquons que cette tendance à une complexification des modèles théoriques (individuellement et collectivement), aussi captivante qu'elle puisse être, vient sournoisement miner leur impact sur la pratique enseignante :

« The state of theory building on conceptual change has become more and more sophisticated and the teaching and learning strategies developed have become more and more complex over the past 30 years. Of course, these developments are necessary in order to address the complex phenomena of teaching and learning (science) more and more adequately. But it appears that the gap between what is necessary from the researchers' perspective and what may be set into practice by normal teachers has increased. Maybe we have to address the paradox that in order to adequately model teaching and learning processes, research alienates the teachers and hence widens the theory-practice gap. » (Duit, Treagust, & Widodo, 2008, p. 642)

Aussi cette complexification théorique du programme de recherche doit-elle être accompagnée d'un effort de synthèse et de vulgarisation destiné aux enseignants, pour éviter que l'enseignement ne devienne victime d'une transposition approximative et inadéquate des résultats de recherche.

Finalement, mentionnons une autre tendance, récente et plutôt timide, qui consiste à l'inclusion dans le programme des recherches portant sur d'autres matières scolaires que les sciences de la nature. La didactique des mathématiques, du fait de sa proximité historique avec la didactique des sciences, s'est récemment ouverte à la perspective du changement conceptuel (Vamvakoussi, 2007). Par exemple, Vamvakoussi et Vosniadou (2004) ont utilisé le modèle de changement conceptuel de cette dernière pour analyser l'apprentissage graduel des propriétés des nombres rationnels à partir des nombres naturels chez les élèves de la fin du primaire. L'approche par changement conceptuel a également été appliquée à l'apprentissage de l'histoire (Halldén, 1997, 1998; Limón, 2002), où l'on a remarqué par exemple

que les élèves doivent modifier substantiellement le type d'explications auquel ils ont recours, du fait de leur tendance à personnifier les organisations sociales et à leur attribuer des états mentaux. Le développement des conceptions épistémologiques des étudiants peut également être considéré comme un changement conceptuel. Par exemple, diSessa et ses collègues ont assimilé le développement de l'épistémologie des étudiants à une coordination d'éléments intuitifs initialement fragmentés (Hammer & Elby, 2002; diSessa et al., 2003). Mais globalement, il est trop tôt pour juger de la fertilité de ces efforts d'extension du domaine d'application du programme de recherche.

CHAPITRE 3 - VOLET THÉORIQUE : DÉVELOPPEMENT DE LA NOTION DE COMPLEXIFICATION CONCEPTUELLE

Comme nous l'avons mentionné à la section 1.3, notre projet d'étude sur le phénomène des conceptions multiples comporte deux moments distincts. Le premier est de nature théorique : il s'agit de synthétiser au sein d'un modèle cohérent les différents résultats et hypothèses relatives aux conceptions multiples que l'on retrouve dans la littérature et d'ainsi répondre à cette question :

« Lorsqu'une conception visant à expliquer un phénomène est apprise alors que l'élève possède une conception initiale à propos de ce phénomène, conception qui n'est cependant pas remplacée par la nouvelle, quelle est la nature de la structure cognitive permettant de gérer la coexistence de ces deux conceptions ? »

Après avoir présenté dans les chapitres précédents le programme de recherche sur le changement conceptuel de même que ses fondements psychologiques et épistémologiques, le présent chapitre sera consacré à répondre spécifiquement à notre question de recherche.

Ce chapitre comprendra deux parties. Dans la première (section 3.1), nous nous émanciperons de certaines présuppositions souvent présentes dans le programme de recherche sur le changement conceptuel et plus particulièrement dans la perspective des conceptions multiples. Une fois ce travail critique effectué et les bases de notre propre approche jetées, nous nous lancerons dans la présentation proprement dite de notre modèle (section 3.2). Cette présentation comprendra cinq parties, chacune exposant comme nous le verrons un type de structure cognitive agissant comme intermédiaire entre les conceptions alternatives. Une fois effectuée cette première formulation de notre modèle, nous tenterons de poursuivre son développement à l'aide d'une investigation empirique (chapitre 4).

3.1 LE REJET DE DEUX PRÉSUPPOSITIONS

Notre survol de la littérature sur le phénomène des conceptions multiples a tenté d'être neutre et de préserver l'esprit de chaque contribution. Toutefois, avant de présenter les différentes composantes de notre modèle, un certain travail critique s'impose. En effet, nous avons identifié deux présuppositions présentes dans cette

littérature qui nous apparaissent inappropriées et dont le dépassement est nécessaire pour la formulation de notre modèle.

La première concerne la tendance dans les recherches sur le changement conceptuel à considérer que les conceptions ne peuvent recevoir au plus qu'un attribut par les élèves (par exemple : « vraie », « statut élevé », etc.). Nous pensons au contraire qu'il est possible pour un élève d'employer une gamme variée de ces « étiquettes » pour qualifier une conception (par exemple : « vraie », « utile », « difficile à employer », etc.).

La deuxième présupposition est spécifique aux recherches sur le phénomène des conceptions multiples et concerne le recours par plusieurs auteurs à une approche isolationniste, où l'activité cognitive se trouve compartimentée en différentes régions indépendantes et également valides. Nous sommes d'avis que cette approche n'est pas nécessaire et qu'elle vient en fait masquer une partie importante de la richesse du phénomène. Lors de cette critique, nous nous intéresserons à titre d'exemple au modèle des jeux de la connaissance proposé par Laroche et Désautels.

3.1.1 Rejet de la qualification unidimensionnelle des conceptions

3.1.1.1 La vérité, le statut

Afin de mieux comprendre la nature des modèles de changement conceptuel présentés à la section 2.2, nous avons employé trois distinctions permettant de mieux définir l'espace de la problématique, dont celle entre compréhension et croyance. Chez Chinn et Samarapungavan (2008), la croyance est vue comme une acceptation ou une adhésion à l'endroit d'une idée, à distinguer de la compréhension de celle-ci. À notre avis, il est nécessaire d'élaborer davantage ce thème car la notion de croyance cache d'intéressantes complexités qui sont nécessairement interpellées par la perspective des conceptions multiples : qu'est-ce que croire lorsque l'on maintient plusieurs alternatives conceptuelles ?

Au-delà de la notion de croyance

Prenons comme point de départ la notion de croyance conçue comme acceptation (ou adhésion). Deux choses sont à dire sur cette notion. Premièrement, l'acceptation

peut être vue comme impliquant un jugement de vérité : nous croyons ce que nous jugeons être vrai. Il est difficile d'imaginer quelqu'un qui affirmerait honnêtement croire une proposition qu'il sait être fausse. Deuxièmement, un tel renvoi à la notion de vérité donne à cette conception de la croyance une connotation nettement monopolistique : nous croyons en ce que nous jugeons être vrai, et ne peuvent être simultanément vrais deux énoncés incompatibles.⁵⁵ Cette connotation d'exclusivité rend cependant cette conception de la croyance trop rigide pour la perspective des conceptions multiples : les élèves possèdent une palette plus ou moins garnie de conceptions alternatives, chacune possédant une pertinence cognitive particulière.

Nous pensons que, de la distinction entre compréhension et croyance, il est utile de retenir l'idée que l'apprentissage fait intervenir non seulement la compréhension de concepts ou conceptions, mais aussi la formulation de jugements à l'endroit de ceux-ci. Mais il n'y a pas de raison de présupposer que ces jugements se limitent à l'étiquetage d'une valeur de vérité.

Au-delà de la notion de statut

En fait, plusieurs autres attributs ont déjà été proposés par le modèle de Posner et al. Comme nous l'avons vu, ce modèle associe un statut aux conceptions en jeu. Ce statut est déterminé par le sujet à l'aide de quatre jugements : il diminue si la conception s'avère insatisfaisante alors qu'il augmente si cette conception est considérée intelligible, plausible et féconde. La littérature sur le changement conceptuel a par la suite souvent employé les notions d'insatisfaction, d'intelligibilité, de plausibilité et de fécondité pour étudier les facteurs influençant le changement conceptuel, et en particulier l'efficacité des stratégies d'enseignement.

Mais il faut garder à l'esprit que le modèle de Posner et al. a été proposé de manière normative : il visait à définir la nature de l'apprentissage rationnel en s'inspirant des théories épistémologiques de l'époque. Puisque ce modèle ne résulte pas d'une analyse psychologique empirique, nous ne voyons aucune raison de nous limiter ici à ce cadre. Premièrement, il serait méthodologiquement nuisible de nous

⁵⁵ Évidemment, des conceptions plus sophistiquées de la croyance peuvent être formulées. Pensons par exemple à la théorie épistémologique des empiristes logiques que nous avons présentée, qui attribuait un degré de probabilité d'être vraies aux diverses théories scientifiques concurrentes.

restreindre à ces quatre jugements pour tenter de comprendre le changement conceptuel. Deuxièmement, la notion de statut n'est pas explicitement définie, de sorte qu'elle semble renvoyer, à l'instar de la notion de croyance, à une sorte d'adhésion, qui viendrait ici par degré. Chose certaine cependant, le statut des conceptions constitue dans ce modèle un paramètre qui permet d'ordonner celles-ci selon un axe : le statut d'une conception peut augmenter ou diminuer, et celle ayant le statut le plus élevé remporte la compétition à l'instant considéré. Mais rien ne nous oblige à nous restreindre à une telle conception unidimensionnelle de l'apprentissage.

3.1.1.2 Proposition : les jugements multidimensionnels

Nous désirons ici avancer l'idée que les apprenants peuvent potentiellement effectuer un grand nombre de jugements à l'endroit d'une conception. Nous proposons une typologie formée de quatre groupes, qui a pour seul mérite d'encadrer efficacement la recension de ces jugements :

- Groupe de jugements « épistémiques », portant sur :
 - La vérité;
 - La probabilité;
 - La scientificité;
 - L'accord avec les énoncés descriptifs, le pouvoir explicatif;
 - La consistance interne;
 - La cohérence;
 - La plausibilité;
 - La falsifiabilité;
 - La progressivité;
 - La fertilité;
 - La simplicité, l'élégance;
 - La fiabilité de la source;
 - La consistance avec la tradition conceptuelle, etc.
- Groupe de jugements « pragmatiques », portant sur :
 - La précision;
 - La fiabilité;
 - L'efficacité de l'emploi de la conception, etc.
- Groupe des jugements « métacognitifs », portant sur :
 - Le degré de compréhension de la conception;
 - La confiance en la compréhension de la conception;
 - Le travail cognitif exigé pour l'emploi de la conception;
 - La capacité à manier les ressources cognitives (internes ou externes) nécessaires pour l'emploi de la conception, etc.

- Groupe de jugements « sociaux et émotionnels », portant sur :
 - Le support social de la conception;
 - La cohérence avec les intérêts sociaux;
 - L'impact sur la perception de soi ou des autres, etc.

Nous reconnaissons que cette liste peut paraître redondante à certains endroits : pour plusieurs, scientificité est synonyme de vérité, et la cohérence influence la plausibilité.⁵⁶ Aussi, nous ne prétendons pas que ces groupes soient exclusifs et bien délimités : un jugement concernant l'impact sur la perception de soi peut, par exemple, affecter celui portant sur la plausibilité. Cette liste ne vise qu'à proposer des jugements pouvant potentiellement être effectués par un sujet.

Mentionnons que ces jugements peuvent requérir une certaine expertise, soit avec le contenu jugé (par exemple pour l'appréciation de la simplicité ou de la progressivité d'une conception), soit au niveau épistémologique (par exemple pour l'évaluation de la falsifiabilité, ou encore de la progressivité), soit dans le maniement des contenus (par exemple pour l'évaluation de l'efficacité ou de la fiabilité), etc. En fait, le développement de la capacité à effectuer ces jugements nous semble constituer une facette importante du processus d'acquisition de l'expertise. Cela n'empêche pas que certains de ces jugements puissent être effectués par des enfants : Samarapungavan (1992) rapporte que des élèves de niveau de primaire sont capables d'employer des critères comme l'accord avec les données empiriques, la consistance interne, le caractère ad hoc et le degré de généralité pour préférer une théorie au détriment d'une théorie alternative.

Une approche employant la notion de jugements multidimensionnels est à notre avis beaucoup plus souple que celle recourant à la notion de croyance (comme adhésion) ou encore à celle de statut. En effet, notre approche ne contraint pas le sujet à ordonner ses conceptions selon un axe unique. En fait, une telle contrainte d'ordonnement serait non seulement difficile à produire (étant donné la diversité

⁵⁶ Dans le modèle de Posner et al., certains de ces jugements se trouvent inclus dans la partie « engagements épistémologiques » de l'écologie conceptuelle de l'apprenant. Les jugements épistémologiques se retrouvent ainsi à deux niveaux théoriques différents dans leurs modèles : par exemple, un jugement de fécondité ou de plausibilité joue un rôle de premier plan sur le changement conceptuel, alors qu'un jugement de cohérence ou de haut degré de généralité ne joue un rôle que via son impact sur les jugements situés au premier plan. Nous reconnaissons que ces jugements *peuvent* être hiérarchisés ou même codéfinis, mais le modèle de Posner et al. *impose* ces relations (de par son caractère normatif), ce qui est inutile de maintenir ici.

des jugements potentiels), mais artificielle et probablement inutile. Chaque conception a ses forces et ses lacunes; bien les connaître est essentiel à une bonne gestion de notre activité cognitive. Nous développerons cette idée à la section 3.2.5.

Pour l'instant, il nous est nécessaire d'assouplir une opposition populaire dans les recherches sur les conceptions multiples : celle entre sens commun et science.

3.1.2 Rejet de l'approche isolationniste

Comme nous l'avons vu à la section 2.2.4, l'idée des conceptions multiples a souvent été avancée de pair avec une division de la cognition en sphères d'activité distinctes et isolées, d'une manière à justifier (psychologiquement ou épistémologiquement) la nécessité de cette multiplicité. Les « domaines de connaissance » (Solomon), les « jeux de la connaissance » (Larochelle et Désautels), les « zones » du profil conceptuel (Mortimer) renvoient sans équivoque à cette stratégie, mais il est également possible d'y sentir une allusion dans le terme « contexte » fréquemment utilisé par plusieurs autres auteurs. Malheureusement, aucun de ces contributeurs n'a inclus d'analyse détaillée sur la nature de ces régions indépendantes d'activité cognitive, de sorte que cette idée ne s'appuie que sur une base théorique étroite malgré son caractère intuitif. Cette approche isolationniste⁵⁷ nous apparaît cependant peu plausible du point de vue épistémologique et peu fertile du point psychologique. L'objectif de cette section sera par conséquent d'en présenter une critique et d'offrir en retour un exposé de l'approche que nous préconisons.

La première partie de cette section sera la partie positive. Nous y présenterons la position selon laquelle science et cognition ordinaire diffèrent en degrés et non en genre, et nous suggérerons que dans cette perspective le choix d'une conception se fait par la prise de conscience des standards à respecter.

C'est en s'appuyant sur cette position que nous critiquerons, dans la seconde partie de cette section, l'approche isolationniste. Pour ce faire, nous nous attarderons spécifiquement au modèle de Larochelle et Désautels, qui est selon nous le modèle qui a développé le plus systématiquement cette approche. Ce modèle jouera pour

⁵⁷ Le terme « isolationniste » pour qualifier cette approche a été proposé par Pierre Poirier.

nous un rôle d'une grande valeur : il forcera l'identification de l'origine de nos divergences, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de notre propre position.

3.1.2.1 Le sens commun et la science : une rupture épistémologique graduelle

L'approche que nous appelons par « régions » consiste en la compartimentation de l'activité cognitive en sphères où est préservée la pertinence des conceptions qu'elles encapsulent. À la base de cette approche se trouve cachée la prémisse que ces régions sont de natures distinctes. Par exemple, les régions de la vie ordinaire et de l'activité scientifique sont considérées comme étant fondamentalement différentes. Bien que nous reconnaissons que des différences existent, cette présupposition nous apparaît erronée.

Souligner la rupture épistémologique entre sens commun et science

De nombreux auteurs ont souligné les différences épistémologiques existant entre la cognition ordinaire et la cognition scientifique, et ce, afin de mettre en évidence l'ampleur de la rupture épistémologique exigée par la formation scientifique. L'article de Reif et Larkin (1991) est particulièrement clair à ce sujet. Ces chercheurs effectuent une comparaison systématique entre les domaines « ordinaire » et scientifique (p.737). Reif et Larkin comparent ainsi les objectifs des deux domaines :

« The goals of everyday life are largely implicit and not sharply defined. Roughly, the central goal is to lead a satisfying life. In the service of this goal, it is necessary to cope satisfactorily with one's environment. Thus it is important to pursue the subgoal of predicting, and sometimes explaining, commonly observed physical and biological phenomena. [...] In the domain of science, this implicit subgoal of everyday life is elevated to become the explicit central goal to be pursued to the best possible extent. » (Reif & Larkin, 1991, p. 738)

Au niveau des standards épistémologiques à respecter afin d'atteindre les objectifs, ces auteurs remarquent par exemple qu'en situation ordinaire nous pouvons employer plusieurs connaissances pour des contextes différents, que l'ambiguïté est tolérée et que nous avons une préférence pour les chaînes d'inférence courtes. Dans le domaine scientifique, les exigences sont plus contraignantes : la consistance et la

précision sont recherchées, de même qu'un haut degré de généralité, ce qui est d'ailleurs permis par le recours à de longues inférences.⁵⁸

Ainsi, les domaines ordinaire et scientifique diffèrent significativement :

« “The whole of science is nothing more than a refinement of everyday thinking.” This statement by Einstein (1954) is certainly true. However, the refinement has been very substantial. The central scientific goal of optimal prediction and explanation is a very ambitious extension of the more modest predictive and explanatory goals of everyday life, and thus imposes much more stringent requirements. Furthermore, scientific advances over several centuries have led to scientific knowledge that has become increasingly more voluminous, more precise, more abstract and highly symbolic, and more prone to deal with phenomena and concepts never encountered in everyday life (e.g., atomic particles, genes, speeds close to that of light, etc.). As a result, the gap between scientific knowledge and that of everyday life has become increasingly large. » (Reif & Larkin, 1991, pp. 739-740)

Une rupture cependant graduelle

Mais soulignons que cette rupture épistémologique, telle que présentée par Reif et Larkin, n'est pas violente. La science s'est différenciée du sens commun, mais de manière progressive et en termes de degrés (plutôt que de genre). Ainsi, plusieurs des objectifs, standards et moyens du domaine ordinaire se retrouvent dans le domaine scientifique, mais y reçoivent une importance différente. La science n'est pas le sens commun, mais elle ne lui est pas totalement étrangère.

De manière semblable, Brewer, Chinn et Samarapungavan proposent que l'activité scientifique et l'activité cognitive courante ont recours à des explications essentiellement de même nature (même si les explications scientifiques ont généralement la caractéristique d'être davantage testables) :

« More specifically, we hypothesize that scientific explanations are like everyday explanations in that they (a) provide a theoretical/conceptual framework for a phenomenon; (b) go beyond the original phenomenon; (c) integrate a range of phenomena; (d) show how the original phenomenon follows from the framework; and (e) provide a feeling of understanding. » (Brewer, Chinn, & Samarapungavan, 1998, p. 121)

De plus, de nombreux critères employés pour l'évaluation des explications seraient partagés par les deux secteurs d'activité :

« More specifically, we think that *empirical accuracy, scope, consistency, simplicity* and *plausibility* are used in evaluating both scientific explanations and everyday explanations [...] While both scientists and nonscientists share these criteria we think that scientists typically much more severely. » (Brewer et al., 1998, p. 123)

⁵⁸ Voir aussi Hilton (2002).

Ainsi, science et cognition ordinaire ne constitueraient que deux positions plutôt extrêmes au sein d'un espace continu. En fait, il est facile d'imaginer des cas intermédiaires, définis par des objectifs et des standards situés à mi-chemin entre ceux de la science professionnelle et ceux du sens commun. Pensons par exemple aux connaissances techniques employées par les agriculteurs, qui sont intéressés à améliorer leur rendement, et moins par les détails des mécanismes biologiques à la base de ces techniques. Pensons aux ingénieurs aéronautiques, qui peuvent avoir comme objectif d'améliorer la portance d'une aile d'avion, et qui développent et emploient pour ce faire des modèles numériques hautement complexes sans être inutilement précis. Pensons à ces gens désireux d'être au courant des dernières trouvailles en astrophysique, qui consultent des revues de vulgarisation à la recherche d'une compréhension « conceptuelle » qui leur épargneraient toutefois les longues analyses formelles.

La question de la validité des conceptions alternatives

À notre avis, l'attrait principal de l'approche isolationniste réside dans le fait qu'il s'agit d'une façon rapide de justifier le maintien des conceptions initiales des élèves : ces conceptions étaient et demeurent pertinentes, car leur sphère de validité est celle de la vie ordinaire, qui n'a pas à être menacée par le développement d'une sphère scientifique distincte.

Mais dans une perspective où il n'existe qu'un continuum entre les cognitions ordinaire et scientifique, comment peut-on affirmer que les conceptions initiales des élèves conservent tout de même une pertinence ? Si les conceptions initiales ne peuvent plus bénéficier de cette « immunité épistémique » que leur conférait leur sphère distincte, elles devront justifier leur pertinence sur la base de leur mérite. C'est sur cette piste que nous lançent Hawkins et Pea lorsqu'ils affirment que chaque explication possède un degré de précision susceptible de suffire à certains objectifs (et non pour d'autres) :

« One feature of explanatory accounts, whether in everyday conversation or science, is that they each have a certain precision. An explanation is expressed with some degree of exactitude, with the tacit assumption that the explanation is sufficient for the purposes for which the inquirer asked the question. We will call this purpose-relative feature of explanations its *pragmatic precision*. An explanatory account suffices for the inquirer if it is precise enough – in terms of qualitative and quantitative features – for the purposes of inquiry. “Suffice” is a socially constructed normative standard, subject to change and

adaptation. [...] Similarly, definitions of variables, the range of variables considered, and the acknowledged interactions among variables that are appropriate for consideration in particular explanatory accounts will vary with purpose [...]. » (Hawkins & Pea, 1987, p. 296)

Ces auteurs suggèrent ici que les objectifs (peu importe qu'ils soient dits ordinaires ou scientifiques) déterminent la précision qui doit être minimalement satisfaite. L'explication (ou la conception) employée possède un intérêt parce qu'elle est considérée comme satisfaisante relativement à l'objectif. Dans cette approche, c'est parce qu'elles sont susceptibles d'être choisies que les conceptions initiales conservent une pertinence cognitive. Nous pouvons donc déjà entrevoir que le processus de sélection d'une conception devient un aspect du phénomène des conceptions multiples plus important et plus complexe dans cette approche que dans celle par régions cognitives distinctes.

Afin de développer cette idée, nous effectuerons un parallèle avec le milieu de l'ingénierie et la notion de cahier des charges. En effet, la sélection d'une solution technologique est un processus complexe qui est susceptible de nous éclairer.

Proposition : la notion de cahier des charges

Pour atteindre un objectif technologique, un produit doit être conçu de manière telle à respecter certaines attentes et certains standards. En ingénierie, un cahier des charges⁵⁹ est un document permettant à un client d'explicitier ses attentes et préférences envers un produit qu'il fait développer par l'entreprise avec laquelle il fait affaire.

Par exemple, lorsqu'une entreprise comme Bombardier développe un modèle d'avion, elle utilise un moteur qui est produit par un autre fabricant, par exemple Pratt & Whitney. Si ce dernier ne possède pas un moteur adéquat pour l'avion désiré, il est possible qu'il opte pour le développement un nouveau moteur ou une nouvelle version d'un moteur existant adapté aux besoins de Bombardier. Les deux compagnies s'engagent alors dans un processus de négociation des éléments d'un cahier des charges, celui-ci comprenant les spécifications techniques à respecter (incluant celles imposées par les agences gouvernementales, par exemple la *Federal*

⁵⁹ Le Petit Robert définit le cahier des charges comme étant le « document indiquant les caractéristiques que devra présenter une réalisation technique, et les différents stades à respecter pour sa mise en oeuvre. »

Aviation Administration) et possiblement certaines clauses punitives statuant les pénalités en cas de non-respect des attentes techniques ou temporelles. Par exemple, le cahier des charges spécifiera le poids et le volume d'un moteur, son efficacité, sa poussée (maximale et normale), les contraintes maximales qu'il peut exercer sur le fuselage, sa capacité à alimenter l'avion en électricité et en air pressurisé, sa résistance aux impacts d'oiseaux, sa sécurité en cas de fuite de carburant, etc.

Une fois le cahier des charges formulé, l'équipe d'ingénieurs et de techniciens de chez Pratt & Whitney s'efforce de concevoir (puis de produire) un modèle de moteur respectant les termes du cahier des charges. Pour cette équipe, l'objectif global est le développement d'un nouveau modèle de moteur d'avion. Mais pour être plus précis, nous devons spécifier que l'objectif de cette équipe est en fait le respect de tout ce qui est contenu dans le cahier des charges ; le cahier des charges est l'explicitation de ce qui est à atteindre. Par ailleurs, un cahier des charges n'est pas nécessairement rigide : il est possible que l'on permette qu'il soit modifié en cours de route, en fonction par exemple des difficultés rencontrées par les ingénieurs de Pratt & Whitney.

Finalement, mentionnons qu'une partie de l'expertise d'un ingénieur réside dans sa capacité à comprendre un cahier des charges, voire dans sa capacité à le modifier ou même à l'élaborer le cas échéant. Avant même de se manifester dans la réalisation d'une tâche, l'expertise est donc requise pour l'assimilation des attentes. De plus, soulignons que cette compréhension doit évidemment être partagée par les divers membres de l'équipe pour que soit possible la réalisation coordonnée d'un projet collectif.

L'utilisation de la métaphore du cahier des charges en psychologie cognitive

Nous proposons d'employer métaphoriquement la notion de cahier des charges en psychologie. Ainsi, nous suggérons que lorsqu'un individu doit atteindre un objectif par l'accomplissement d'une tâche, la réalisation de celle-ci doit rencontrer les spécifications contenues dans un cahier des charges. Évidemment, l'aspect contractuel devient non pertinent dans bien des cas (mais pas tous), puisque la personne qui spécifie la tâche et celle qui la réalise est souvent la même. L'idée centrale du cahier des charges, soit l'existence d'un ensemble d'attentes venant

détailler l'objectif principal et ainsi contraindre sa réalisation, demeure cependant pertinente.

Nous nous intéressons ici à un type de situations en particulier : celles où nous disposons de plus d'une conception pouvant être employée pour accomplir une tâche. Supposons par exemple la tâche suivante : nous savons que la distance de freinage minimale d'une voiture est de 25 mètres si elle roule horizontalement à 50 km/h et nous désirons estimer cette distance pour une vitesse de 100 km/h sur une route en pente descendante, comment nous y prendrons-nous ? Une première possibilité pour nous est d'employer une conception intuitive du type « plus la vitesse d'un objet est grande, plus c'est long avant qu'il ne s'arrête », qui nous mènerait à prédire une distance d'au moins 50 mètres, probablement plus du fait de la pente. Une deuxième possibilité est de recourir à la mécanique newtonienne, en évaluant le coefficient de frottement entre l'asphalte et les pneus (en supposant une relation linéaire entre la friction et la force normale) puis en employant la deuxième loi de Newton (en tenant compte de l'angle de la pente) pour trouver la valeur numérique de la décélération et par la suite de la distance parcourue. Laquelle de ces deux options conceptuelles devons-nous employer ? La réponse n'est pas directe, car il faut d'abord évaluer les attentes venant spécifier le type de prédiction souhaitée. En effet, désirons-nous une prédiction numérique et précise ou sommes-nous satisfaits d'une réponse approximative ? Devons-nous fournir la prédiction immédiatement ou avons-nous quelques minutes à notre disposition ? Nous faut-il être certains de notre estimation ? etc. Dépendamment de nos réponses à ces questions, le choix de la conception à utiliser variera. Nous sommes donc en présence d'un ensemble d'attentes cognitives déterminant la sélection des moyens de réaliser la tâche cognitive. Dans le reste du texte, nous emploierons de manière métaphorique l'expression « cahier des charges » pour référer spécifiquement à cet ensemble des attentes cognitives associées à une tâche.

Contrairement à Hawkins et Pea qui ne considéraient que le degré de précision comme attente déterminant le choix d'une conception, nous envisageons la possibilité d'une gamme variée d'attentes formant le cahier des charges. Il est possible de regrouper celles-ci selon la même typologie que celle que nous avons employée pour les jugements (section 3.1.1). Il existerait ainsi des attentes cognitives,

épistémologiques, pragmatiques, socioaffectives, etc.⁶⁰ Comme dans le cas des jugements, nous reconnaissons que ces regroupements peuvent être artificiels. Aussi, mentionnons que, comme dans le cas de l'ingénierie, la présence et l'explicitation de ces attentes (ou standards) peuvent exiger une certaine expertise de la part de l'individu.

En somme, dans une situation donnée où il a à réaliser une tâche, l'individu se construira une représentation de l'ensemble des attentes cognitives (ou standards) devant être respectées. Selon la situation et le cahier des charges qu'il a construit, il optera pour une ressource conceptuelle plutôt qu'une autre pour réaliser la tâche. Dans cette perspective, si une conception est maintenue en mémoire, c'est qu'elle s'avère un choix au moins occasionnellement satisfaisant.

3.1.2.2 Une critique du modèle des jeux de la connaissance

Ce que nous venons de proposer diffère donc grandement de l'approche isolationniste, souvent présente dans la littérature sur les conceptions multiples. Dans cette section, nous présenterons une critique de cette approche en nous concentrant sur les auteurs qui l'ont adopté le plus clairement dans leur modèle, soit Larochelle et Désautels.

Rappelons que ces auteurs critiquent l'idée que les théories scientifiques viennent se substituer aux conceptions intuitives lors de l'apprentissage des sciences : cela confinerait l'élève à un statut épistémiquement passif de reproducteur des connaissances scientifiques. Ils rejettent l'idée de remplacement en se basant sur leur thèse d'une multiplicité de jeux de la connaissance, chacun étant caractérisé par les postulats, règles et finalités qu'il faut respecter pour pouvoir y jouer, c'est-à-dire pour y produire des connaissances. Parmi les divers jeux de la connaissance, nous

⁶⁰ Parmi les contraintes spécifiées par un cahier des charges cognitif, nous pouvons ajouter celle du respect de certains postulats ontologiques. Un cahier des charges pour une tâche religieuse inclura par exemple le respect du postulat de l'existence de Dieu. Une contrainte analogue se retrouve en ingénierie : il serait probablement inacceptable que les ingénieurs aéronautiques de Boeing optent pour un design très différent d'un avion (un train à haute vitesse par exemple), sous prétexte qu'il respecte l'objectif de transporter des clients entre deux lieux, en un certain temps, pour un certain coût, avec un certain profit, etc. À l'intérieur de notre typologie, nous pourrions rattacher la contrainte du respect des postulats ontologiques à celle du respect de la tradition.

retrouvons ceux de la connaissance ordinaire, scientifique, religieuse, littéraire, magique, etc. Le relativisme de ces auteurs ressort lorsqu'ils affirment qu'il n'existe pas de métajeu qui pourrait venir spécifier qu'un jeu est meilleur qu'un autre; il n'y a donc aucune hiérarchie de valeur possible entre les divers jeux. Dans ce modèle, une conception intuitive n'a pas à être dénigrée lors de l'apprentissage d'une théorie scientifique puisque les deux conceptions appartiennent à des jeux de la connaissance différents : la conception intuitive est valide pour le jeu ordinaire, alors que la théorie scientifique est valide pour le jeu scientifique. Un apprentissage scientifique réussi sera dans cette perspective un apprentissage où l'élève, tout en apprenant les théories scientifiques, comprendra que ce faisant il joue à un jeu de la connaissance différent de celui auquel il jouait jusqu'alors.

Répetons que si nous nous attardons spécifiquement à ce modèle, c'est que, d'une part, il constitue le modèle le plus détaillé parmi les approches isolationnistes, et que d'autre part il s'affiche clairement relativiste. Son analyse nous permettra par conséquent de mieux exposer l'originalité de notre propre approche.

Le problème des jeux distincts

Commençons par mettre en évidence l'une des prémisses employées par Larochelle et Désautels : le caractère distinct des jeux de la connaissance. Cette prémisses est en fait véhiculée par le langage employé par les auteurs :

« On peut ainsi distinguer le jeu de la connaissance ordinaire ou commune du jeu de la connaissance religieuse, ou encore de ceux de la connaissance magique, littéraire, philosophique, historique, scientifique, etc. Chacun de ces jeux, à une époque donnée, a un domaine de légitimité circonscrit par les postulats et les règles qui permettent d'y jouer. » (Larochelle & Désautels, 1992, p. 64)

Sachant que la question de la démarcation entre science et non-science a reçu beaucoup d'attention de la part des épistémologues sans toutefois déboucher sur un consensus,⁶¹ l'approche de Larochelle et Désautels nous apparaît ambitieuse

⁶¹ Laudan (1996, p. 221) est pessimiste quant à la question de la démarcation :

« I will not pretend to be able to prove that there is no conceivable philosophical reconstruction of our intuitive distinction between the scientific and the nonscientific. I do believe, though, that we are warranted in saying that none of the criteria which have been offered thus far promises to explicate the distinction. [...] The evident epistemic heterogeneity of the activities and beliefs customarily regarded as scientific should alert us to the probable futility of seeking an epistemic version of a demarcation criterion. »

lorsqu'ils affirment qu'il est possible de formuler de tels critères de démarcation en se basant sur des règles et postulats, et ce pour *chacun* des jeux de la connaissance existants (ordinaire, scientifique, magique, littéraire, religieux, philosophique, etc.). Sans affirmer que cette tâche est impossible, nous croyons que Larochelle et Désautels ont fort à faire.

Nous sommes donc en droit de nous attendre à un traitement détaillé de cette question. Notamment, deux types de questions nous apparaissent importants : 1) Qu'est-ce qui distingue en pratique deux jeux de la connaissance particuliers (par exemple la connaissance ordinaire et la connaissance scientifique) ? 2) Comment ces deux jeux se sont-ils formés ? Si nous faisons l'hypothèse raisonnable que les jeux n'émergent pas de nulle part et qu'ils sont produits par modification d'un ou plusieurs jeux préexistants, nos deux questions peuvent être ramenées à une seule : À partir de quel point les modifications (dans les engagements, postulats, intentions, etc.) apportées à un jeu A font en sorte que le nouveau jeu B soit distinct du premier, entraînant par le fait même que les connaissances chapeautées par l'un et l'autre ne sont plus en compétition ?

Malheureusement, les auteurs n'ont pas jugé utile de répondre à cette question précise. D'une part, le caractère distinct des jeux est postulé et non démontré, et n'est aucunement abordée la question de l'émergence des nouveaux jeux. D'autre part, ils ne fournissent pas d'analyse comparative des différents jeux qui détaillerait comment ces jeux sont effectivement distincts et en sont venus à l'être historiquement.⁶² En somme, la plausibilité théorique et empirique des jeux de la connaissance reste encore à démontrer.

Ces auteurs suggèrent cependant une piste de réponse lorsqu'ils emploient une analogie entre les jeux de la connaissance et les jeux sportifs comme le tennis et le badminton (1992, p. 65). Exploitions cette piste pour tenter de répondre à leur place à notre question. Tout d'abord, remarquons que dans de tels jeux, les règles sont

⁶² Il est vrai que Larochelle et Désautels (1992) proposent certaines caractéristiques du jeu de la connaissance scientifique : le savoir scientifique est un savoir construit et négocié (p. 79), qui ne suppose aucune intention à l'oeuvre dans l'univers et qui a recours systématiquement à l'expérimentation et à la mathématisation (p. 64). Mais cela est loin de constituer une analyse *comparative* complète.

explicites (il existe des règlements officiels), leur respect ne vient pas par degrés mais est dichotomique (une règle ne peut être respectée qu'à moitié) et elles peuvent être appliquées sans ambiguïté. Dans ces sports, il est aisé de déterminer si un coup est valide ou non, s'il respecte les règles du jeu ou non. De plus, il est facile de distinguer les jeux sportifs entre eux : soit cette partie est une partie de tennis ou elle n'en est pas une; et si c'est une partie de tennis, alors c'est que nécessairement ce ne peut être une partie de badminton. Finalement, un jeu peut être créé à partir d'un autre par l'ajout, le retrait ou la modification de certaines règles; ce jeu est alors clairement distinct du premier. Si Larochelle et Désautels se basent effectivement sur une analogie avec les jeux sportifs (ou de divertissement) et qu'ils transfèrent aux jeux de la connaissance les propriétés d'être explicites, dichotomiques et applicables sans ambiguïté, ils sont donc en mesure de répondre à notre question. Il est cependant difficile de déterminer s'ils attribuent effectivement ces propriétés aux jeux de la connaissance. L'extrait suivant laisse penser qu'ils reprennent au moins l'aspect dichotomique des règles :

« Ainsi, on peut observer que la prédictibilité des phénomènes, habituellement associée au savoir scientifique, est aussi un critère épistémologique implicite du savoir commun dans ses visées pragmatiques. Par contre, on peut se demander si le critère de cohérence logique (inter- et intra-théorique) s'applique également à la connaissance commune. » (Larochelle & Désautels, 1992, p. 68n)

Quoi qu'il en soit, ce transfert hypothétique est problématique. La connaissance scientifique (ou ordinaire, littéraire, etc.) n'apparaît pas être soumise à un ensemble complet et fermé de règles explicites, applicables sans ambiguïté et respectées de manière dichotomique, règles qui suffiraient à la distinguer de celles des autres jeux. Par exemple, aucun règlement officiel n'est invoqué par les scientifiques pour régler définitivement leurs disputes; aussi, des jugements comme « est plus cohérent que », « résout l'inconsistance de manière progressive » ne peuvent bien souvent être appliqués avec clarté qu'avec un certain recul. Selon nous, plus irréaliste encore est l'idée que la présence des règles est dichotomique : la consistance serait une règle du jeu de la connaissance ordinaire ou elle ne le serait pas. Dans notre approche par cahier des charges, un critère vient par degré d'importance : il ne s'agit pas de déterminer si le requis de prédictivité et celui de consistance font partie des éléments du cahier des charges, mais plutôt de se demander quel est le poids accordé au pouvoir prédictif et celui à la consistance lors de la réalisation d'une tâche.

Une telle approche nous apparaît plus réaliste, mais la thèse de jeux de la connaissance se prête mal à cette nuance. En effet, supposons un instant que dans cette approche les jeux soient définis par leur pondération des différentes règles cognitives possibles (certaines pouvant par exemple avoir un poids nul, d'autres un poids très élevé). Qu'arrive-t-il si le poids d'une règle est modifié, ne serait-ce que légèrement ? Sommes-nous en présence d'un nouveau jeu ? Si Larochelle et Désautels affirment que non, c'est qu'ils reconnaissent une certaine flexibilité dans la pondération définissant les différents jeux (mais quelle est l'ampleur de cette flexibilité ?). Dans une telle approche, la frontière d'un jeu semble encore plus problématique, plus floue, car les différents jeux sont alors davantage susceptibles de se recouper. Par contre, si ces auteurs affirment que nous sommes en présence d'un nouveau jeu, c'est qu'ils autorisent une prolifération extrême du nombre de jeux : il existerait alors autant de jeux de la connaissance qu'il existe de façons de pondérer les différentes règles, c'est-à-dire une infinité. Le nombre de ces jeux serait alors tel que nous pourrions probablement associer à n'importe quelle conception un jeu de la connaissance qui la valoriserait.

Du fait de ces arguments, l'analogie entre jeux de la connaissance et jeux sportifs s'avère une piste de réponse qui nous apparaît problématique. La plausibilité de la thèse de l'existence de jeux de la connaissance distincts reste encore à démontrer.

Le relativisme des jeux de la connaissance

Le modèle de Larochelle et Désautels est relativiste : l'explication magique d'une soudaine maladie peut s'avérer tout aussi « vraie » ou « valide » qu'une explication scientifique, si on reconnaît que chacune appartient à un jeu de la connaissance particulier.

Afin de caractériser le relativisme de ce modèle, présentons ce que Laudan (1984) appelle le modèle hiérarchique de la justification, une solution qu'il juge populaire à la question de la formation du consensus en science. Au niveau de base se trouvent les débats factuels, par exemple entre deux théories concurrentes. Dans ce modèle, les désaccords factuels sont résolus par le recours aux règles méthodologiques, c'est-à-dire à des injonctions sur les attributs souhaités (par exemple, la testabilité) ou à éviter (par exemple, les hypothèses ad hoc). Mais il arrive que les scientifiques soient

en désaccord au sujet de ces règles méthodologiques (ce qui peut être à l'origine d'un désaccord factuel). Celui-ci est à son tour réglé par la référence à un niveau justificatif plus élevé, soit celui des visées poursuivies par la science (par exemple, la vérité, la simplicité, l'efficacité, etc.). Selon ce modèle, les controverses sur les visées sont inexistantes ou encore insolubles.⁶³

À l'aide de cette hiérarchie de la justification, nous pouvons identifier différentes familles de relativisme. D'abord, un relativisme épistémique affirmerait que même s'il est possible d'avoir un consensus au niveau des règles et des visées, celles-ci sous-déterminent le choix des théories de sorte que toutes les théories peuvent être rationnellement maintenues. Un relativisme méthodologique soutiendrait quant à lui que les règles méthodologiques sont irrémédiablement sous-déterminées par les visées, l'adoption d'une règle étant alors l'affaire d'une décision subjective. Finalement, un relativisme axiologique consisterait à dire que les controverses sur les visées sont irrésolubles et donc le choix de ces dernières subjectif.

Le modèle des jeux de la connaissance ne défend pas un relativisme épistémique : à l'intérieur d'un jeu, Larochelle et Désautels reconnaissent que certaines théories l'emportent sur d'autres (autrement dit, que certains coups sont meilleurs que d'autres). Leur relativisme serait plutôt de la deuxième espèce. En effet, les divers jeux de la connaissance auraient en commun d'avoir comme objectif de parvenir à produire de la connaissance, et bien que les auteurs ne spécifient pas ce qu'ils entendent par connaissance, il est raisonnable supposer que leur définition vaut pour tous les jeux.⁶⁴ Ce qui varie d'un jeu à l'autre, ce sont donc les méthodes (règles) que l'on juge efficaces pour s'approcher de, voire atteindre, l'objectif qu'est la production de connaissances. Leur relativisme provient du fait que ces auteurs rejettent

⁶³ Laudan résout cette situation en rejetant le modèle hiérarchique et en proposant un modèle « réticulé » (ou triadique), où chacun des trois niveaux peut être influencé par ce qui se passe aux autres niveaux de justification.

⁶⁴ Larochelle et Désautels affirment qu'un jeu de la connaissance est « un jeu très sérieux, qui comporte tout de même un caractère ludique, notamment par sa non-prétention explicite à la vérité et à la divulgation de la réalité. » (1992, p. 64) Ce passage montre bien l'antiréalisme de ces auteurs, mais outre cette définition négative, ils disent bien peu sur ce qu'ils entendent par « connaissance ». Quoi qu'il en soit, nous pensons que cet antiréalisme n'est pas partagé par les joueurs des divers jeux de la connaissance : chacun a bel et bien la prétention de produire une connaissance vraie dévoilant un aspect de la réalité. Cette attitude est d'ailleurs souhaitable : l'obtention de la vérité constitue un idéal régulateur de l'activité cognitive, pour reprendre les termes de Robert.

d'emblée tout « métajeu » qui pourrait venir établir que les connaissances d'un jeu sont supérieures à celles d'un autre. Il affirment donc que les règles ne peuvent être évaluées rationnellement et proviennent en conséquence de choix subjectifs.⁶⁵

Même si l'on juge que la formulation a priori de règles n'a pas donné des résultats convaincants dans l'histoire de l'épistémologie, il ne faut pas conclure qu'un subjectivisme est la seule option restante. Plusieurs épistémologues préconisent une approche naturaliste. Laudan (1996, ch. 7) propose par exemple de considérer une règle comme un moyen de favoriser l'atteinte d'une visée spécifiée. Laudan donne en exemple la règle poppérienne « éviter les hypothèses ad hoc », qui doit être en fait formulée comme « si on veut développer des théories qui prennent un risque, il faut éviter les hypothèses ad hoc ». Dans cette perspective, les règles sont des énoncés à propos de moyens de réaliser des fins, des énoncés qui peuvent donc être testés quant à leur efficacité. Étant donnée une fin, il sera donc empiriquement possible de déterminer quelles sont les règles qui favorisent le plus son atteinte. Le choix des règles en fonction d'une visée peut donc avoir une base rationnelle.

Prenons un exemple pour illustrer la différence entre la position de Laudan et celle de Larochelle et Désautels. Supposons un jeu de la connaissance défini par les deux règles suivantes : « préférer les théories qui ont un faible pouvoir prédictif » et « rechercher la maximalisation de l'incohérence »; selon nos deux auteurs, ce jeu ne serait pas pire ou meilleur que le jeu de la connaissance ordinaire ou de la connaissance scientifique. Mais qui voudrait employer une conception valorisée par ce jeu pour ne serait-ce que traverser à pied un boulevard achalandé ? Personne n'accepterait de soutenir l'idée que cette conception représente une connaissance, mais c'est pourtant ce que Larochelle et Désautels nous suggèrent. Dans l'approche de Laudan, l'efficacité de ces deux règles à produire de la connaissance⁶⁶ pourrait être évaluée empiriquement, et ce constat pourrait alors servir d'argument pour les accepter ou les rejeter sur une base rationnelle (et nul doute que d'autres leur seraient rapidement préférées).

⁶⁵ Comme le souligne Laudan (1996, p. 15), cette forme de relativisme n'est pas exclusive à certaines positions post-positivistes, puisque les positivistes logiques adoptaient eux-mêmes une position subjectiviste radicale aux niveaux méthodologique et axiologique.

⁶⁶ En supposant une définition minimale et non circulaire de ce que constitue une connaissance.

Justification épistémologique vs justification pragmatique du non-remplacement

Afin de justifier l'idée de non-substitution de la conception initiale par la conception scientifique, Larochelle et Désautels ont recours à une thèse épistémologique assez radicale. Bien que deux individus jouant à des jeux de la connaissance différents tentent de produire de la connaissance, la valeur épistémique de leurs efforts n'est pas comparable du fait qu'ils ont employé des règles de productions différentes et arbitraires. Autrement dit, les conceptions valorisées par deux jeux de la connaissance distincts ne sont pas en compétition.

Mais pour s'opposer à une substitution psychologique des conceptions lors de l'apprentissage, il n'est pas nécessaire de recourir à une thèse de non-remplacement au niveau épistémique. En effet, nous pensons qu'une conception de statut épistémique plus bas qu'une alternative (par exemple : fausse, moins complète, etc.) peut conserver une pertinence psychologique si elle possède une utilité. Nous proposerons dans la section 3.2 que des conceptions concurrentes peuvent posséder une utilité psychologique importante pour la compréhension des conceptions scientifiques. Mais pour l'instant, limitons-nous à un argument d'utilité pragmatique : si un individu vise à être globalement efficace sur une gamme variée de tâches cognitives, il sera avantageux pour lui d'avoir à sa disposition une palette diversifiée d'alternatives conceptuelles, chacune ayant ses points forts. Alors qu'elle est rejetée par Larochelle et Désautels, l'idée de compétition entre les conceptions prend ici une place importante : parmi les conceptions disponibles, l'emporte celle qui est la plus utile à l'accomplissement de la tâche envisagée. Cette compétition doit être comprise comme multidimensionnelle, ses termes étant définis par un cahier des charges complexe. Or, le contenu d'un cahier des charges est susceptible de varier, en partie ou complètement, en fonction de la tâche. Le vainqueur pouvant changer d'une tâche à l'autre, la possession d'un éventail d'alternatives conceptuelles constitue un avantage, même si ces dernières n'ont pas le même statut épistémique.⁶⁷

⁶⁷ Notre position est semblable à celle de Gérard Fourez (2003). Cet auteur reprend une analogie entre les modèles et les cartes pour montrer la validité d'une pluralité de modèles :

« [L]a vraie carte existe-t-elle ? Une carte est-elle vraie ou fausse ? Sans doute faut-il modifier la façon d'aborder cette question, car on ne parle pas de la vérité d'une carte, mais de son adéquation ou de sa pertinence. L'interrogation primordiale est sans doute à reformuler : 'Est-elle appropriée au projet qu'elle est censée appuyer ? Bref, l'essentiel, pour une carte, c'est d'être

Contexte de production et contexte d'utilisation

Associée à la différence entre la justification épistémologique relativiste et la justification pragmatique de la thèse du non-remplacement se trouve une différence dans l'activité invoquée. Dans le modèle de Larochelle et Désautels, un jeu est caractérisé par les engagements épistémologiques et ontologiques qui régulent l'évaluation de ses connaissances, et ce, avant tout dans le contexte de leur production (incluant leur acceptation). Selon eux, il existe plusieurs façons incomparables de produire des connaissances, ce qui justifie le fait que les connaissances produites par ces façons différentes soient elles-mêmes incomparables quant à leur valeur.

Par opposition, nous croyons que l'activité cognitive humaine consiste plus souvent en l'utilisation des connaissances qu'en la production de nouvelles. L'appropriation du savoir scientifique et sa mise en application s'avèrent être un objectif important de l'éducation qu'il ne s'agit pas de nier ou de mépriser, et ce, même si nous désirons éviter de former des citoyens incapables de créativité et de remise en question.⁶⁸ En conséquence, il nous apparaît davantage pertinent de tenter de justifier et d'élaborer la perspective des conceptions multiples en didactique par l'étude du contexte d'utilisation que par celle du contexte de production. Et du point de vue de l'utilisation des connaissances, le modèle des jeux de la connaissance nous semble peu pertinent. En effet, dans ce modèle le sujet doit d'abord identifier le jeu de la connaissance auquel la situation renvoie pour ensuite employer la conception valorisée par ce jeu. Mais nous voyons difficilement comment certains éléments du

adéquate au projet qu'on veut discuter à partir d'elle. Il y a une infinité de cartes possibles et chacune d'elle peut avoir de la valeur, mais elles ne sont pas équivalentes; certaines sont meilleures que d'autres par rapport à certains projets. » (p. 30)

Fourez semble cependant effacer toute distinction entre vérité et utilité lorsqu'il enchaîne en disant :

« On ne dit donc pas d'une carte qu'elle est vraie ou fausse, mais qu'elle adéquate au projet que l'on a. C'est ce qui la rendra plus ou moins valable. Dans cette perspective, on abandonne l'idée que la meilleure carte existerait dans l'absolu; on se contente de la valeur en relation à des projets. » (p. 30)

Nous affirmons avec Fourez qu'au niveau pragmatique il n'existe pas de meilleure carte dans l'absolu : la valeur d'une carte est relative au projet pour lequel elle est employée. Mais contrairement à lui, nous continuons à considérer qu'il existe des cartes épistémiquement supérieures à d'autres. Autrement dit, reconnaître que plusieurs modèles nous sont utiles dans diverses situations ne nous force pas à conclure qu'aucun de ces modèles n'est plus vrai que les autres. La notion de vérité garde une place pertinente en science, ne serait-ce qu'au niveau méthodologique.

⁶⁸ D'ailleurs, mentionnons qu'utilisation de connaissances et production de connaissances ne sont pas en opposition : l'utilisation des connaissances peut exiger amplement de créativité et d'esprit critique.

processus de production des connaissances, comme la négociation du savoir pour le jeu scientifique, deviennent des facteurs nécessairement importants lorsque vient le temps de déterminer si l'utilisation de la physique newtonienne est pertinente pour tel problème.

Cette divergence de foyer d'intérêt entre notre approche et celle de Larochelle et Désautels se reflète d'ailleurs dans le choix des métaphores employées. Ces derniers récupèrent la notion de « jeu », qui renvoie dans le langage courant à l'invention par l'individu de certaines stratégies, devant respecter des règles (arbitraires), dans un cadre plutôt ludique (« sans prétention à la vérité »). Nous employons plutôt la notion de « cahier des charges », qui elle renvoie à un processus de résolution de problème, dans une situation imposant un ensemble multidimensionnel de contraintes, où existe l'espoir parfaitement sérieux d'arriver à une solution satisfaisante.

	Modèle de Larochelle et Désautels	Notre approche
Métaphore	jeu	cahier des charges
Domaine d'origine	sport, divertissement	ingénierie
Contexte	production des connaissances	utilisation des connaissances
Activité	utilisation de stratégies respectant les règles	résolution de problèmes dans une situation comportant des contraintes variées
Objectif	sérieux mais ludique (non-prétention à la vérité)	obtention d'une solution satisfaisante

Tableau 1. Tableau comparant notre métaphore et celle employée par Larochelle et Désautels.

La thèse des jeux de la connaissance dans un sens sociologique

Malgré notre opposition au modèle relativiste des jeux de la connaissance distincts, celui-ci nous amène cependant à reconnaître qu'il arrive souvent que plusieurs des éléments des cahiers des charges soient spécifiés en bloc et soient contrôlés par des communautés.

Par exemple, à l'intérieur de la science professionnelle, nous retrouvons un objectif global commun (développer le répertoire des théories dites scientifiques), la présence de nombreux et exigeants standards épistémologiques, possiblement celle de certains standards pragmatiques ou de certaines contraintes cognitives, et une certaine souplesse dans les postulats ontologiques. Par comparaison, la vie courante

nous amène à accorder une place beaucoup plus importante aux standards cognitifs et à ceux sociaux ou affectifs.

La situation est analogue dans le domaine de l'ingénierie aéronautique : les agences gouvernementales imposent en bloc de très nombreux standards aux concepteurs, ces standards étant spécifiques à la classe d'appareils concernée. Le respect de ces standards conduit à la certification du modèle développé, ce qui constitue en quelque sorte son approbation sociale. Ceci nous amène à penser que, dans le domaine cognitif, les institutions sociales peuvent servir à regrouper et stabiliser le contenu des cahiers des charges qu'ils imposent et dont ils contrôlent le respect. À notre avis, l'idée des jeux de la connaissance ne devient plausible que pour ces cas où le contrôle institutionnel est très marqué : les cahiers des charges sont alors suffisamment eux-mêmes explicites et standardisés et pour s'apparenter à des « règles » institutionnelles devant être observées.

Nous soutenons toutefois que ces regroupements ne sont pas nécessaires, que ces institutions (l'école, les centres de recherche, les différentes agences gouvernementales en aéronautique, l'Église catholique, etc.) ne contrôlent la réalisation que d'une partie du continuum des tâches cognitives que nous effectuons, et qu'entre les cahiers des charges que nous nous imposons dans nos tâches n'existent fondamentalement que des différences de degrés. Autrement dit, le modèle de Larochelle et Désautels nous amène à ajouter un volet sociologique à notre approche, mais celui-ci préserve nos objections épistémologiques présentées plus haut.

3.1.2.3 Commentaire synthèse

L'objectif de la section 3.1 a été de nous affranchir de certaines présuppositions dans les recherches sur le changement conceptuel et plus particulièrement dans celles s'intéressant aux conceptions multiples. Une émancipation importante se trouve dans le rejet de l'approche isolationniste, où l'activité cognitive est séparée régions distinctes et indépendantes qui encapsuleraient les différentes conceptions à propos d'un même phénomène de manière à empêcher leur compétition et ainsi expliquer leur coexistence. Nous nous sommes opposé à cette approche en examinant spécifiquement le modèle de Larochelle et Désautels. Notre critique se compose essentiellement de deux arguments, le premier portant sur les difficultés

conceptuelles que pose la thèse de l'existence de jeux distincts, le deuxième mettant en évidence la nature relativiste du modèle et critiquant les prémisses qui en sont responsables. Cet examen nous a permis de remarquer que c'est par une thèse épistémologique (relativiste) que ces chercheurs justifient l'idée du non-remplacement des conceptions, alors que notre approche se base plutôt sur des raisons pragmatiques compatibles avec un rationalisme critique.

L'approche que nous préconisons est donc d'éliminer toute forme d'encapsulation en permettant aux conceptions alternatives d'être en compétition pour une même tâche cognitive. Si une conception l'emporte sur une autre, cela est dû aux exigences de la tâche (le cahier des charges perçu) et aux attributs des différentes conceptions. Ces attributs constituent des ressources importantes pour prendre la décision d'employer l'une ou l'autre des alternatives (nous reviendrons sur ce point à la section 3.2.5). Il est apparu insuffisant et peu plausible de ne permettre au sujet de n'associer qu'un attribut à une conception : par exemple, sa vérité ou sa fausseté, ou encore son statut. Nous avons préféré lui donner la possibilité de porter toute une gamme de jugements à l'endroit de ses conceptions, ce qui lui permet d'effectuer un choix entre elles en fonction des caractéristiques de la tâche. Notre première critique (section 3.1.1) s'est donc avérée essentielle à notre approche par cahier des charges.

3.2 LA COMPLEXIFICATION CONCEPTUELLE

Dans la perspective du constructivisme modeste, l'idée d'apprentissage par création de liens est fondamentale :

« Le savoir se construit graduellement, et, lors de cette construction graduelle, l'apprenant met en relation ce qu'il connaît déjà avec les nouvelles informations qui lui sont présentées; les nouvelles connaissances sont en conséquence placées en interaction avec les connaissances antérieures. » (Tardif, 1992, p. 32)

Il y a déjà plus de quarante ans, David Ausubel a souligné l'importance de ces liens pour un apprentissage significatif. En particulier, le processus de réconciliation intégrative est essentiel, mais souvent négligé par l'enseignement compartimenté (par exemple dans l'approche par objectifs) :

« The principle of integrative reconciliation in programming instructional material can be best described as antithetical in spirit and approach to the ubiquitous practice among textbook writers of compartmentalizing and segregating particular ideas or topics within their respective chapters or subchapters. Implicit in this later practice is the assumption (perhaps logically valid, but certainly psychologically untenable) that pedagogic considerations are adequately served if overlapping topics are handled in self-contained fashion, [with] the assumption that all necessary cross-referencing of related ideas can be satisfactorily, and customarily is, by students. Hence little serious effort is made explicitly to explore relationships between these ideas, to point out significant similarities and differences, and to reconcile real or apparent inconsistencies. » (Ausubel, 1968, p. 155)

L'organisation du contenu d'enseignement sous forme d'une trame séquentielle est souvent naturelle et nécessaire; Ausubel critique plutôt l'absence d'efforts visant à promouvoir l'intégration de ces connaissances en un tout densément connecté et donc significatif. Ceci vaut non seulement pour l'apprentissage de systèmes conceptuels complexes, mais aussi pour l'apprentissage de systèmes conceptuels concurrents, ou « parallèles » :

« The principle of integrative reconciliation also applies when subject matter is organized along parallel lines, that is, when related materials are presented in serial fashion but there is no *intrinsic* sequential dependence from one topic to the next. [...] This situation, for example, prevails in presenting alternative theoretical positions in ethics, religion, and epistemology; opposing theories of biological evolution; and different systems of learning and personality theory. » (Ausubel, 1968, p. 155)

Pour ces apprentissages parallèles, des liens cognitifs importants doivent être tissés entre les éléments de connaissance, de manière à pouvoir discriminer les alternatives de même que pour pouvoir gérer leur inconsistance au sein de la mémoire :

« Hence, for learning of the unfamiliar new ideas to take place, they must be adequately discriminable from the established familiar ideas; otherwise the new meanings are so

permeated with ambiguities, misconceptions, and confusions as to be partially or completely nonexistent in their own right. [...]

In some instances of meaningful learning and retention, the principal difficulty is not one of discriminability but of apparent contradiction between established ideas in cognitive structure and new propositions in the learning materials. Under these conditions the learner may dismiss the new propositions as invalid, may try to compartmentalize them as isolated entities apart from previously learned knowledge, or may attempt integrative reconciliation under a more inclusive subsumer. Compartmentalization, of course, may be considered a common defense against forgetting. By arbitrarily isolating concepts and information, one prevents interaction with and obliterative subsumption by relevant concepts in cognitive structure. This is a modified variety of rote learning in which new learning material is allowed to interact with only certain of several potential subsumers. Through over-learning, relatively stable subsumption may be achieved, but the fabric of knowledge as a whole is unintegrated and full of internal contradictions, and is therefore not very viable on a long term basis. » (Ausubel, 1968, p. 156)

Ces quelques passages sont très pertinents pour la perspective des conceptions multiples. Ils nous permettent d'effectuer une dernière critique à l'endroit de l'approche isolationniste. En effet, les auteurs qui adoptent cette approche ont tendance, en proposant de compartimenter la cognition en sphères indépendantes, à déboucher sur une isolation conceptuelle (sémantique); l'intérêt à vouloir relier entre elles les conceptions semble limité.⁶⁹ Mais dans notre perspective cette tendance est absente puisque toutes les conceptions alternatives appartiennent à une seule et même sphère d'activité cognitive.

Dans cette section 3.2, nous nous fixons comme objectif de proposer un éventail diversifié de structures cognitives pouvant lier entre elles deux conceptions alternatives et venir supporter la compréhension de ces dernières. Nous proposons dans ce qui suit cinq types structures, toutes définies par la fonction principale qu'elles jouent : 1) les structures descriptives, qui pointent les spécificités de chaque conception; 2) les structures évaluatives, qui comparent leur valeur épistémique; 3) les structures explicatives, qui identifient des causes à la conception de statut épistémiquement inférieur; 4) les structures transformatives, qui représentent les transformations devant être effectuées sur une conception pour obtenir son alternative; et 5) les structures décisionnelles, qui ont comme fonction de permettre le choix d'une conception parmi les diverses alternatives lors de la réalisation d'une tâche.

⁶⁹ Une exception nette est Mortimer (1995), qui mentionne explicitement le besoin de relier entre eux les conceptions appartenant à différentes zones du profil conceptuel.

L'expression « complexification conceptuelle » que nous avons choisie pour désigner notre approche a originalement été proposée par Larochelle et Désautels (1992) comme alternative s'opposant à celle de « changement conceptuel ». Cette expression s'avère particulièrement appropriée, car tout en marquant une appartenance au programme de recherche sur le changement conceptuel, elle renvoie à l'idée d'un apprentissage faisant intervenir une connaissance résultante plus complexe. Le Petit Robert définit l'adjectif « complexe » comme suit : « qui contient, qui réunit plusieurs éléments différents. » En ce sens, le modèle des jeux de la connaissance fait donc bel et bien intervenir une complexification conceptuelle.

Nous pensons cependant que cette expression peut être employée dans un sens plus fort, sens auquel le modèle des jeux de la connaissance ne fait pas appel. En effet, le Petit Robert définit le nom « complexe » comme étant « une construction formée de nombreux éléments *coordonnés*. » En prenant la racine du mot « complexification » dans ce sens, l'expression « complexification conceptuelle » renvoie maintenant à la coordination de plusieurs conceptions entre elles, à leur intégration au sein d'une structure cognitive élaborée, plus riche par cette intégration même que la somme des conceptions qu'elle comprend. Dans ce sens fort, cette expression annonce l'adoption d'une perspective clairement non isolationniste. Voyons maintenant quelles structures peuvent être envisagées pour que s'intègrent au sein d'un « complexe cognitif » de multiples de conceptions alternatives.

3.2.1 Les structures descriptives

Dans l'étude des conceptions multiples, il serait étrangement banal d'effectuer une affirmation du type : « Les élèves doivent apprendre une nouvelle conception et remarquer qu'elle est différente de la conception antérieure. » Cette affirmation dissimule cependant un point important : on retrouve souvent dans la littérature sur le changement conceptuel des énoncés métacognitifs tels « l'élève doit remarquer (prendre conscience, réaliser, etc.) que sa conception est ... », mais ceci n'est jamais modélisé sous la forme d'une structure cognitive au même titre que les conceptions elles-mêmes. Nous appellerons « structure descriptive » la structure cognitive qui a

comme fonction de comparer les conceptions concurrentes, d'identifier leurs particularités et, dans certains cas, d'effectuer une traduction.

L'idée de structure descriptive n'est pourtant pas récente : David Ausubel a depuis longtemps souligné l'importance de la discrimination des idées au sein de la structure cognitive. Sous sa plume, ce sont les « organisateurs comparatifs » qui accomplissent cette fonction.

« Organizers may also be expressly designed to further the principle of integrative reconciliation. They do this by explicitly pointing out in what ways previously learned, related concepts in cognitive structure are either basically similar to or essentially different from new ideas in the learning task. [...] This maneuver effects great economy of learning effort, avoids the isolation of essentially similar concepts in separate, noncommunicable compartments, and discourages the confusing proliferation of multiple terms to represent ostensibly different but essentially equivalent ideas. In addition, organizers increase the discriminability of genuine differences between the new learning materials and analogous but often conflicting ideas in the learner's cognitive structure. » (Ausubel, 1968, pp. 156-157)

Un organisateur comparatif accomplit donc deux fonctions. Pour des concepts identiques ou similaires, il produit une économie cognitive en permettant à un même concept d'être employé dans plus d'une théorie. Pour des concepts différents, l'organisateur expose cette différence et en fait un objet de cognition en soi venant s'interposer entre les deux théories, diminuant ainsi la probabilité de les confondre.

En quoi consistent ces ressemblances et ces différences ? Cela dépend du modèle que l'on déploie pour penser les conceptions des apprenants. Dans le modèle de Chi, elles sont exprimées en termes de catégories ontologiques; dans le modèle de Vosniadou, elles peuvent se situer au niveau des présuppositions ontologiques et épistémologiques; dans l'approche par modèles (Chinn et Samarapungavan), les différences et les ressemblances sont au niveau des entités, de leurs propriétés, des types modèles employés, ou encore du type de causalité impliquée; etc. Nous n'avons pas besoin ici d'adopter une approche particulière.

Comme premier exemple, prenons les relations conceptuelles entre les théories géocentrique et héliocentrique. La révolution copernicienne a constitué un changement conceptuel de premier plan dans l'histoire des sciences, où la hiérarchie des objets formant l'univers a été profondément repensée (voir la figure 11). Par exemple, dans la cosmologie d'Aristote, développée notamment par Ptolémée, l'univers comprend deux parties : une partie terrestre qui est centrale, et une partie

céleste où se retrouvent les astres, qui sont positionnés soit à un endroit fixe sur une sphère en rotation (les étoiles fixes), soit sur une sphère indépendante en mouvement par rapport à la sphère des étoiles fixes (les planètes). Avec Copernic, le système conceptuel est chamboulé : la distinction entre corps céleste et corps terrestre se dissout, la Terre devenant une planète; les planètes ne constituent plus un type particulier d'étoiles; la Lune devient un satellite alors que le Soleil devient une étoile semblable aux innombrables autres appartenant au firmament.

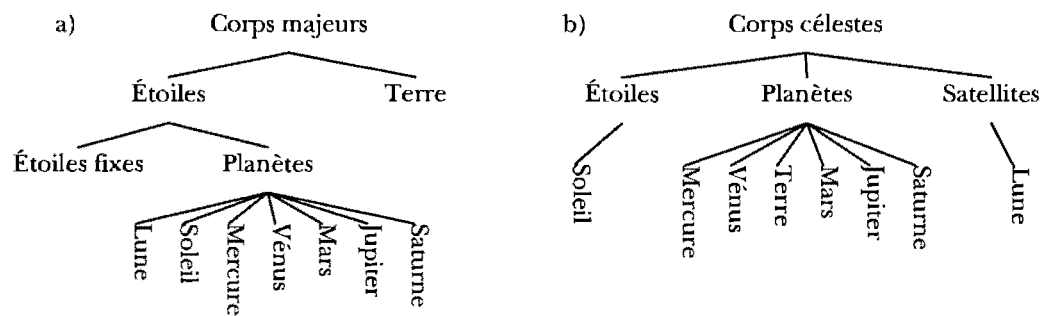


Figure 11. Les systèmes conceptuels a) de Ptolémée, b) de l'astronomie moderne. Les lignes indiquent une appartenance. Tiré de Thagard (1992, pp. 194-195).

Idéalement, pour quiconque apprend la conception héliocentrique à partir d'une conception de type géocentrique, l'apprentissage ne devrait pas se limiter à la seule compréhension des deux systèmes, qui risqueraient d'être rapidement réduits à « Terre au centre » versus « Soleil au centre ». Il s'agit également d'apprécier les différences et les ressemblances conceptuelles, de pouvoir les commenter et discuter de leur importance, d'être capable d'effectuer une traduction interprétative des affirmations faites dans le cadre d'une conception dans le langage d'une autre. Autrement dit, chacune des deux conceptions peut être comprise de l'intérieur, par sa logique interne, mais nous pensons qu'une partie importante de la signification de chacune peut être obtenue à l'aide de liens contrastants et interprétatifs dirigés vers ses alternatives.

Un deuxième exemple est l'apprentissage des lois de Newton, qui s'avère souvent problématique comme nous l'avons vu au premier chapitre. Dans la théorie newtonienne, le maintien d'un mouvement constant (en grandeur et en direction) n'a pas à être expliqué : il constitue un idéal d'ordre naturel (Toulmin, 1961). Un objet ne dévie de cet idéal que par la présence d'une cause, par l'application d'une

force nette. Au contraire, dans une conception de type impétus (souvent possédée par les élèves), le mouvement d'un objet doit, pour perdurer, être entretenu par l'application d'une force. L'idéal d'ordre naturel est pour un objet d'être au repos (ou de se diriger vers cet état). L'apprentissage implique donc une modification profonde de ce qui est évident et de ce qui requiert explication. À notre avis, une compréhension solide des deux premières lois de Newton nécessite davantage que la seule acquisition de « nouvelles évidences », d'un nouveau sens du mécanisme (diSessa) : il s'agit également d'être capable de contraster les deux mécaniques, d'exposer l'inconsistance de ces deux « évidences » afin de mieux apprécier leur existence et leurs originalités. Comme le mentionne Toulmin, l'appréciation de ces idéaux d'ordre naturel se fait difficilement de l'intérieur :

« There is only one way of seeing one's own spectacles clearly: that is, to take them off. It is impossible to focus both on them and through them at the same time. A similar difficulty attaches to the fundamental concepts of science. We see the world through them to such an extent that we forget what it would look like without them: our very commitment to them tends to blind us to other possibilities. » (Toulmin, 1961, p. 101)

Dans la défense de son « anarchisme méthodologique », Feyerabend nous donne un argument similaire :⁷⁰

« Comment nous est-il possible d'étudier quelque chose dont nous nous servons tout le temps ? Comment pouvons-nous analyser les termes dans lesquels nous avons l'habitude de formuler nos observations les plus simples et les plus directes, et révéler leurs présuppositions ? La réponse est claire : nous ne pouvons pas le découvrir de l'intérieur. Il nous faut une norme critique externe; il nous faut un jeu d'hypothèses de rechange [...]. » (Feyerabend, 1979, p. 29)

Un système conceptuel alternatif constitue ainsi ce point de vue externe qui permet de contempler ce qui de l'intérieur est trop évident pour être remarqué puisque constitutif de la pensée. Les structures descriptives révèlent ces évidences, soulignent leur importance, et facilitent par conséquent le passage d'un système conceptuel à l'autre.⁷¹

⁷⁰ Feyerabend suggère qu'une prolifération des théories favorisera l'avancement des théories scientifiques. Il défend une version radicale de cette thèse et il n'est pas nécessaire de le suivre sur cette voie.

⁷¹ De plus, une théorie alternative, même trop radicale pour être crédible, peut stimuler la créativité. Par exemple en psycholinguistique, Steven Pinker (2007, p. 91) souligne l'importance de comprendre la théorie de Jerry Fodor en plus de la sienne :

« Not only is it a matter of fairness to acknowledge alternatives to the theory I am advancing; it's a matter of clarity and discovery. Much can be gained by contrasting a theory with its

Ceci nous apparaît constituer un rôle important joué par les théories scientifiques historiques dans l'enseignement des sciences. Même si l'aide à la compréhension des concepts apparaît généralement dans la liste des arguments en faveur de l'inclusion de l'histoire des sciences dans le curriculum (voir par exemple Matthews, 1994, pp. 49-54), ce thème n'est pas vraiment développé. Monk et Osborne sont peut-être les plus explicites à ce niveau :

« The study of scientific ideas in their original context of discovery will help to develop students' conceptual understanding:

- because historical thinking often parallels their own;
- because the now accepted idea was often strongly opposed for similar reasons to those proffered by students; and
- because it highlights the contrast between thinking then, and now, bringing into a sharper focus the nature and achievement of our current conceptions. » (Monk & Osborne, 1997, p. 409)

L'incommensurabilité sémantique

L'incommensurabilité des paradigmes est un thème de la théorie kuhnienne qui a causé beaucoup de remous en épistémologie. Dans sa formulation d'origine, cette thèse est assez large et implique que les scientifiques oeuvrant à l'intérieur de paradigmes concurrents vivent dans des mondes conceptuels différents dont la valeur ne peut être comparée objectivement. Si cela s'avérait vrai, toute forme d'échange ou même de communication entre partisans de paradigmes opposés serait fondamentalement vouée à l'échec. En ce qui nous concerne, l'irrévocabilité de cet isolement conceptuel rendrait futile toute tentative de créer des structures descriptives, chargées de relier entre elles des conceptions alternatives au niveau sémantique.

Cependant, Kuhn a éventuellement restreint la thèse de l'incommensurabilité à son aspect sémantique et lui a donné une envergure locale (Hoyningen-Huene, 1993, p. 213) :

« The claim that two theories are incommensurable is then the claim that there is no language, neutral or otherwise, into which both theories, conceived as sets of sentences, can

alternatives, even ones that look too extreme to be true. You can only really understand something when you know what it is *not*. »

Pinker cite ensuite Daniel Dennett au sujet de l'utilité de l'extrémisme de Jerry Fodor :

« Most philosophers are like old beds: you jump on them and sink deep into qualifications, revisions, addenda. But Fodor is like a trampoline: you jump on him and he springs back, presenting claims twice as trenchant and outrageous. If some of us can see further, it's from jumping on Jerry. »

be translated without residue or loss. [...] Most of the terms common to the two theories function the same way in both; their meanings, whatever those may be, are preserved; their translation is simply homophonic. Only for a subgroup of (usually interdefined) terms and for sentences containing them do problems of translatability arise. » (T. S. Kuhn, 1982/2000, p. 36)

L'incommensurabilité de deux théories T_1 et T_2 n'empêche pas leur compréhension simultanée : les scientifiques et les historiens des sciences n'y éprouvent pas là une difficulté insurmontable (Giere, 2006, p. 83). En didactique, Flores-Camacho et ses collègues (Flores-Camacho, Gallegos-Cazares, Garritz, & Garcia-Franco, 2007) ont conclu que la majorité des modèles de la structure de la matière que leurs sujets (étudiants universitaires en chimie) possédaient étaient en fait incommensurables (selon des critères d'incommensurabilité inspirés de Carrier (2001)). L'incommensurabilité n'empêchait pas ces étudiants d'avoir un profil conceptuel comportant plusieurs modèles. Ces auteurs ont remarqué toutefois que les étudiants n'étaient pas conscients de cette incommensurabilité.

Kuhn compare l'apprentissage de T_2 à l'acquisition d'un nouveau langage : les relations qu'entretiennent les concepts de T_2 doivent parfois être apprises de l'intérieur, sans référence à T_1 . Ce bilinguisme ne doit pas être confondu avec une capacité à *traduire* les deux langages l'un dans l'autre : une traduction (au sens strict) n'est possible que si l'individu peut systématiquement substituer les mots ou les chaînes de mots d'un texte de manière à produire un texte équivalent dans l'autre langage (T. S. Kuhn, 1982/2000, p. 38). Or, c'est précisément ceci qui s'avère problématique dans le cas de deux théories incommensurables. Mais l'impossibilité d'une traduction (linguistique ou théorique) au sens strict n'entraîne aucunement l'impossibilité d'une traduction dite interprétative. Il s'agit alors d'effectuer une traduction plus souple en effectuant certains compromis : minimiser les pertes de précisions en apportant des nuances, sans toutefois encombrer le texte par de longs détours interprétatifs (T. S. Kuhn, 1970, pp. 267-270).

Ainsi, notre modèle de complexification est compatible avec les traitements plus récents de la question de l'incommensurabilité. Deux théories incommensurables ne sont pas condamnées à être isolées conceptuellement du fait qu'elles ne peuvent être traduites l'une dans l'autre au sens strict. Il est possible pour l'élève de reconnaître les similarités ou les identités conceptuelles dans les deux théories, et de développer

progressivement la capacité d'effectuer une traduction interprétative dans le cas des concepts incommensurables. Comme le souligne Flores-Camacho et al. (2007), cette capacité n'est pas donnée d'emblée aux élèves : il s'agit en quelque sorte d'un début d'expertise au niveau conceptuel.

3.2.2 Les structures évaluatives

Comme le proposent Posner et ses collègues, une conception est en interaction complexe avec une écologie conceptuelle qui la contient et qui lui donne sa valeur. Cette affirmation trouve son équivalent dans l'épistémologie de Robert dans la notion de niveaux de langage : une théorie (conception) appartient au niveau explicatif, mais elle est également en interaction avec le niveau qui lui est immédiatement inférieur (descriptif) et celui immédiatement supérieur (justificatif). Les relations de consistance et d'inconsistance entre la conception et ces niveaux permettent d'évaluer sa performance épistémique.

Pour que nous puissions estimer la valeur d'une théorie, il est essentiel de déterminer comment elle est liée à l'observation et à nos critères épistémologiques. Cela implique la possession d'une structure cognitive plus vaste que la conception elle-même. Quelle forme prend une telle structure évaluative ? Le modèle de Thagard (1992) est assurément intéressant, mais l'approche *models-of-data* de Chinn et Brewer mentionné à la section 2.2.2.3 est plus détaillée (mais ne traite que du lien entre la conception et les observations). Mais peu importe le modèle employé, ce que nous désirons mettre en valeur ici est que, lors d'une complexification conceptuelle, des comparaisons peuvent être effectuées à l'aide des structures évaluatives associées à chaque conception et ces comparaisons permettent un jugement ordonnant la valeur des conceptions entre elles.

La capacité à élaborer des structures évaluatives et à effectuer un jugement de valeur requiert une certaine expertise, à la fois avec les conceptions, leurs relations avec le monde empirique, de même qu'avec les critères épistémologiques. Le développement de cette expertise ne doit pas être considéré comme un produit dérivant automatiquement de l'apprentissage des conceptions : c'est un objet d'apprentissage en soi. Autrement dit, c'est une chose que d'acquérir une

compréhension d'une théorie et de savoir comment l'employer pour résoudre des situations problématiques, c'en est une autre de comprendre pourquoi cette théorie est valorisée. Malheureusement, comme le soulignent Monk et Osborne (1997, p. 409) : « [there is an] overdominance within school science on the products of epistemological justification rather than the justification itself. »

À notre avis, tout comme la compréhension d'une conception (C_1) et de son alternative (C_2) peut être enrichie par une structure descriptive identifiant leurs contrastes et leurs ressemblances, la compréhension des structures évaluatives associées à C_1 et C_2 est grandement améliorée par leur comparaison détaillée. Il s'agit alors de contraster la façon dont chaque conception est reliée aux observations : Quels sont les énoncés descriptifs que les deux théories expliquent ? Y a-t-il des énoncés descriptifs problématiques pour une conception qui ne le sont pas pour l'autre ? Y a-t-il des énoncés descriptifs prédits qui diffèrent ? Y a-t-il, pour C_1 , des énoncés descriptifs qui n'ont tout simplement aucune signification pour C_2 ? etc. Il s'agit également de comparer les différentes caractéristiques épistémiques des conceptions : sont-elles vérifiables (vérifiées), sont-elles falsifiables (falsifiées), simples, générales, consistantes, scientifiques, plausibles, etc. ? Les structures reliant les conceptions au monde empirique et aux critères épistémologiques étant ainsi mieux définies, le jugement ordonnant la valeur épistémique de C_1 et C_2 est nécessairement plus éclairé.

D'ailleurs, Thomas Kuhn suggère qu'il serait plus facile d'évaluer l'atteinte de certaines normes de manière comparative plutôt qu'isolément (1991/2000, pp. 114-115). Par exemple, les critères de précision, d'envergure, de consistance ou encore de simplicité seraient équivoques lorsqu'employés de manière isolée sur une seule théorie. Quand peut-on dire qu'une théorie est simple, ou précise ? Kuhn remarque que l'utilisation comparative de ces critères est plus aisée. Il est plus facile de dire si C_1 est plus/moins simple (ou précise) que C_2 , que de déterminer à quel degré C_1 et

C_2 sont simples ou précises en elles-mêmes. Ainsi, une complexification conceptuelle permettrait un usage moins ambigu de certains critères épistémiques.⁷²

D'autre part, Paul Feyerabend, promoteur radical d'un pluralisme méthodologique, a souligné les bénéfices qu'il y a à considérer de nombreuses alternatives conceptuelles en science. Notamment, la connaissance d'alternatives conceptuelles permet de neutraliser le rôle paralysant que peut jouer l'intuition : ce qui est intuitif d'un point de vue ne l'est pas nécessairement de l'autre. Le dogmatisme devient alors moins probable, car selon Feyerabend cette attitude provient de notre incapacité à imaginer des alternatives. Cette pluralité d'alternatives permet donc la présence d'une évaluation où les faits viennent à jouer un rôle important, du fait que les intuitions et les évidences intellectuelles sont au moins en partie neutralisées par l'existence même de cette pluralité (Feyerabend, 1962, pp. 69-70). Pour Feyerabend, donc, l'empirique ne parvient pleinement à jouer son rôle essentiel dans l'arène scientifique que lorsqu'il s'y déroule un certain combat. Autrement dit, c'est au sein d'une structure évaluative comparative que l'empirique a le plus de chance d'être pleinement pris en compte.

La psychologue Deanna Kuhn a proposé des idées semblables en ce qui concerne les habiletés cognitives des enfants et des adultes. Nous avons mentionné à la section 2.2.3.1 que Kuhn et ses collègues ont contribué à un débat portant sur la capacité des élèves à distinguer entre une théorie et les évidences qui la supportent (D. Kuhn et al., 1988). Selon Kuhn, plusieurs capacités sont requises pour qu'une personne puisse contrôler consciemment la relation entre une théorie et des évidences. Elle doit pouvoir : 1) penser *au sujet* de la théorie, plutôt que de penser uniquement *par* elle; 2) représenter les évidences comme des entités distinctes de la théorie; et 3) mettre temporairement entre parenthèses son acceptation (ou son rejet) de la théorie de manière à évaluer ce que les évidences en elles-mêmes signifient pour la théorie (D. Kuhn et al., 1988, pp. 219-220). Selon cette psychologue, les jeunes élèves et plusieurs adultes ne contrôlent pas consciemment la relation entre les théories qu'ils favorisent

⁷² Mentionnons également que certains critères de choix rationnel plus complexes, notamment ceux de Lakatos, Laudan et Robert, sont comparatifs. Ces critères concernent davantage la section portant sur la notion de trame (3.2.4).

et les évidences qui les supportent : les deux se trouvent fusionnées dans une représentation unique de « la façon dont les choses sont ». Dans ce contexte, Deanna Kuhn considère qu'une explication n'acquiert un réel statut de théorie que lorsqu'elle est conçue comme une alternative parmi d'autres, devant faire l'objet d'une évaluation par des évidences qui ne sont pas identiques à elles :

« [A]n alleged causal sequence attains the status of a genuine theory only when it is conceived of as one of a set of alternative possibilities. Only in this case can it be a description of a reality whose truth value is not given but rather must be the subject of examination and evaluation in the light of evidence. » (D. Kuhn, 1991, p. 115)

Afin de favoriser le développement de l'habileté à coordonner théories et évidences chez les élèves, cette auteure est d'avis que le meilleur moyen est probablement de les amener à générer puis à relier des évidences à plusieurs théories différentes (D. Kuhn et al., 1988, p. 235). L'évaluation comparative de théories alternatives au moyen d'un ensemble d'évidences, qui est un des aspects de la complexification conceptuelle, constituerait ainsi un moteur dans le développement de la pensée scientifique chez les élèves.

3.2.3 Les structures explicatives

Nous venons de présenter deux types de structures permettant d'intégrer des conceptions différentes au sein de la pensée : les structures descriptives, servant à comparer le contenu des conceptions C_1 et C_2 et à identifier leurs ressemblances et différences; les structures évaluatives, comparant les performances épistémiques (ou pragmatiques) de ces conceptions et ordonnant leur valeur.

Dans cette section, nous proposerons un troisième type de structure intermédiaire, un peu moins évident à première vue mais cependant très efficace pour gérer l'inconsistance entre des conceptions alternatives : les structures explicatives. Ces structures ont comme fonction de donner à l'une ou l'autre des conceptions (ou plus rarement les deux) une ou plusieurs causes. Par exemple, supposons que C_1 soit considérée comme ayant un statut épistémique plus élevé que son alternative C_2 . C_1 est alors la conception qu'il est normal de privilégier, le supposé intérêt épistémique de C_2 devenant une erreur qu'il s'agit d'expliquer par diverses causes.

Nous distinguerons quatre familles de causes : les causes perceptuelles, les causes conceptuelles, les causes méthodologiques, les biais. Ces quatre familles n'épuisent pas l'éventail des causes possibles ni ne constituent des catégories étanches, mais elles nous aideront à exposer la diversité des ressources qu'un individu peut invoquer pour expliquer l'attrait que peut avoir une conception qu'il juge comme ayant une valeur épistémique inférieure à celle qu'il privilégie.

3.2.3.1 Les causes perceptuelles

Par des causes perceptuelles, un individu explique comment une conception incompatible avec celle qu'il privilégie a pu tout de même être considérée plausible, et ce en invoquant des limites des capacités sensorielles humaines.

En astronomie par exemple, un défenseur de l'héliocentrisme peut expliquer l'attrait du géocentrisme en invoquant spécifiquement les limites de nos mécanismes perceptuels. Il est vrai que la Terre nous apparaît immense, plate, stable, centrale, etc., et les astres tournent manifestement autour d'elle ... Quoi de plus naturel donc qu'un géocentrisme. Mais ces apparences sont facilement expliquées dans le cadre héliocentrique moderne (armé d'un principe d'inertie, d'une connaissance de la dimension de la Terre, d'une appréciation des distances interstellaires, etc.) : la Terre nous apparaît plate parce que notre horizon ne couvre qu'une minuscule partie de sa surface sphérique; elle apparaît stable parce que nous ne sommes pas en mouvement relativement à elle; les astres apparaissent tourner autour d'elle parce qu'ils sont fixes et qu'elle tourne sur elle-même et nous avec elle; etc. Par l'identification des limites à nos mécanismes perceptuels, l'adhésion à l'idée aberrante qu'est l'héliocentrisme devient compréhensible.

Donnons un exemple en géologie cette fois. Les conceptions créationnistes de la Terre considèrent que celle-ci a été créée il n'y a quelques milliers d'années et qu'il n'y a pas vraiment eu d'évolution dans ses paysages depuis. D'un point de vue moderne, selon lequel les paysages de la Terre se transforment progressivement de manière uniforme depuis son origine il y a 4.5 milliards d'années, l'attrait de la conception créationniste peut être expliqué pas la faible durée de la vie des humains, et même de leur histoire écrite, qui donne l'impression de la permanence des structures géologiques actuelle. Notre perception du temps ne nous permet pas d'observer

directement les transformations géologiques. Cette cause perceptuelle peut aussi être employée pour expliquer l'attrait initial des conceptions fixistes des espèces.

Les limites de notre sens tactile peuvent également être pointées du doigt, lorsque par exemple nous nous expliquons pourquoi une personne ne réalise pas que nous sommes tous au fond d'une « mer d'air », soumis à une pression qui nous écrase sans que nous nous en apercevions : nous ne détectons efficacement que les différences de pression, et non la valeur absolue de celle-ci.

Nous pouvons également mettre dans la catégorie des causes perceptuelles les cas où les conceptions « erronées » sont expliquées en invoquant l'utilisation indue de concepts superficiels ou une généralisation hâtive, trop déterminées par la perception immédiate. C'est le cas par exemple lorsque nous nous expliquons pourquoi plusieurs personnes considèrent les dauphins comme étant des poissons : les dauphins vivent dans l'eau et ressemblent à première vue à d'autres poissons, ce qui est suffisant pour que ces personnes les conçoivent comme étant des poissons.

3.2.3.2 Les causes conceptuelles

Nous regroupons dans la catégorie des causes conceptuelles les causes faisant appel au contenu des conceptions elles-mêmes. Par ce type de causes, un individu explique la plausibilité d'une conception en invoquant son caractère simpliste, grossier ou incomplet par rapport à la conception qu'il privilégie. Nous distinguerons deux types d'explications faisant intervenir des causes conceptuelles : les explications « inter-niveaux » et celles « intraniveau ».

Explications interniveaux

Ce type de relation explicative est celui qu'ont proposé certains auteurs que nous avons eu l'occasion de présenter à la section 2.3.3.4 (Pozo et ses collaborateurs, Wiser et Amin) et correspond aux relations micro/macro. Une explication interniveaux consiste à montrer qu'un modèle expliquant l'évolution d'un système à un certain niveau d'analyse peut en fait être compris comme une représentation simplifiée d'un modèle situé à un niveau immédiatement inférieur.

Les transferts de chaleur et les changements d'état physique sont des phénomènes typiques pouvant être expliqués à différents niveaux d'analyse. À un niveau macro-

scopique, une conception substantialiste de la chaleur pourra soutenir, par exemple, que le « froid » est une substance et qu'il se propage comme tel, ou encore que la « chaleur » sèche les vêtements. Évidemment, de telles explications possèdent une certaine efficacité pour de nombreuses situations. Cette conception substantialiste peut être expliquée par une conception microscopique de la matière et de ses états : la température est alors conçue comme le degré d'agitation des molécules constituant un objet; les transferts de chaleurs consistent en l'échange d'énergie cinétique interne entre deux objets; et les changements d'état correspondent à une modification des liens intermoléculaires. Cette conception microscopique joue un rôle explicatif par rapport à la conception macroscopique substantialiste : elle ne fait pas que subsumer sous elle le contenu empirique non réfuté de la première; elle explique également pourquoi le froid et la chaleur semblent se comporter comme des substances.⁷³

Les relations interniveaux ne sont pas toujours faciles à saisir. De nombreux étudiants en chimie ou en physique moderne ont de la difficulté à relier ce qu'ils apprennent au niveau microscopique à ce qui est perceptible au niveau macroscopique (Solsona, Izquierdo-Aymerich, & de Jong, 2003; Thacker, 2003). Les difficultés se retrouvent également pour des domaines en apparence plus anodins, comme les bouchons de circulation : une conception fréquente est que ces bouchons sont créés par un événement particulier (comme un accident de la route ou encore un feu rouge); les élèves sont surpris lorsqu'ils réalisent que des comportements de conduite tout à fait banals adoptés par les automobilistes sur une base individuelle peuvent être suffisants pour créer ces bouchons (Resnick, 1996; Wilensky & Resnick, 1999). Ceci constitue un exemple simple de causalité émergente, fondamentalement plus complexe que les relations causales directes (voir notre présentation du modèle de Chi; Perkins & Grotzer, 2005). Mais nous cherchons moins ici à identifier l'origine des difficultés à se doter de structures explicatives interniveaux qu'à souligner leur existence et leur rôle dans la complexification conceptuelle.

⁷³ Par rapport à une température de référence, les écarts (pas trop élevés) de température évoluent de la même manière qu'ils soient positifs ou négatifs : le « froid » et le « chaud » existent donc et se comportent de manière semblable.

Explications au même niveau d'analyse

L'explication de la plausibilité d'une conception C_1 à partir du point de vue d'une conception C_2 n'implique pas toujours une différence de niveaux d'analyse.

Nous pouvons donner comme exemple le cas des deux théories de l'évolution des espèces qui se sont succédé au 19^e siècle. Selon Lamarck, un organe très employé par un individu reçoit davantage de « fluide nerveux », ce qui le fait se développer, cet acquis se transmettant ensuite à sa descendance (Futuyama, 2005). Pour reprendre l'exemple classique du cou des girafes, l'action d'étirer le cou pour atteindre des feuilles plus hautes a provoqué son allongement progressif chez les individus, allongement qui s'est transmis et accumulé au fil des générations jusqu'à donner la taille actuelle du cou chez les membres de cette espèce. Cette explication est, dans un sens, téléologique : les girafes ont développé leur long cou afin d'atteindre les feuilles élevées. Le schème explicatif darwinien ne fait pas intervenir ce téléologisme : parmi l'ensemble des variations dans les traits des descendants, ceux permettant aux individus d'atteindre les feuilles élevées ont donné à ceux-ci un accès facile à un réservoir de nourriture peu exploité, leur conférant ainsi un avantage reproductif responsable de la propagation de ce trait dans la population. Cette chaîne causale est plus complexe que celle du type lamarckien, mais l'élève qui la maîtrise est capable d'expliquer l'attrait de l'explication téléologique : les variations sont aléatoires et multidirectionnelles, mais les pressions sélectives de l'environnement ne retiennent systématiquement que certaines de ces variations; d'un point de vue reculé, l'évolution résultante apparaît dirigée. Ainsi, la simplicité du mécanisme causal de la théorie lamarckienne (relativement à la théorie darwinienne) peut être considérée par un individu comme étant la cause de sa plausibilité trompeuse.

Notons que dans l'exemple précédent, les conceptions concurrentes appartiennent au même domaine et se situent à un même niveau d'analyse. Elles sont clairement incompatibles, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour des théories qui appartiennent à des niveaux d'analyse différents.

Dans les sciences employant un formalisme mathématique, on retrouve des explications de même niveau d'analyse dans les cas de « réduction ». Lors d'une réduction, une théorie plus complexe (T_2) se réduit (se ramène) à une théorie plus

simple (T_1) par l'élimination de certaines variables dont elle tient compte. La théorie T_1 à laquelle elle se ramène est vue en quelque sorte comme un de ses cas particuliers. Autrement dit, le domaine de validité de T_1 n'est plus qu'un sous-domaine de celui de T_2 . La plausibilité de T_1 est alors expliquée par sa simplicité, par son caractère incomplet par rapport à T_2 et il devient par conséquent compréhensible que le domaine de T_1 ait illusoirement été pris comme universel.⁷⁴

Par exemple, la théorie de la relativité restreinte se réduit à la physique newtonienne pour des faibles vitesses par rapport à celle de la lumière ($v/c \rightarrow 0$). De même, les lois de Newton permettent à leur tour de retrouver (moyennant certaines approximations) les lois de Kepler à propos du mouvement des planètes. Finalement, mentionnons que la mécanique quantique permet de retrouver les résultats classiques lorsque l'on prend de grands nombres quantiques, ou encore lorsque l'action caractéristique d'un système est beaucoup plus grande que la valeur de \hbar .

3.2.3.3 Les causes méthodologiques

Par des causes méthodologiques, une personne explique la plausibilité que peut avoir une conception qu'il juge erronée en identifiant des erreurs dans le processus de collecte des données ou encore dans le traitement de ces dernières.

L'idée que se font les scientifiques de la parapsychologie constitue un très bon exemple. Ce domaine de recherche, héritier des premières investigations sur les médiums au 19^e siècle, tente d'étudier scientifiquement le phénomène « psi », soit les manifestations de perceptions extra-sensorielles (incluant la télépathie, la clairvoyance et la précognition) et de psychokinésie (Hyman, 1985).

⁷⁴ Notre présentation des relations explicatives (interniveaux et intraniveaux) est compatible avec la distinction que fait Nickles (1973) entre deux types de réduction dans les sciences formelles. Le premier type de réduction (« réduction₁ ») se retrouve dans les cas où une théorie d'un domaine parvient à expliquer de manière déductive une théorie appartenant à un autre domaine (par exemple, la réduction de l'optique à la théorie électromagnétique). Les deux théories sont alors logiquement compatibles, puisqu'il y a déduction. Le second type de réduction (« réduction₂ ») est celui faisant intervenir des passages à la limite comme ceux que nous venons de présenter. La réduction joue alors un rôle non pas explicatif pour la théorie ancienne, mais justificatif et heuristique pour la théorie nouvelle : on demande à celle-ci de pouvoir reproduire les résultats de l'ancienne comme cas spéciaux (p. 185). Contrairement à la réduction₁, la réduction₂ ne constitue pas une explication déductive, les deux théories étant incompatibles. Nous considérons cependant qu'une réduction₂ fournit une relation explicative, au sens où *l'intérêt* pour la théorie ancienne devient expliqué par le fait qu'elle constitue, dans certaines conditions, une première approximation valide de la théorie nouvelle.

Les scientifiques sceptiques adoptent la conception de l'hypothèse nulle, selon laquelle ces phénomènes n'existent pas, tout simplement. Bien évidemment, les sceptiques ne se contentent pas de présenter leur hypothèse nulle : ils veulent de plus expliquer pourquoi les preuves expérimentales de l'existence de psi offertes par les parapsychologues, malgré leur attrait, s'avèrent erronées ou inadmissibles. Un exemple classique de recherche empirique portant sur la télépathie (ou la clairvoyance) consiste à tester la communication extra-sensorielle qu'il peut y avoir entre deux sujets : le premier (l'émetteur) regarde avec attention une carte tandis que le second sujet (le récepteur), isolé du premier, tente de deviner cette carte. Si le paquet employé comporte cinq types de cartes, un résultat positif sera obtenu si le récepteur parvient à battre le hasard (20%) de manière significative. Un tel résultat positif sera considéré par les parapsychologues comme une démonstration de l'existence de psi. Les sceptiques, défenseurs de l'hypothèse nulle, soutiendront que ces résultats sont plutôt expliqués par des erreurs méthodologiques (par exemple, des « fuites sensorielles » donnant des indices aux sujets récepteurs), par des failles dans l'analyse statistique ou encore par la présence de fraudes (Alcock, 1989).

Une situation semblable, mais beaucoup plus riche en termes de structures explicatives, se retrouve dans les croyances erronées générées spontanément par la majorité, voire l'ensemble, de la population. Par exemple : la croyance en l'existence de rêves prémonitoires, celle de coïncidences qui n'en seraient pas (« le téléphone sonne toujours quand je suis dans la douche »), la propagation de légendes urbaines, etc. L'hypothèse alternative à ses croyances est l'hypothèse nulle. Évidemment, l'intérêt réside beaucoup moins dans cette hypothèse nulle que dans le lien explicatif entre celle-ci et la croyance erronée. Les psychologues ont identifié de nombreuses sources cognitives à ces croyances : les lacunes dans le traitement de l'information probabiliste (par exemple : transformation de corrélations en relations causales; ne pas tenir compte des taux de base; mauvaise compréhension des régressions statistiques; etc.), l'utilisation de données incomplètes (tendance à rechercher de l'information confirmatoire; non disponibilité de certaines informations pertinentes), l'évaluation biaisée de données ambiguës (tendance à soumettre l'information qui est inconsistante avec nos attentes à un examen davantage critique; certains événements sont moins mémorisés que d'autres même s'ils sont aussi

pertinents; etc.), la tendance à croire ce que nous voulons croire (tendance à consulter les experts qui supportent notre position; tendance à stopper la recherche d'informations lorsqu'elles supportent notre préférence; etc.), les dangers de l'information de seconde main (cette information est souvent épurée de ses nuances encombrantes, puis altérée pour être rendue plus divertissante), l'effet du faux consensus (l'illusion d'un support social rend une croyance plus résistante au changement), etc. (Gilovich, 1991; Piattelli-Palmarini, 1994). Toutes ces faiblesses normales dans nos méthodes de production de croyances peuvent être employées pour élaborer une relation explicative entre la croyance erronée et l'hypothèse nulle.^{75, 76} Face à de telles croyances, l'aspect essentiel de l'apprentissage réside moins dans l'adoption de l'hypothèse nulle que dans l'appropriation de la relation explicative faisant intervenir les faiblesses de nos mécanismes cognitifs :

« What is most important, then, is not dispelling particular erroneous beliefs (although there is surely some merit in that), but creating an understanding of how we form erroneous beliefs. To truly appreciate the complexities of the world and the intricacies of human experience, it is essential to understand how we can be misled by the apparent evidence of everyday experience. » (Gilovich, 1991, p. 194)

3.2.3.4 Les biais

Finale­ment, il est plutôt fréquent d'entendre des individus faire appel à différentes sortes de biais (intérêts, motifs) pour expliquer pourquoi certaines personnes endossent une conception qu'eux-mêmes rejettent.

Pour revenir à l'exemple du débat entre géocentrisme et héliocentrisme, il est habituel d'expliquer la persistance du géocentrisme aux 15^e et 16^e siècles par la présence d'un biais religieux : le géocentrisme peut s'avérer nécessaire pour une conception de l'Univers plaçant l'être humain au centre de la Création. Selon Thomas Kuhn, de tels facteurs auraient alimenté le dogmatisme rencontré par le système de Copernic :

« More than a picture of the universe and more than a few lines of Scripture were at stakes. The drama of Christian life and the morality that had been made dependent upon it would not readily adapt to a universe in which the earth was just one of a number of planets.

⁷⁵ À ces raisons peuvent se rajouter celles faisant intervenir un fonctionnement anormal du cerveau, comme les hallucinations, les manies obsessionnelles, les drogues, etc. (voir par exemple Wolpert, 2006, ch. 7).

⁷⁶ Dans la même veine, certains chercheurs s'efforcent d'explicitier la base cognitive des croyances surnaturelles (Boyer, 2001; Atran, 2002; Dennett, 2006), qui constituent les fondements des religions.

Cosmology had long been interwoven in the traditional fabric of Christian thought described by Dante at the beginning of the fourteenth century. » (T. S. Kuhn, 1957, p. 192)

En ce qui a trait à la parapsychologie, il est courant de voir les sceptiques expliquer la persistance des parapsychologues à tenter d'étudier le phénomène psi, malgré 150 ans de recherches infructueuses, à l'aide d'un motif métaphysique, soit leur désir profond de démontrer l'existence d'une âme immatérielle, écartée par la vision matérialiste du monde adoptée par la science post-darwinienne (Alcock, 1985, 2003; Humphrey, 1996).

Il est également possible que les biais soient d'ordre idéologique. Un exemple double est donné par l'affaire Lyssenko en Union Soviétique à l'époque de Staline (Lecourt, 1976). En biologie, le lyssenkisme s'est opposé féroce­ment à la génétique mendélienne, conduisant à la mort de certains de ses défenseurs et à l'interdiction de son enseignement pendant une quinzaine d'années en URSS à partir de 1948. L'approche lyssenkiste représentait le fleuron d'une science prolétarienne désirant s'opposer à une science bourgeoise corrompue. Cet état déformé de la science était expliqué par le fait que la bourgeoisie, inquiétée par l'essor du prolétariat depuis la deuxième moitié du 19^e, tentait de lui masquer la réalité. En biologie, cette influence néfaste se serait fait voir dans la période postdarwinienne : bien que Darwin ait eu fondamentalement raison (hormis une trop grande importance accordée à l'idée de compétition), toute la génétique mendélienne qui l'a suivi a fait fausse route et avec elle la synthèse néo-darwinienne. À sa place, Lyssenko adopte une conception davantage finaliste de l'hérédité, qui, comparativement à la génétique mendélienne, donne davantage de possibilités à l'homme de transformer son environnement. « La biologie prolétarienne part de l'idée qu'il est possible d'astreindre chaque forme animale ou végétale à se modifier plus rapidement dans le sens désiré par l'homme. » (Lyssenko, cité dans Lecourt, 1976, p. 41) Alors que Lyssenko et les défenseurs de la science prolétarienne expliquaient les aberrations de la science contemporaine par l'influence des intérêts de la bourgeoisie, il va sans dire que les généticiens de l'époque (et nous à leur suite) expliquaient en retour l'existence et la domination de la théorie lyssenkiste en URSS par la pression qu'il y avait à se conformer avec une idéologie matérialiste dialectique particulièrement inquisitrice. Cet exemple nous permet de constater que l'imputation de motifs, d'intérêts, d'agendas politiques, etc. est une ressource fréquemment employée dans les débats et peut être comprise

comme une structure cognitive servant d'intermédiaire entre deux conceptions opposées.

3.2.4 Les structures transformatives

3.2.4.1 L'idée de récit génétique

Pour bien comprendre deux conceptions alternatives, il ne s'agit pas seulement de reconnaître les ressemblances et les différences qu'il existe entre elles (à l'aide d'une structure descriptive), ou de comparer le détail de leur performance (par une structure évaluative), ou encore de savoir comment la plausibilité trompeuse de l'une peut être expliquée dans le cadre de l'autre (par une structure explicative). Il peut s'agir également de produire une chaîne d'arguments justifiant l'élaboration d'une conception à partir de l'autre. Par exemple, le passage d'une conception géocentrique de l'univers à une conception héliocentrique et newtonienne s'est historiquement échelonné sur plusieurs siècles; au niveau individuel, il s'étend sur plusieurs années. L'appréciation des raisons appuyant l'introduction graduelle de l'héliocentrisme, des orbites elliptiques, du principe d'inertie et de la gravitation universelle à l'échelle du système solaire, étaye fortement la compréhension de chacune de ces deux conceptions. Autrement dit, il s'agit de recréer, entre ces deux conceptions, une structure contenant l'argumentaire de leur opposition, où une certaine direction est visible. Cette structure incarnerait un récit génétique représentant les transformations devant être opérées pour passer d'une conception à l'autre, d'où l'appellation que nous retenons : les « structures transformatives ».⁷⁷

Nous avons proposé que les structures descriptives jouent le rôle de pont entre deux conceptions alternatives, chacune d'elle pouvant alors servir de point de vue externe permettant de révéler les présuppositions de l'autre. L'idée que nous voulons ajouter ici est que la création d'une structure transformative reliant ces deux conceptions permet de rendre encore plus saillantes leurs présuppositions respectives (ou le mode de pensée qui les détermine) en exposant de façon consciente et

⁷⁷ Dans une première version de cette thèse, nous désignons les structures transformatives par le terme « trame ». La première expression a été retenue pour uniformiser notre appellation des différentes structures, soit en employant la fonction jouée par chacune des structures.

justifiée le dépassement de l'une par l'autre. Il ne s'agit pas seulement de franchir des obstacles conceptuels, mais d'avoir une conscience de la nature de ces obstacles et des raisons demandant leur franchissement.

Une telle structure transformative s'avère plus englobante par rapport aux structures descriptives, évaluatives et explicatives présentées précédemment : toutes peuvent être réutilisées pour la construction du récit. Plus précisément, elles en constituent le matériau nécessaire : sans elles, il n'y a tout simplement pas de quoi meubler le récit génétique. En retour, le récit apporte à ces structures une cohésion qui favorise leur compréhension et leur rétention. Elle leur apporte de plus une direction, une finalité, et en ce sens elle constitue une structure cognitive asymétrique.

Nous ne désirons pas affirmer qu'il est nécessaire que cette structure transformative représente le processus historique de formation de la conception épistémiquement privilégiée, ou même le processus par lequel elle est apprise par l'étudiant. Nous nous contentons plutôt de suggérer qu'une telle structure étaye la compréhension des conceptions, aussi artificielle, simplificatrice ou déformante soit-elle.

L'idée de structure transformative chez les épistémologues et les historiens des sciences

L'idée d'une structure représentant une histoire argumentative entre deux conceptions alternatives, mettant ainsi en évidence certaines de leurs présuppositions, exposant certaines causes à leur croyance et incorporant des jugements évaluatifs, se retrouve bien évidemment chez plusieurs penseurs s'étant intéressés à l'histoire des sciences. Plusieurs épistémologues postpositivistes ont souligné l'importance de l'histoire pour bien comprendre les théories plus récentes. Par exemple, Hanson écrit qu'une bonne compréhension d'une théorie passe par une appréciation de la nature des insuffisances passées :

« Only by seeing what sort of things make a man fail to explain a phenomenon or fail to make a certain observation can we appreciate what is at work when he succeeds at these things. » (Hanson, 1958, p. 158)

L'utilité didactique des structures transformatives a été explicitement soulignée par d'autres penseurs au penchant historique. Par exemple, dans son livre classique sur l'histoire de la théorie de l'évolution, Ernst Mayr nous ainsi fait part de sa pensée :

« Like Conant, I feel that the study of the history of a field is the best way of acquiring an understanding of its concepts. Only by going over the hard way by which these concepts were worked out – by learning all the earlier wrong assumptions that had to be refuted one by one, in other words by learning all past mistakes – can one hope to acquire a really thorough and sound understanding. In science one learns not only by one's mistakes but by the history of the mistakes of others. » (Mayr, 1982, p. 20)

Mais cette même idée se retrouvait déjà chez certains épistémologues français au début du 20^e siècle. En effet, Pierre Duhem défendait, il y a cent ans, l'utilité de « préparer l'esprit à recevoir une hypothèse » par l'histoire des sciences :

« Pourquoi ne préparerions-nous pas l'entrée de chaque hypothèse dans l'enseignement par un exposé sommaire, mais fidèle, des vicissitudes qui ont précédé son entrée dans la Science ? La méthode légitime, sûre, féconde, pour préparer un esprit à recevoir une hypothèse, c'est la méthode historique. Retracer les transformations par lesquelles la matière empirique s'est accrue, tandis que la forme théorique s'ébauchait ; décrire la longue collaboration par laquelle le sens commun et la logique déductive ont analysé cette matière et modelé cette forme jusqu'à ce que l'une s'adaptât exactement à l'autre, c'est le meilleur moyen, voire le seul moyen, de donner à ceux qui étudient la Physique une idée juste et une vue claire de l'organisation si complexe et si vivante de cette science. » (Duhem, 1914/1981, pp. 408-409)

Gaston Bachelard nous amène au même point avec plus de finesse encore : c'est au moment de sa modification qu'un concept prend le plus de sens. La structure transformative permet ainsi d'exposer « l'incrément psychologique » opéré sur l'idée initiale.

« Si l'on veut bien admettre que, dans son essence, la pensée scientifique est une objectivation, on doit conclure que les rectifications et les extensions en sont les véritables ressorts. C'est là qu'est écrite l'histoire dynamique de la pensée. *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. Même en se plaçant au simple point de vue pédagogique – point de vue dont on méconnaît trop souvent l'importance psychologique – l'élève comprendra mieux la valeur de la notion galiléenne de vitesse si le professeur a su exposer le rôle aristotélicien de la vitesse dans le mouvement. On prouve ainsi l'*incrément psychologique* réalisé par Galilée. Il en va tout de même pour la rectification des concepts réalisée par la Relativité. La pensée newtonienne absorbe ainsi la mécanique classique et elle s'en distingue. Elle ne bénéficie pas seulement d'une clarté statique due à son organisation interne. Elle éclaire encore d'une lumière étrangère et nouvelle ce qui passait pour clair en soi. » (Bachelard, 1934/1999, pp. 56-57)

Dans un autre passage du même ouvrage, Bachelard souligne que le développement des idées par rectification est un processus qui ne revient pas en arrière. Une structure transformative, en représentant le franchissement de difficultés conceptuelles, donne à ce franchissement un caractère conscient et permanent.

« En effet, l'histoire humaine peut bien, dans ses passions, dans ses préjugés, dans tout ce qui relève des impulsions immédiates, être un éternel recommencement ; mais il y a des pensées qui ne recommencent pas ; ce sont les pensées qui ont été rectifiées, élargies,

complétées. Elles ne retournent pas à leur aire restreinte ou chancelante. Or, l'esprit scientifique est essentiellement une rectification du savoir, un élargissement des cadres de la connaissance. Il juge son passé historique en le condamnant. Sa structure est la conscience de ses fautes historiques. » (Bachelard, 1934/1999, p. 177)

Une structure transformative est une structure qui possède donc une direction, qui a un sens. En se construisant une structure qui attribue aux conceptions un ordre dans une séquence de transformations, l'individu rejette nécessairement la possibilité de leur équivalence.

3.2.4.2 Structure transformative et sophistication épistémologique

Comme nous l'avons présenté plus haut, une structure transformative est une construction intégrant au sein d'une narration argumentative une foule d'informations sur les conceptions : ressemblances et différences, jugements de valeur, relations explicatives et modifications justifiées. Cette structure n'est pas une construction qui vise nécessairement à représenter le processus d'apprentissage de l'individu, ou encore le processus historique de développement des idées scientifiques. Nous ne désirons pas ici statuer sur le contenu de cette structure, mais plutôt souligner son utilité : elle encadre les conceptions alternatives dans un discours argumentatif. Ce discours et sa rationalité agissent alors comme une contrainte supplémentaire permettant de tester et d'améliorer la compréhension de chacune des deux conceptions : la construction d'un récit transformationnel de plus en plus complexe permettra par exemple de prendre conscience de la localisation d'un plus grand nombre d'obstacles et de justifier leur dépassement. Même si nous ne désirons pas suggérer que ces structures doivent représenter le processus historique de développement des connaissances scientifiques, il est probable que les structures les plus détaillées sont celles qui le font.⁷⁸

⁷⁸ En distinguant une trame argumentative d'une représentation de l'histoire des sciences, nous évitons d'être concerné dans ce projet par la question suivante : « Quelle histoire des sciences enseigner ? ». En effet, certains auteurs nous mettent en garde contre l'inclusion d'une histoire des sciences « *whig* », i.e. finaliste (Brush, 1974), mais d'autres reconnaissent en revanche qu'une attitude trop puriste est mal placée : l'histoire des sciences doit nécessairement être simplifiée pour être incluse dans le curriculum (Matthews, 1994, pp. 79-80). Nous ne sommes intéressé ici qu'à décrire la fonction que peut assumer une trame argumentative, même si celle-ci venait à constituer une représentation *whig* de l'histoire des sciences.

Pour pousser la notion de structure transformative encore plus loin, il est possible de s'inspirer de Lakatos lorsqu'il affirme (en calquant Kant) : « Philosophy of science without history of science is empty; history of science without philosophy of science is blind. » (Lakatos, 1978, p. 102) La deuxième partie de l'aphorisme de Lakatos signifie que toute histoire des sciences est une reconstruction dont la rationalité est conditionnée par une philosophie des sciences. Autrement dit, l'histoire est écrite de manière différente selon la conception de la rationalité scientifique de l'historien : l'histoire de l'historien inductiviste n'est pas la même que celle de l'historien falsificationniste, kuhnien, lakatosien ou correctionniste.

L'idée de Lakatos s'avère pertinente puisque la notion de structure transformative est l'analogue, au niveau psychologique individuel, de ce qu'est l'histoire des sciences pour la communauté scientifique. Elle nous suggère que l'élaboration d'une telle structure par un élève est en interaction avec sa conception du progrès cognitif. Ainsi, nous pouvons penser que si l'élève possède une perspective empiriste et inductiviste naïve (et les élèves en sont souvent accusés), récit génétique qu'il se construit n'est que cumulatif et peu fonctionnel : aucun problème récalcitrant ne survient et aucun obstacle conceptuel n'est mis en évidence. S'il possède plutôt une conception kuhnienne des sciences, son récit autorisera une tolérance face aux anomalies, jusqu'à l'atteinte d'un certain point de rupture où se produira un saut argumentatif majeur en direction d'un paradigme alternatif.

Si sa conception de la rationalité est poppérienne, sa structure transformative sera constituée d'arguments réfutatifs définitifs (des problèmes) suivis de contre-propositions radicales sortant de nulle part (ou en fait d'un « génie scientifique » inanalysable). Finalement, si l'élève adopte une position rationaliste critique plus sophistiquée à la manière de Lakatos ou Robert, la structure transformative qu'il élaborera fera maintenant intervenir des familles de théories (des programmes de recherche) qui se développeront en parallèle, où les modifications seront apportées à différents niveaux (ceinture protectrice / noyau dur ; niveaux de langage descriptif / explicatif / justificatif) et dont la valeur sera déterminée par une argumentation complexe et étendue (il n'y a pas d'expériences cruciales; c'est sur le taux de progrès ou de dégénérescence que l'on base notre jugement de valeur).

Ainsi, la construction d'une structure complexe va de pair avec une certaine sophistication épistémologique de la part de l'élève.⁷⁹ En fait, il est possible d'envisager un apprentissage consubstantiel : l'élaboration d'une structure transformative est également l'occasion d'une sophistication épistémologique. L'élaboration d'une structure cognitive formée des conceptions alternatives et de la structure transformative qui les relie est soumise à une contrainte de consistance qui favorise une meilleure compréhension non seulement des conceptions, mais aussi de la rationalité la séquence de transformation. Autrement dit, cette structure ne fait pas que révéler certains obstacles et justifier leur franchissement : elle incarne et expose par le fait même la rationalité de cette dynamique.

Nous avons abordé à la section 2.3.3.2 le thème de la relation entre changement conceptuel et croyances épistémologiques. L'idée d'une *interaction* entre les deux a été proposée, mais cette idée est encore timide pour l'instant, comme ce paragraphe de Mason le laisse sentir :

« [T]he causal relation that links epistemological beliefs and conceptual change over time should be examined. The former are precursor to the latter and can facilitate or constrain it [...]. However, it could also be that students who engage in conceptual change first, are then motivated to change their epistemological beliefs. In other words, the students' change of conceptions about science or history content could lead them to a reexamination of more abstract beliefs about knowledge. [...] Thus, could the line of development proceed from "concrete" to "abstract", that is, from changes of knowledge in a domain to changes of generalized beliefs about knowledge? » (Mason, 2003, p. 231)

La notion de structure transformative fournit une piste de recherche en ce sens : intégrant à la fois des conceptions scientifiques et des conceptions épistémologiques, elle constitue une structure mixte permettant l'interaction en question. Mais une

⁷⁹ Mentionnons que la constitution d'une structure transformative, même simple, n'est cohérente qu'avec des conceptions épistémologiques minimalement sophistiquées. Dans la littérature sur le développement des conceptions épistémologiques (voir Hofer & Pintrich, 1997, 2002), plusieurs chercheurs emploient un modèle à trois stades, appelés par exemple absolutiste (où la connaissance est conçue comme un agrégat de faits observés ou reçus d'une autorité), multipliste (où la connaissance est vue comme basée sur des expériences subjectives; elle donc individuelle et relative) et évaluativiste (où la connaissance est considérée comme le produit faillible d'une argumentation intersubjective). Nous (Bélanger, Roussin, & Varin, 2006) avons suggéré que ces croyances épistémologiques sont reliées aux compétences à problématiser et à argumenter (mise de l'avant dans l'éducation philosophique au collégial). Dans les stades absolutiste et multipliste, aucun récit génétique n'est envisagée puisque tout désaccord ou problème est conçu comme se résolvant par le recours à l'observation ou l'autorité (absolutiste) ou est considéré carrément irrésoluble (multipliste). Ce n'est que dans une conception évaluativiste que cette structure transformative devient pertinente.

telle structure est complexe et son élaboration n'a rien d'automatique : la sophistication épistémologique n'est pas une conséquence nécessaire d'un changement conceptuel.

3.2.4.3 Structure transformative et émotions cognitives

Une structure transformative est cette petite histoire par laquelle nous nous racontons comment l'on peut passer d'une conception à l'autre. Un tel récit comporte une structure complexe : nous venons de voir que son ossature est donnée par certains principes rationnels plus ou moins sophistiqués et que sa chair est constituée des structures descriptives, explicatives et évaluatives reliant les conceptions entre elles. Nous aimerions avancer de plus qu'un souffle de vie l'anime : les émotions cognitives qu'il suscite.

Les émotions cognitives dans la production des connaissances

Les scientifiques ne sont pas ces individus froidement calculateurs parfois dépeints dans la culture populaire. Plusieurs vivent au contraire toute une gamme d'émotions dans le cadre de leurs recherches. Paul Thagard a recensé plusieurs émotions cognitives⁸⁰ dans le populaire compte rendu qu'a fait Watson de la découverte de la structure de l'ADN (Watson, 1968). Par exemple, en contexte de questionnement, les scientifiques peuvent vivre de l'émerveillement, de l'intérêt, ou encore le désir d'éviter l'ennui. Lorsqu'ils s'efforcent de générer des réponses, l'espoir et la surprise, ou encore la frustration et l'inquiétude peuvent être ressenties (et à leur tour susciter de nouvelles questions). En contexte d'évaluation des théories, la joie peut accompagner le test réussi, tandis que la déception s'abat sur le chercheur lorsque le test échoue (Thagard, 2002).

De telles émotions ne sont pas l'exclusivité des scientifiques. Selon Gopnik (1998), en se formant des explications aux phénomènes qui les intéressent, les scientifiques ne font qu'employer de manière organisée des habiletés cognitives que l'on retrouve essentiellement dans l'enfance. Les scientifiques seraient de grands enfants. Comme

⁸⁰ Nous reprenons l'expression « émotion cognitive » de Scheffler (1991). Nous employons cette expression pour désigner les émotions générées en relation avec la production, l'apprentissage ou l'évaluation de représentations portant sur le monde.

les enfants, ils seraient en proie à une pulsion explicative, qui déboucherait sur une jouissance lorsque l'explication est finalement produite. Ces deux catégories d'individus seraient accrocs à ces moments archimédiens où un sentiment « Aha ! » les envahit. Selon Gopnik, cette tension et cette jouissance constitueraient le moteur du développement cognitif.

Les émotions cognitives dans l'apprentissage

Nous reconnaissons que le contexte de production des nouvelles théories peut être pourvoyeur d'une gamme variée d'émotions cognitives. Mais en contexte d'apprentissage, où la plupart du temps le sujet n'est pas lui-même le producteur de ce qu'il vient à savoir, que peut-il rester de cette richesse émotionnelle ? À notre connaissance, ce thème n'a pas été abordé en didactique des sciences. Il nous apparaît cependant manifeste que les élèves peuvent vivre plusieurs émotions cognitives. Par exemple : un sentiment d'accomplissement peut accompagner l'acquisition de la maîtrise d'une théorie ; nous pouvons vivre de l'émerveillement lorsqu'une théorie nous fait entrevoir une facette ou une dimension de la réalité dont ne nous soupçonnions pas jusqu'alors l'existence; de la joie ou de la fierté peuvent être ressenties lorsque nous savons que la théorie apprise a effectué des prédictions qui se sont avérées justes.

Au niveau théorique, l'analyse des émotions cognitives associées à l'apprentissage doit tenir compte d'un volet supplémentaire par rapport aux émotions associées au contexte de production des connaissances : ces dernières sont d'abord vécues alors que les premières peuvent être mémorisées. Les émotions cognitives ne se limitent pas uniquement au seul producteur d'une connaissance, à la seule époque de la production de cette connaissance. Il est possible par exemple d'éprouver une vive émotion face à la grande synthèse newtonienne, même si celle-ci a été opérée il y a plus de trois siècles par quelqu'un d'autre. Et cette émotion, nous pouvons la posséder en mémoire de manière permanente et y accéder à volonté. Se pose alors la question suivante : À quelles conditions cognitives pouvons-nous incorporer ces émotions aux apprentissages ?

Nous pensons que de nombreuses émotions cognitives nécessitent une structure cognitive complexe pour pouvoir exister, plus précisément une complexification

conceptuelle. En effet, les émotions sont souvent générées au sein d'une dynamique. Dans le cas des émotions cognitives, la dynamique est celle des idées. Pour être intégrée en mémoire, cette dernière doit être représentée, ce qui dans notre cadre d'analyse est effectué par une structure transformative.

Pour revenir à l'exemple de la mécanique newtonienne, l'émotion véhiculée lors de l'apprentissage ne provient pas de la théorie prise isolément, mais de la dynamique dont elle est l'achèvement. Pour « vivre » pleinement la synthèse newtonienne trois siècles plus tard, il faut connaître les états de la physique qui l'ont précédée : la conception géocentrique du monde et la conception scolastique du mouvement. En défilant en mémoire les contributions de Copernic, de Kepler et Galilée, de Descartes puis finalement de Newton, nous revivons nous-même l'audace de l'approche, la crainte envers le poids de la tradition, le désir de défendre et d'étayer cette nouvelle conception du monde, la frustration qu'il y a à voir de grands savants errer si étrangement, et l'immense plaisir à voir l'éclair de génie frapper l'histoire par la solution, apportant alors le calme et la satisfaction que l'on ressent généralement à la clôture d'épisodes mouvementés.

On souligne souvent l'importance, en didactique, de présenter une histoire des sciences laissant toute leur place aux tâtonnements, incertitudes et errements des scientifiques, afin de montrer la contingence des acquis. Les structures transformatives construites permettent alors d'intégrer plusieurs des émotions rattachées au contexte de production : émerveillement, curiosité, surprise, inquiétude, déception, joie. Mais d'un autre côté, une histoire des sciences finaliste (« *whig* ») peut elle aussi apporter son lot d'émotions : il est possible d'être rudement déçu de la contribution d'un penseur (et l'on se dit « pas du tout ! »), ou encore d'être déçu de manière empathique (« bien pensé, mais il s'est arrêté si prêt du but ... si seulement il avait ... »), et finalement la satisfaction de l'atteinte du produit final et de la clôture de l'énigme (« et voilà ! », « enfin »).

Un autre important type d'émotion que permet l'élaboration d'une structure transformative est le sentiment d'appartenance à une tradition théorique et celui d'une meilleure assurance dans la définition de son identité épistémique. Thomas Kuhn a écrit que les manuels pédagogiques sont « des véhicules servant à perpétuer la

science normale », qui utilisent pour ce faire une histoire finaliste et cumulative (T. S. Kuhn, 1972/1983, ch. 10). Dans la perspective kuhnienne, cette histoire reconstruite fait davantage que légitimer le paradigme au niveau épistémique. Ce paradigme étant ce qui définit la communauté scientifique qui le partage, l'histoire de son avènement est également l'histoire de la formation de la communauté.⁸¹ Nous partageons un tel point de vue, à ceci près que nous ne voyons pas l'obligation qu'il y aurait à ce que cette histoire soit finaliste (*whig*) et cumulative. Nous ajoutons que cette histoire, ce récit, où est représenté l'avènement d'une théorie et donc celui de la communauté des penseurs la partageant, est pourvoyeuse pour l'individu d'un sentiment d'appartenance et donc d'identité épistémique (i.e. l'identification qui est effectuée entre la personne et une conception). On ne s'identifie pas à une conception à la seule compréhension de son contenu; l'identité épistémique se développe bien mieux à l'occasion d'une opposition, voire d'une lutte. Par exemple, on ne devient pas un fervent darwinien par le seul fait de comprendre la théorie de la sélection naturelle. Il nous faut pour cela connaître une alternative s'opposant à la théorie darwinienne et ayant ou ayant eu la prétention de l'emporter sur elle, par exemple les diverses formes de créationnisme. La différence et l'opposition sont à l'origine de l'identité épistémique, mais c'est par le récit de leur formation, de leurs vicissitudes et de leurs promesses, que cette identité épistémique, tant au niveau de la communauté que de l'individu, se construit (et se reconstruit).⁸²

Israel Scheffler (1991) a écrit : « The growth of cognition is thus, in fact, inseparable from the education of the emotions. » Scheffler référait à la nécessité pour le scientifique de bien gérer sa surprise lorsque ses attentes sont contredites : ne pas la laisser dégénérer en détresse ou dogmatisme, mais plutôt la transformer en curiosité et ainsi profiter de l'occasion d'apprendre qui se présente. Mais sa phrase peut être reprise dans un sens plus large : les émotions constituent une facette de la phénoménologie de la connaissance scientifique qui mérite certainement d'être cultivée par l'éducation aux sciences. Les retombées motivationnelles et cognitives

⁸¹ Certains pourraient appeler cette histoire un « mythe fondateur » que la communauté se donne.

⁸² Nous rejoignons ici Bruner (2002), qui propose qu'il ne faut pas concevoir l'identité comme une entité fixe et indépendante de nous, mais plutôt comme quelque chose que nous nous reconstruisons constamment, selon les contextes, à l'intérieur d'un récit : « Telling oneself about oneself is like making up a story about who and what we are, what's happened, and why we're doing what we're doing. » (p. 64)

sont à déterminer, mais le développement des émotions cognitives aurait sans contredit avantage à constituer un objectif explicite du curriculum, comme l'est par exemple celui des habiletés cognitives.

3.2.5 Les structures décisionnelles

Comme nous l'avons rapporté précédemment (section 2.2.1.1), le programme de recherche sur le changement conceptuel a accordé une place presque exclusive aux connaissances déclaratives, délaissant la question de leur procédure d'utilisation. Ceci est normal puisque dans la perspective (implicite) du changement par remplacement, cette question ne se pose pas : pour un type de phénomène, nous n'avons en tout temps au plus qu'une seule conception (ou une seule dominante). La situation est évidemment différente dans l'approche par conceptions multiples : la multiplicité des alternatives impose l'existence d'un choix, qu'il soit conscient ou non. Une connaissance conditionnelle doit donc être élaborée, subsumant sous elle les différentes alternatives, permettant de distinguer avec un minimum de consistance leurs contextes d'utilisation.

La nature de cette connaissance conditionnelle est l'objet d'une théorie du contexte (pour reprendre l'expression de Richard White). Cette section vise à développer quelques-unes des pistes suggérées à la section 2.4.4.4. Bien qu'à première vue elle soit de nature très différente des structures que nous venons de présenter, cette connaissance conditionnelle accomplit une fonction semblable : en s'interposant entre deux conceptions alternatives, elle permet d'en gérer l'inconsistance. Nous considérons donc cette connaissance comme un type de structure cognitive : les structures décisionnelles.

Nous proposons dans ce qui suit essentiellement deux façons de procéder à l'activation d'une conception : une façon associative, basée sur la reconnaissance de signaux, puis une façon délibérée, basée sur un travail d'évaluation employant un cahier des charges.

3.2.5.1 L'activation par signaux

Nous rapportons à la section 2.2.4.4 que Palmer (1999) suggérait l'existence d'une proposition conditionnelle (« si ... alors ») employée par les élèves pour choisir la conception à employer parmi celles disponibles dans leur « carquois » (i.e., leur répertoire de possibilités conceptuelles). Au sein de cette approche, nous pouvons distinguer trois types de condition d'activation : la détection d'un signal terminologique, d'un signal sociologique, ou encore d'un signal conceptuel.

Signaux terminologiques

Joan Solomon, probablement le premier promoteur de l'approche par régions cognitives en didactique, proposait le mécanisme d'activation suivant : les conceptions du domaine ordinaire sont celles activées par défaut, alors que les conceptions scientifiques ne le sont que lorsqu'elles reçoivent un signal d'entrée en scène (*cue*) approprié, par exemple un terme scientifique dans une question. Selon Solomon (1984), les étudiants moins performants ont besoin de signaux plus forts pour effectuer le passage au domaine scientifique.

Une idée comparable a été proposée par Maloney et Siegler (1993). Selon ces auteurs, les étudiants possèdent plusieurs compréhensions (*understandings*), intuitives et scientifiques, en compétition pour être employées dans la résolution de problèmes. Par exemple, après un cours de physique mécanique, les étudiants ont, pour résoudre un problème de collision, plusieurs ressources à leur disposition : une conception intuitive (de type impétus), un principe de conservation de l'énergie et un principe de conservation de la quantité de mouvement. L'activation d'une compréhension plutôt qu'une autre dépend de sa force relativement aux autres, de même que des caractéristiques (*features*) du problème.

« From this perspective, learning would involve the introduction of new physics concepts, their progressive strengthening relative to informal understandings and the gradual recognition and strengthening of the features of problems that determine which formal concept applies. » (Maloney & Siegler, 1993, p. 284)

Lorsque les étudiants se font soumettre des problèmes où le concept physique pertinent est nommé dans l'énoncé d'un problème (par exemple, s'ils se font poser une question de collision en termes d'énergie cinétique), le bon principe est habituellement employé.

Signaux conceptuels et sociologiques

Toujours chez Maloney et Siegler, lorsqu'un tel signal terminologique est absent, les étudiants (même ceux ayant suivi plusieurs cours) ont des difficultés à sélectionner le bon principe : ils sont nombreux à ne pas maîtriser les conditions d'applications ne renvoyant pas à la structure de surface du problème (Maloney & Siegler, 1993, p. 291). Autrement dit, les étudiants doivent apprendre à reconnaître des signaux moins terminologiques, plus conceptuels, dans les problèmes qu'ils rencontrent.⁸³ Ils doivent pour ce faire apprendre à construire une représentation plus abstraite des situations auxquelles ils sont confrontés et employer celle-ci pour déterminer quelles ressources conceptuelles utiliser. Cet apprentissage est alors un des volets de l'acquisition de l'expertise.⁸⁴

Le modèle de la Larochelle et Désautels emploie un mécanisme d'activation un peu différent. L'activation se base sur des signaux conceptuels, mais ceux-ci ont une nature épistémologique. Pour activer une conception appropriée à la situation, il est d'abord nécessaire d'identifier le jeu de la connaissance auquel on joue, ce qui se fait par l'identification des règles épistémologiques que l'on doit suivre et des postulats ontologiques que l'on doit respecter. Mais on peut imaginer qu'un raccourci peut être employé pour identifier plus rapidement un jeu de la connaissance du fait que celui-ci est joué par une communauté spécifique : identifiez les joueurs (par leur nom, le langage qu'ils emploient, leur façon d'être, etc.) et vous aurez identifié le jeu à jouer. Une fois cela fait, il s'agit alors de jouer selon les règles de ce jeu, ce qui, dans le cadre de cette section, consiste à employer la conception valorisée par le jeu.

⁸³ L'approche de Maloney et Siegler possède évidemment des affinités avec le modèle de diSessa. En effet, rappelons que le modèle de diSessa mentionne bien qu'une p-prim est activée par la perception d'une configuration, et que l'apprentissage consiste essentiellement à discriminer les circonstances appropriées d'activation des p-prim. Maloney et Siegler se distinguent cependant de diSessa dans la mesure où 1) ce qu'ils appellent « compréhension » constitue une structure plus complexe que les p-prim, et 2) les signaux auxquels diSessa réfère semblent être davantage perceptuels que terminologiques et conceptuels.

⁸⁴ Cette remarque n'a rien de nouveau : dans leur recherche classique sur la compréhension des problèmes en physique, Chi, Feltovich et Glaser (1981) ont conclu que les novices (des étudiants au baccalauréat) utilisaient des caractéristiques de surfaces pour catégoriser les problèmes de physique (par exemple, des mots-clés ou des objets présents dans l'énoncé du problème), alors que les experts (des professeurs) utilisaient plutôt la structure profonde du problème, soit les lois physiques pertinentes au traitement du problème.

En accord avec notre critique de la section 3.1.2.3, nous rejetons l'idée d'activation par reconnaissance du jeu de la connaissance joué, mais reconnaissons la possibilité d'existence de tels signaux sociologiques.

Efficacité de l'activation par signaux

Il est entièrement plausible qu'une telle connaissance uniconditionnelle soit effectivement employée, mais nous pensons qu'un tel processus d'activation relève plus d'une association ou d'un conditionnement que d'un processus réfléchi. Une telle activation associative a possiblement l'avantage d'être rapidement apprise (à tout le moins en ce qui concerne les signaux terminologiques et sociologiques) en plus d'être simple et efficace en contexte scolaire, où les problèmes sont souvent « fermés », i.e. où toute l'information pertinente au problème (et seulement elle) est révélée dans la question.

Mais nous pensons qu'à l'occasion se présentent des problèmes « ouverts », i.e. dont l'énoncé ne fournit que des informations partielles, le problème devant alors être en partie défini par l'élève. Ces problèmes se laissent moins facilement traiter par une activation associative des ressources cognitives; un processus d'activation délibérée doit être employé.

3.2.5.2 L'activation dans l'approche par cahier des charges

Pour concevoir ce processus d'activation délibérée, nous développerons l'idée de cahier des charges introduite à la section 3.1.2.2 et emploierons certaines notions présentées à la section 2.2.4.4.

L'activation des ressources conceptuelles

En ingénierie, pour qu'une solution soit choisie pour résoudre un problème, il est nécessaire qu'elle remplisse deux conditions: sa réalisation est permise par la situation (par exemple, les ressources physiques nécessaires à sa mise en œuvre existent) et elle est celle qui respecte le mieux l'ensemble des attentes formulées au départ (le cahier des charges).

Nous proposons l'idée que le processus est analogue dans le cas des conceptions multiples: l'activation d'une conception (de même que de toutes les ressources

associées à son utilisation) consiste en le choix de la conception la plus appropriée en regard de la situation et des attentes cognitives du cahier des charges. Ce choix résulte alors d'une analyse coûts-bénéfices (selon l'expression de Rohr et Reimann).

Pour que l'analogie ne porte pas à confusion, soulignons que le choix d'une conception n'est pas le choix d'une solution : c'est le choix de l'instrument cognitif (ou ressources conceptuelles) qui sera employé pour réaliser la tâche, i.e. pour élaborer la solution. Aussi, les attentes du cahier des charges pertinentes ici sont celles qui portent sur la performance de cet instrument cognitif lors de son utilisation (degrés de précision, de fiabilité, de rapidité, etc.). Finalement, la situation à laquelle nous référons ici ne concerne pas la situation physique, mais plutôt l'ensemble de l'information offerte ou encore extractible au sujet de la situation physique. En somme, pour qu'une conception soit sélectionnée, il est nécessaire d'une part que la situation le permette (que l'information nécessaire à son utilisation soit accessible), et d'autre part qu'elle respecte les attentes au niveau des degrés de précision, de rapidité de calcul, etc.

Dans les tâches complexes comme la construction d'un pont, l'analyse d'un écosystème complexe, la simulation d'une épidémie, etc., le choix d'une conception (ou plus précisément d'une approche conceptuelle) n'est qu'une première étape. En d'autres termes, l'élaboration d'un modèle représentant la situation physique et permettant la résolution du problème ne se limite pas au choix du type de modèle : plusieurs composantes de ce modèle doivent par la suite être ajustées sur place en fonction de la tâche de même que de l'information disponible.

Prenons un exemple simple : pour planter des fleurs à un endroit de notre jardin de manière à ce que la luminosité soit appropriée, il est suffisant d'employer un modèle géocentrique approximatif du mouvement du soleil pour tenir compte de sa trajectoire quotidienne. Par contre, si nous désirons expliquer les phases de la Lune, un modèle héliocentrique est généralement employé. Mais est-il alors nécessaire d'inclure dans ce modèle l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique (23.5°) ? Et est-il nécessaire d'inclure l'inclinaison d'environ 5° du plan de l'orbite de la Lune par rapport à celui de l'écliptique ? Probablement que non : il s'agit là d'éléments conceptuels qui n'ont pas d'influence majeure sur

l'atteinte de l'objectif. Par contre, ces aspects sont essentiels pour pouvoir expliquer les saisons et le fait que les éclipses solaires et lunaires ne surviennent pas à chaque mois lunaire. Autrement dit, une fois choisie une conception, il est possible de poursuivre l'analyse coûts-bénéfices au niveau de ses aspects secondaires. En somme, le choix des ressources conceptuelles à employer peut comporter plusieurs étapes.

Problèmes ouverts et problèmes fermés

Le processus de décision que nous venons de décrire peut paraître un peu lourd pour le contexte scolaire. En effet, les problèmes de physique imposés en examen nécessitent rarement ce genre de stratégie de décision : le contexte de l'examen rend clair que c'est à l'aide de conceptions *scientifiques* que l'on doit répondre à l'examen; les problèmes qui y sont posés sont semblables (voir identiques) à ceux déjà résolus en classe; les énoncés des problèmes contiennent des termes clairement scientifiques, et toute l'information pertinente (et seulement elle) est donnée d'emblée. Tous ces facteurs font en sorte que la question d'un choix délibéré des ressources conceptuelles ne se pose pas : ce qui est testé est la seule utilisation de celles-ci. En fait, les étudiants savent probablement qu'ils doivent employer les conceptions scientifiques avant même de les maîtriser : il est malheureusement fréquent que les étudiants en physique raboutent les formules sans discrimination dans l'espoir d'arriver à la variable dont la valeur est demandée. Bref, les étudiants sont habitués à faire face à des problèmes fermés et développent des stratégies suffisamment efficaces pour les résoudre, sans plus.

Comme nous l'avons mentionné, les problèmes ouverts sont très différents : ce sont des problèmes qui doivent d'abord être eux-mêmes spécifiés. Prenons par exemple la tâche qui consiste à prédire la taille de la population de caribous dans le Nord du Québec dans 30 ans, en supposant qu'assez peu de choses soient a priori connues à ce sujet. Cette tâche constitue alors un problème ouvert. D'abord, il est nécessaire de mieux définir le cahier des charges associé à cette tâche : Voulons-nous un ordre de grandeur ou un estimé précis ? Quels sont les incertitudes tolérées ? Combien de temps avons-nous pour produire cet estimé ? Ensuite, l'information sur la situation n'est pas toute donnée d'avance : Existe-t-il des estimations fiables pour les années passées et les années courantes ? Est-il possible de produire nous-mêmes de nouvelles

informations ? Finalement, le choix des ressources conceptuelles est à faire : Employons-nous des courbes de tendance sans modélisation, ou tentons-nous d'élaborer un modèle. Ce modèle tiendra-t-il compte des prédateurs et des ressources alimentaires ? Tiendra-t-il compte d'une hausse de la température sur l'écosystème ?

Ainsi, lors d'un problème complètement ouvert, ces trois aspects doivent être pensés et développés. Ce qui peut venir compliquer encore un peu plus le processus, c'est le fait que ces aspects ne sont pas indépendants. En effet, l'évaluation de l'information accessible dépend des ressources conceptuelles envisagées : si on opte pour tenir compte d'une hausse de température du climat, la quantité d'information supplémentaire exigée par le modèle est grande et n'est peut être pas entièrement accessible directement. Notre accès à cette information, par exemple par une collecte de données, peut alors dépendre du temps et des ressources mises à notre disposition (les contraintes du cahier des charges). Finalement, le cahier des charges n'est lui-même pas totalement rigide lorsque défini une première fois : il est susceptible d'être ajusté suite aux difficultés ou facilités rencontrées dans le processus de résolution.

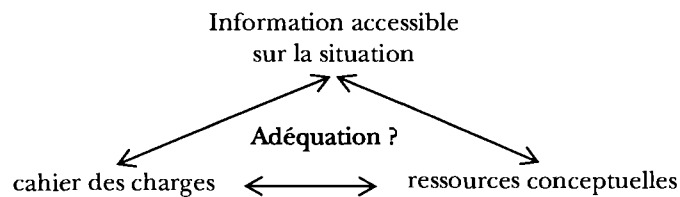


Figure 12. Le choix des ressources conceptuelles à employer pour accomplir une tâche doit être adéquat relativement aux informations accessibles et aux attentes du cahier des charges. Cependant, chacun des pôles peut être ajusté dans le processus de choix.

Pour de tels problèmes ouverts et complexes, il est possible que la démarche d'évaluation de l'adéquation entre ressources conceptuelles, information disponible et cahier des charges ne soit pas de nature algorithmique, mais plutôt heuristique et itérative. Autrement dit, il est possible qu'un travail exploratoire soit nécessaire pour évaluer cette adéquation : la résolution d'un problème complexe pourrait donc connaître plusieurs faux départs, où est construite une première représentation du problème et où sont explorées les ressources conceptuelles appropriées à sa résolution. Ce processus n'exclut pas que des principes puissent nous guider dans la

démarche, mais ceux-ci ne constituent probablement pas des algorithmes codifiés qu'il s'agirait d'apprendre puis d'appliquer.

Idéalement, l'activation d'une conception plutôt qu'une autre devrait être le fruit d'un processus d'évaluation de l'adéquation s'arrêtant lorsque le choix optimal est identifié. Mais la recherche d'une solution *optimale* est un processus cognitif coûteux que nous pouvons rarement (ou même jamais) nous permettre. L'atteinte d'une solution *satisfaisante* s'avère être une condition plus réaliste pour arrêter le processus d'évaluation et s'engager dans l'utilisation d'une conception particulière.⁸⁵

Heureusement, la démarche que constitue ce processus de décision n'a pas à être répétée à chaque problème complexe rencontré. Selon Maloney et Siegler, les experts peuvent posséder un important répertoire de problèmes ayant déjà été résolus par le passé, répertoire qu'ils peuvent consulter directement :

« For physicists, these problems are essentially retrieval tasks, where recognition of the type of problem automatically triggers recall of the proper representation and solution procedure. In contrast, for undergraduates, they constitute genuine problems, in which multiple representations of varying strength compete as potential ways to think about the problem. » (Maloney & Siegler, 1993, p. 292)

Résumé des types d'activation

En somme, nous suggérons que plusieurs mécanismes peuvent être responsables de l'activation d'une conception lorsque plusieurs alternatives existent. Tout d'abord, nous reconnaissons la possibilité d'une activation basée sur la reconnaissance de signaux non épistémiques, c'est-à-dire le repérage de termes ou encore d'une communauté de pratique. À un niveau plus abstrait, il est possible de se référer à des signaux conceptuels pour effectuer l'activation. Dans tous ces cas, le processus d'activation peut être assimilé à une proposition conditionnelle « si ... alors ».

Pour traiter des problèmes ouverts, ces stratégies d'activations sont insuffisantes, car le processus de résolution doit passer par une analyse de la situation et l'élaboration d'un cahier des charges détaillé. Après un processus itératif comprenant possiblement un ou plusieurs faux départs, une conception (ou plus précisément, un

⁸⁵ Le père de la rationalité limitée a été Herbert Simon, qui s'est opposé à l'approche traditionnelle qui attribuait des capacités de calcul infinies à l'être humain dans la recherche de la solution optimale dans un processus décisionnel (voir par exemple Gigerenzer & Todd, 1999, pp. 3-14).

ensemble de ressources conceptuelles) est activée après avoir été jugée adéquate relativement à l'information disponible et au cahier des charges construit.

Finalement, un individu peut avoir accès à un répertoire de problèmes déjà résolus auquel il peut se référer pour éviter de recommencer le processus de sélection des ressources conceptuelles.

Il est raisonnable de suggérer que l'ordre dans lequel nous avons présenté ces diverses stratégies d'activation soit l'ordre dans lequel elles sont acquises, puisque les dernières semblent faire appel à des processus métacognitifs exigeants, que ce soit en termes d'efforts, de connaissances ou d'expérience.

3.2.5.3 Deux exemples

La dualité onde-corpuscule

Prenons comme premier exemple un problème plutôt fermé, où les signaux terminologiques ou conceptuels sont probablement suffisants pour effectuer le choix de la conception appropriée.

En 1923, Louis de Broglie propose d'associer à la matière une nature ondulatoire. La quantité de mouvement d'un corps ($p = mv$; m étant sa masse, v sa vitesse) et la longueur d'onde (λ) qui lui est associée sont reliées par la relation : $\lambda = h/p$. La petitesse de la constante de Planck ($h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s) fait en sorte qu'à la matière sont associées des longueurs d'onde extrêmement courtes, rendant compréhensible leur non-détection jusqu'alors. De Broglie a cependant suggéré qu'un faisceau d'électrons peut être diffracté par une ouverture suffisamment étroite, comme il est possible de le faire avec la lumière. Une telle expérience a été réalisée dès 1925, indépendamment par Davisson et Lester (de manière accidentelle), et Thomson et Reid.

Tonomura et ses collègues ont réalisé une expérience similaire, mais visuellement très parlante. Elle consiste à reprendre l'expérience des doubles fentes de Young avec un faisceau d'électrons dont on peut contrôler l'intensité avec précision. Si l'intensité de la source est suffisamment faible, il est possible d'observer la constitution progressive d'un patron d'interférence. La ponctualité des impacts montre bien la

nature corpusculaire des électrons (images a et b); mais un patron d'interférence, trahissant la nature ondulatoire des électrons, est produit suite à la collecte d'un grand nombre d'électrons (image d). De plus, le fait d'obstruer l'une ou l'autre des fentes amène la destruction du patron d'interférence global (une tache unique est produite), ce qui force à conclure qu'un électron passe par les deux fentes à la fois et possède donc, individuellement, une nature ondulatoire.

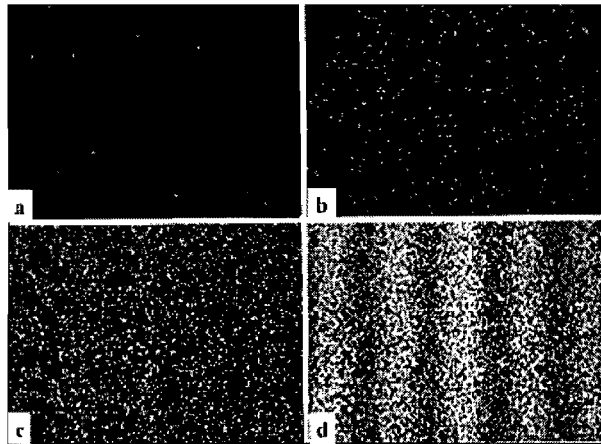


Figure 13. La construction progressive d'un patron d'interférence à partir d'un faisceau d'électrons projetés sur une double fente. Tiré de Tonomura et al. (1989)

Pour que le phénomène d'interférence soit observable, la longueur d'onde λ des électrons incidents doit être plus grande ou du même ordre de grandeur que la distance a entre les deux fentes de l'écran. Par exemple, la longueur d'onde d'un électron (masse de $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg) possédant une vitesse de 6000 km/s (soit environ 100 eV) est de $1.2 \cdot 10^{-10}$ m, ce qui est comparable à la taille d'un atome.

Pour une longueur d'onde beaucoup plus petite, le faisceau se comporte comme s'il voyageait en ligne droite (donc une tache pour chaque fente). C'est ce qui se produirait si on augmentait la vitesse des électrons ou qu'on accélérât à la même vitesse des objets plus massifs, comme des protons. Dans un tel cas, le traitement ondulatoire de la matière devient inutile, et la physique classique est suffisante pour décrire la trajectoire des objets.

Dans cette situation, la construction d'un cahier des charges et son utilisation pour choisir entre l'emploi de la mécanique classique ou quantique ne sont pas nécessaires. Le critère $a \leq \lambda$ constitue une condition conceptuelle suffisante pour

décider laquelle des deux théories est généralement appropriée pour traiter convenablement la situation. Mais ce critère requiert une réflexion et une certaine maîtrise de l'optique ondulatoire de même que de la dualité onde-corpuscule. Il est donc probable que bon nombre d'étudiants de niveau d'introduction aient plutôt recours à la stratégie de lecture de signaux terminologiques (comme le mot « électron ») ou un critère conceptuel simple (par exemple : « échelle microscopique ») pour décider d'employer le principe de dualité onde-corpuscule ou d'effectuer une analyse classique.

La vulgarisation de la théorie de la sélection naturelle

Comme deuxième exemple, prenons un problème mal défini, ouvert, où les ressources cognitives employées font possiblement l'objet d'une évaluation coûts/bénéfices via l'élaboration d'un cahier des charges implicite. La réalisation d'un projet complexe, comme la prédiction de la population de caribou, serait évidemment intéressante, mais contentons-nous d'une situation beaucoup plus banale.

Comme le mentionne Dobzhansky, « Nothing in biology makes sense, except in the light of evolution. » (cité dans Futuyama, 2005) L'emploi d'un schème de sélection naturelle pour expliquer une structure biologique ou un comportement est donc fréquent. Or ce schème fait intervenir un processus causal complexe, rendant l'explication complète passablement lourde. Pour expliquer certaines adaptations, plusieurs auteurs ont donc recours à une anthropomorphisation des individus (voire des espèces), ceux-ci étant alors présentés comme modifiant leurs traits ou leurs comportements de manière délibérée et téléologique. Par exemple, voici la formulation qu'emploie Stephen Jay Gould pour expliquer le comportement social des fourmis :

« Aussi longtemps qu'une ouvrière a la possibilité d'investir de préférence dans ses soeurs, elle transmettra une plus grande quantité de ses gènes en aidant sa mère à élever davantage de soeurs (parenté égale à $\frac{3}{4}$) qu'en élevant elle des filles fertiles (parenté $\frac{1}{2}$). Mais le mâle n'est enclin ni à la stérilité ni au travail. Il préférerait de loin élever ses propres filles, qui possèdent tous ses gènes, qu'aider ses soeurs, qui n'en ont que $\frac{1}{2}$. » (Gould, 1997, p. 285)

Mais le lecteur sait bien que Gould réfère ici à un processus d'évolution complexe auquel sa formulation personnifiée réfère sans l'expliciter, de sorte que ce n'est que

rarement qu'un tel auteur prend la peine d'effectuer une remarque précautionneuse en bas de page, comme la suivante à propos des fourmis :

« Je ne prétends pas que des animaux pourvus d'un cerveau aussi rudimentaire sont doués de volonté consciente. Je n'utilise les expressions comme 'il préférerait' que pour aller plus vite, à la place de : 'Au cours de l'évolution, les mâles qui ne se comportaient pas ainsi ont été désavantagés du point de vue de la sélection et progressivement éliminés.' » (Gould, 1997, p. 285)

Les mêmes remarques s'appliquent à l'ouvrage populaire de Richard Dawkins, *The selfish gene*, où l'auteur propose de comprendre la théorie de la sélection naturelle non pas au niveau de l'individu (ou l'espèce), mais au niveau des gènes : via les corps (des « machines de survie » éphémères) dont ils déterminent le développement, les gènes tentent avec plus ou moins de succès de favoriser leur reproduction (réplication); pour élaborer ces machines de survie complexe, les gènes doivent pouvoir bien coopérer en équipe de gènes (ceux tirés du pool génétique), équipe qui est modifiée à chacune des générations. L'auteur fait ainsi fréquemment référence à des gènes qui optent pour telle ou telle stratégie afin de maximiser leur taux de réplication. Comme Gould, Dawkins reconnaît qu'une telle personnification est instrumentale, mais suggère que l'utilité de celle-ci va au-delà de la vulgarisation :

« *The Selfish gene* has been criticized for anthropomorphic personification [...] Personification [...] is not just a quaint didactic device. It can also help a professional scientist to get the right answer, in the face of tricky temptations to error. Such is the case with Darwinian calculations of altruism and selfishness, cooperation and spite. It is very easy to get the wrong answer. Personifying genes, if done with due care and caution, often turns out to be the shortest route to rescuing a Darwinian theorist drowning in muddle. » (Dawkins, 1976/2006, pp. x-xi) ⁸⁶

Dans ces deux extraits, les auteurs ont recours à une personnification téléologique par souci d'économie cognitive : ils considèrent que les lecteurs, connaissant le processus de sélection naturelle, peuvent reformuler l'explication complète par eux-mêmes. Et effectivement, la plupart des élèves de niveau secondaire ne sont pas

⁸⁶ Les formulations anthropomorphiques ou téléologiques en biologie peuvent donc aider les scientifiques à raisonner plus efficacement pour comprendre certains phénomènes complexes. Hempel et Oppenheim affirment qu'elles peuvent également posséder une valeur heuristique pour la découverte :

« One of the reasons for the perseverance of teleological considerations in biology probably lies in the fruitfulness of the teleological approach as a heuristic device: Biological research which was psychologically motivated by a teleological orientation, by an interest in purposes in nature, has frequently led to important results which can be stated in non-teleological terminology and which increase our scientific knowledge of the causal connections between biological phenomena. » (Hempel & Oppenheim, 1948, p. 145)

induits en erreur par une formulation anthropomorphique et savent la distinguer de l'explication réelle, et de ces élèves plusieurs préfèrent explicitement les formulations anthropomorphiques du fait de leur compréhensibilité (Tamir & Zohar, 1991). Ainsi, par une connaissance de la situation (i.e. les ressources cognitives dont disposent leurs lecteurs), ces auteurs optent pour une représentation qui minimise la longueur du texte employé tout en restant lisible et univoque.

Il est cependant possible que des auteurs, dans certaines situations, optent pour de telles expressions personnifiées et téléologiques même s'ils se doutent que leurs lecteurs ne sont pas en mesure de les reformuler en termes de processus de sélection. Par exemple, la tâche d'expliquer en quelques minutes à des élèves du primaire pourquoi la girafe a un long cou, pourquoi les ours polaires sont blancs, etc., peut être accomplie de manière honorable par l'emploi d'une conception de type lamarckienne. Une telle conception peut être appropriée au sens où il y a adéquation optimale ou suffisante entre la situation, les objectifs (respecter le temps, être compréhensible) et les outils conceptuels employés.

Puisque nous pensons qu'une telle tâche de vulgarisation fait intervenir un processus d'activation où il y a une recherche délibérée d'un compromis satisfaisant, nous en ferons un instrument important de notre recherche empirique (chapitre 4).

Notre perspective est ici compatible avec celle de Sperber et Wilson (1986) au sujet de la communication. Au coeur de leur théorie se trouve un principe de pertinence : tout acte de communication ostensif communique la présomption de sa propre pertinence optimale. Cette présomption consiste d'une part à supposer que l'information que le communicateur a l'intention de rendre manifeste à l'auditeur est suffisamment pertinente (i.e. qu'elle produit des effets importants dans les connaissances de l'auditeur) pour qu'il vaille la peine pour l'auditeur de traiter le stimulus provenant du communicateur. D'autre part, elle consiste à supposer que le niveau d'effort intellectuel requis pour ce traitement n'est jamais supérieur à ce qui est nécessaire pour atteindre les effets. Une pertinence optimale prend en compte à la fois les intérêts du communicateur et ceux de l'audience. Lorsque la présomption de pertinence se trouve apparemment violée, la communication est menacée.

« We assume that she [the communicator] eliminates any stimuli which would require too much effort on her part [...] or which she finds objectionable [...]. In most cases, this will still

leave a wide range of possible stimuli. It is in the interest of the addressee that the communicator should choose the most relevant stimulus from that range: that is, the one that will call for the least processing effort. Here the interests of communicator and addressee coincide. Unless the communicator is merely pretending to communicate, it is in her interest to be understood, and therefore to make it easy as possible for the addressee to understand her. An addressee who doubts that the communicator has chosen the most relevant stimulus compatible with her communicative and informative intention – a hearer, say, who believes that he is being addressed with deliberate and unnecessary obscurity – might doubt that genuine communication was intended, and might justifiably refuse to make the processing effort required. » (Sperber & Wilson, 1986, p. 157)

Ainsi, le recours à la personnification téléologique par Gould, Dawkins et autres vulgarisateurs, se veut une tentative d'atteindre une pertinence optimale : produire un effet cognitif maximal à propos de l'évolution des espèces d'une façon requérant des efforts cognitifs minimaux.

3.2.6 Discussion

3.2.6.1 Retour sur le modèle de complexification conceptuelle

Dans cette section, nous tentons de revenir brièvement sur les composantes de notre modèle de complexification conceptuelle en employant diverses perspectives.

Résumé

Nous sommes d'avis qu'une approche isolationniste de la cognition pour aborder le phénomène des conceptions multiples risque de faire passer inaperçue une structure cognitive particulièrement riche. Dans notre approche, ces conceptions sont des alternatives qui appartiennent à un seul et même domaine de pensée. Ces conceptions peuvent être consciemment reliées de diverses façons, et selon nous elles le doivent dans la mesure du possible. D'abord, des structures descriptives peuvent s'interposer entre les conceptions et permettre l'identification de leurs ressemblances et de leurs spécificités, autrement condamnées à ne demeurer que des présuppositions inaccessibles. Ensuite, par des structures évaluatives, les forces et les faiblesses de chaque conception sont comparées, ce qui permet de porter un jugement évaluatif éclairé. Puis, alors que la conception épistémiquement privilégiée est considérée comme une croyance normale, la plausibilité de sa concurrente peut être expliquée à l'aide d'une gamme variée de causes (perceptuelles, conceptuelles, méthodologiques, biais). Tous ces éléments peuvent être rassemblés et organisés au

sein d'une structure transformative, qui représente par une série de modifications justifiées comment il est possible de passer d'une conception à l'autre. Finalement, au niveau décisionnel, l'emploi d'une conception plutôt qu'une autre dans un contexte peut s'appuyer sur des stratégies heuristiques comme la détection de divers signaux d'activation, ou encore être déterminé par une évaluation coûts-bénéfices se basant sur une appréciation de la situation, mais aussi des attributs (épistémiques, pragmatiques, métacognitifs, affectifs) des conceptions. À notre avis, ces structures cognitives aux multiples facettes doivent nécessairement être développée afin que les différences entre les deux conceptions soient bien gérées : elles aident à éviter leur confusion (tant au niveau de leur contenu que de leur valeur), l'oubli (ou le rejet) de l'une ou l'autre, en plus de permettre une utilisation coordonnée de l'une et l'autre.

Distinction entre deux niveaux de structures

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les structures que nous venons de proposer ne se situent pas toutes sur un pied d'égalité, certaines étant plus fondamentales que d'autres. Ceci peut être mis en évidence par la distinction entre deux niveaux de structure (tableau 2).

Au premier niveau, nous plaçons les structures qui ont d'abord comme fonction de reconnaître la multiplicité des conceptions. Selon nous, cette reconnaissance ne doit aucunement être prise pour acquise, mais plutôt envisagée comme le produit d'un important travail cognitif. Dans notre modèle de complexification, cette reconnaissance s'effectue à trois endroits : sur le contenu des conceptions, sur leur valeur, et sur leur utilisation. D'abord au niveau du contenu des conceptions, il s'agit, par des structures descriptives, de prendre conscience des similarités et des spécificités conceptuelles de chaque conception en jeu, de les concevoir comme différentes et distinctes. Ensuite, au niveau de la valeur des conceptions, il s'agit de reconnaître, par des structures évaluatives, les forces et les faiblesses des alternatives, autrement dit de reconnaître que ce sont des créations cognitives qui ne sont pas équivalentes, qui ne possèdent pas les mêmes propriétés. Finalement, il est nécessaire de pouvoir discriminer entre les situations où le recours à une conception plutôt que son alternative s'avère souhaitable ou pertinent, ce qui est accompli par des structures décisionnelles. Ainsi, par ces trois types de structures, la multiplicité des conceptions

vient à être reconnue puis appréciée. Autrement dit, elles permettent à celle-ci d'acquérir une réalité accrue, jusqu'à même l'établir comme objet de cognition.

Ce qui nous amène au second niveau, celui où est porté un regard métacognitif sur les conceptions alternatives. En effet, la multiplicité des conceptions peut être prise comme objet de cognition, objet demandant maintenant à être expliqué. Les deux autres types de structure que nous avons proposés ont comme fonction de fournir une telle explication. Nous avons identifié dans un premier temps les structures explicatives comme étant des structures qui attribuent des causes cognitives (perceptuelles, conceptuelles, méthodologiques, biais) à une ou plusieurs conceptions. Les explications ainsi générées peuvent être qualifiées de synchroniques, par opposition aux explications diachroniques que se trouvent à fournir les structures transformatives. En effet, par leur insertion dans un récit, la multiplicité des conceptions reçoit une explication qui est maintenant d'ordre génétique.

La multiplicité des conceptions comme objet recevant explication	Explication synchronique Structures explicatives, fournissant des causes cognitives aux conceptions (perceptuelles, conceptuelles, méthodologiques, biais)		Explication diachronique Structures transformatives, fournissant un récit génétique allant d'une conception à l'autre
La prise de conscience de la multiplicité des conceptions	Sur le contenu Structures descriptives, identifiant les ressemblances et les différences entre les conceptions	Sur la valeur Structures évaluatives, comparant les propriétés ou performances des conceptions	Sur l'utilisation Structures décisionnelles, assignant des contextes de pertinence aux conceptions

Tableau 2. Distinction entre deux niveaux dans les structures proposées : le niveau de la reconnaissance et le niveau métacognitif.

Cette distinction entre deux familles de structures suggère naturellement un ordre d'acquisition : le développement des structures descriptives, évaluatives et décisionnelles serait antérieur à celui des structures explicatives et transformatives. En effet, avant de pouvoir expliquer la présence de plusieurs conceptions, il est nécessaire que cette multiplicité soit reconnue et minimalement maîtrisée. Nous ne désirons pas affirmer toutefois que les structures du niveau inférieur doivent complètement être échafaudées pour que les structures supérieures puissent se constituer : au contraire, nous pensons que ces dernières peuvent agir comme un puissant stimulant. Il va sans dire que toute tentative d'approfondissement de la question de l'ordre de

développement de ces structures appelle à une recherche empirique qui dépasse malheureusement le cadre que nous nous sommes fixé pour cette thèse.

Les cadres analytiques derrière les structures postulées

Lorsque nous avons proposé les diverses structures pouvant être élaborées pour gérer une multiplicité de conceptions alternatives, nous avons plusieurs fois suggéré que ces structures pouvaient être en partie déterminées par ce que nous appellerons ici des « cadres analytiques ». Ces cadres représenteraient les connaissances que sont capable de mobiliser les apprenants pour la formation de chacun des types de structure que nous avons envisagés.

D'abord, nous avons mentionné qu'il était possible pour un apprenant d'identifier les ressemblances et les différences de chacune des conceptions en jeu, en spécifiant toutefois que ces ressemblances et différences pouvaient dépendre de la façon dont il s'y prenait pour décrire les conceptions. Cette description peut être plus ou moins élaborée selon que l'apprenant emploie un cadre analytique lui-même plus ou moins sophistiqué. Une remarque semblable peut être faite en ce qui concerne les structures évaluatives : l'épistémologie (implicite ou explicite) de l'apprenant constitue un cadre qui lui permet d'employer des critères épistémologiques plus ou moins sophistiqués.

Même chose pour les structures explicatives : leur existence est fortement déterminée par les connaissances que possède l'apprenant sur les processus cognitifs et sur les connaissances elles-mêmes (sur la perception, sur les relations conceptuelles, sur la méthodologie, sur les biais). Enfin, nous avons proposé l'idée que la conception qu'a l'apprenant au sujet de la dynamique des idées puisse influencer de manière déterminante le type de structure transformative qu'il construit pour relier au sein d'un récit deux conceptions concurrentes.

Notre modèle suggère ainsi que le développement de structures élaborées serait conditionnel à la possession de cadres analytiques eux-mêmes raffinés. Ces cadres rendraient possibles la création de telles structures, mais agiraient également comme facteur limitatif : des cadres sous-développés inhiberaient la construction de structures élaborées. Au lieu d'une antériorité stricte des cadres par rapport aux structures, nous pensons que les cadres et les structures peuvent être en co-

développement, le rôle de stimulateur pouvant être joué tantôt par celles-ci, tantôt par ceux-là. Encore une fois, une étude plus détaillée de ces cadres analytiques, de leur relation avec les structures que nous avons postulées, de même que de leur développement, nécessiterait un travail théorique et empirique dépassant l'envergure que nous sommes en mesure de donner à cette thèse.

La notion de connaissances inertes

Une « connaissance inerte » est définie comme une connaissance rarement mise en usage dans les situations où elle est en fait potentiellement applicable (Bereiter & Scardamalia, 1986, p. 66; Whitehead, 1929, ch. 1). Dans les termes de notre modèle, une connaissance inerte est donc une conception dont le mécanisme d'activation est trop simpliste (par exemple, activation par signal terminologique), ce qui nuirait à son utilisation dans des problèmes mal définis. Mais nous pouvons élargir la notion de connaissance inerte dans le contexte du phénomène des conceptions multiples : une conception inerte serait une conception qui n'accomplit qu'une petite partie du rôle qu'elle pourrait jouer. C'est une conception qui non seulement n'est pas activée alors qu'elle serait pourtant pertinente, mais c'est aussi une conception qui est insuffisamment reliée à ses alternatives, de sorte que son isolation la condamne à une faible utilité psychologique.

En effet, l'élaboration des structures descriptives, évaluatives, explicatives, transformatives et décisionnelles entraîne l'approfondissement de la compréhension de chacune des conceptions dont elles servent d'intermédiaire. C'est pourquoi certaines conceptions qui ne sont aucunement susceptibles d'être employées pour la réalisation d'une tâche peuvent mériter d'être apprises si elles possèdent en retour une utilité psychologique par la complexification conceptuelle à laquelle elles donnent lieu. Par exemple, certaines théories historiques peuvent mettre en valeur les particularités et l'originalité des théories scientifiques. La théorie astronomique de Tycho Brahé, qui mettait la Terre au centre de l'univers, faisant tourner autour d'elle le Soleil et autour de celui-ci les autres planètes, se voulait un compromis entre le modèle héliocentrique et celui géocentrique. Ce modèle permet d'apprécier la réticence qu'il y avait à l'époque à déplacer la Terre du centre de l'univers, et de voir de plus que tout un éventail de possibilités, même étranges, peut être envisagé. Un

autre exemple est la présentation de la théorie atomique de Démocrite, où les atomes possédaient des grandeurs, des couleurs et des formes (et des crochets, afin d'expliquer les liaisons atomiques). Ces deux théories historiques n'ont pas d'intérêt pragmatique, mais elles ont toutefois un intérêt psychologique : leur compréhension permet la formation de structures intermédiaires qui favorisent en retour la compréhension et la rétention des théories scientifiques au programme.

La complexification conceptuelle comme processus de décentration

Selon Vosniadou, l'acquisition de multiples conceptions peut être conçue comme le développement d'une structure cognitive plus flexible :⁸⁷

« Nevertheless it is important not to overlook the fact that, with increases in age and with expertise, we not only have a restructured system, in the sense of developing radical different representations of reality that were not available before, but, as the proponents of the multiple representations view would argue, also a more flexible system, a system that makes it easier to take different perspectives and different points of view. One of the limitations of conceptual change research is that it has paid little attention to the development of cognitive flexibility and metaconceptual awareness. [...] What brings about this cognitive flexibility is, in my opinion, and again this is an interesting area for future research, the development of metaconceptual awareness. » (Vosniadou, 1999, p. 12)

Au lieu de parler de flexibilité, d'autres auteurs préfèrent employer la notion piagétienne de décentration, mais l'idée est la même :

« We have argued that the aim of learning, science for example, is not to abandon old ideas in favour of new ones, but rather to extend our repertoire of ideas about the physical and cultural world, to refine their organization and coherence. Learning is then a process of decentering, in the Piagetian sense, rather than the acquisition of more embracing logical or conceptual systems *replacing* earlier less potent ones. This proposal can be viewed as a normative standpoint on the aim of teaching science and about the aim of schooling. » (Caravita & Halldén, 1994, p. 106)

Ce rapprochement avec la tradition piagétienne est très pertinent. En effet, pour Piaget, la pensée incarne une forme d'égo-centrisme à plusieurs reprises au cours de son développement. Un des derniers égo-centrismes que peut prendre la pensée consiste en une confiance exagérée en la puissance de l'explication qu'elle possède (Flawell, 1963, p. 224). La décentration, dans ce contexte, consiste en la prise de conscience qu'une explication a des limites et qu'il existe des alternatives, c'est-à-dire d'autres façons de voir les choses.

⁸⁷ Le terme « flexibilité » nous ramène près de la notion de fluidité à laquelle Solomon faisait allusion.

Pour accomplir cette décentration, nous pensons que les structures associées à la complexification conceptuelle sont d'une importance capitale. Une pensée centrée sur une seule conception est une pensée rigide. Mais une pensée décentrée n'est pas seulement une pensée qui ne possède plus un centre unique (autrement dit, une pensée qui considère des points de vues théoriques alternatifs), c'est aussi une pensée qui est capable de *se déplacer* d'un point de vue à un autre en toute conscience des changements impliqués. Plus qu'une pensée flexible, c'est une pensée qui est mobile. Les structures que nous avons proposées constituent les chemins qu'emprunte cette pensée mobile lorsqu'elle voyage d'un point de vue explicatif à l'autre.

Nature non relativiste de la complexification conceptuelle

La fin de ce type d'égoцентризм représente la fin de l'adoption d'un point de vue unique, mais elle n'implique pas pour autant que cette multiplicité des points de vue doive être comprise comme une équivalence. Autrement dit, un individu, lorsqu'il vient à maîtriser diverses alternatives explicatives, n'a pas à les contempler d'un regard relativiste : il a la possibilité de les hiérarchiser en fonction de leur valeur épistémique.

Dans notre approche à la complexification conceptuelle, la hiérarchisation des conceptions est produite par plusieurs structures. Il va de soi que les structures évaluatives, puisqu'elles comparent les performances épistémiques des conceptions concurrentes, sont propices à la formation d'un jugement de valeur ordonnant les conceptions entre elles. Mais les structures explicatives et transformatives contribuent également à l'élaboration d'une hiérarchie du fait de leur asymétrie. Par une structure explicative, la plausibilité ou l'attrait d'une conception C_1 est expliqué dans le cadre de la conception privilégiée C_2 en invoquant différentes causes (perceptuelles, conceptuelles, méthodologiques, biais).⁸⁸ Par une structure transformative, une série de modifications est représentée de manière à constituer un récit génétique permettant de passer de la conception C_1 à la conception C_2 . Dans le cas de la structure explicative, l'asymétrie réside dans le fait que, de manière générale, toute

⁸⁸ Nous pouvons dire en quelque sorte qu'une structure évaluative comparative explique l'adhésion à une conception par des raisons (justifications épistémiques), alors qu'une structure explicative explique l'adhésion à une conception par des causes cognitives (qui ne peuvent constituer une justification épistémique).

explication causale est fondamentalement asymétrique : ce qui explique (les causes) et ce qui est expliqué (les effets) sont des composantes identifiables de l'explication et leurs rôles ne peuvent être intervertis sans que ne soit changée l'explication elle-même. Dans le cas des structures transformatives, l'asymétrie réside dans le fait qu'elles représentent une séquence ou une procédure de transformation où sont distingués un début et une fin. Ces deux asymétries permettent de renforcer substantiellement la hiérarchie épistémique d'abord posée par la structure évaluative.

Complexification conceptuelle vs modèles isolationnistes

Nous nous sommes opposé à la section 3.1.2 à ce que nous avons appelé l'approche isolationniste (où chaque conception se voit attribuer une sphère exclusive d'activité cognitive) et lui avons préféré celle consistant à mettre les conceptions dans le même « panier cognitif ».

Il est possible de distinguer deux variétés d'isolationnisme. D'abord un isolationnisme sémantique, qui affirme que les conceptions appartiennent à des univers de signification différents. C'est le cas du modèle de Solomon, qui propose l'existence d'un domaine quotidien (dans lequel nous sommes situés par défaut) et d'un domaine scientifique, le passage de l'un à l'autre s'effectuant alors par un saut que l'on pourrait dire analogue à un changement de gestalt. Ce modèle faisant vivre l'individu tantôt dans un domaine, tantôt dans l'autre, la relation entre le contenu des conceptions des deux domaines n'est pas envisagée. Le tâche associée à notre approche a alors été de proposer des façons dont peut être vaincu cet isolement sémantique, ce que nous avons fait notamment en suggérant l'existence de structures descriptives (qui identifient les similarités et les différences entre les conceptions) et de structures transformatives (qui mettent en évidence certaines particularités d'une conception en expliquant leur dépassement).

La seconde forme d'isolationnisme se situe au niveau épistémologique et consiste à affirmer que les valeurs épistémiques de deux conceptions alternatives ne peuvent être comparées du fait qu'elles appartiennent à des sphères d'activité différentes. Il s'agit d'une forme de relativisme fort. Le modèle des jeux de la connaissance de Larochelle et Désautels adopte cette approche. Notre position épistémologique rationaliste critique s'oppose à un tel relativisme (section 2.1.4.2) et nous avons par

conséquent tenté dans notre modèle de montrer les diverses possibilités qui s'offraient à l'apprenant pour hiérarchiser les conceptions alternatives (voir la sous-section précédente).

Notre opposition à ces deux formes d'isolationnisme se laisse percevoir dans l'expression « complexification conceptuelle » que nous avons retenue pour désigner notre modèle. Selon nous, il ne s'agit pas uniquement de se doter d'une multiplicité de conceptions (d'une pensée « complexe » au sens qu'elle comporte plusieurs éléments différents), mais de les intégrer dans un tout plus riche que ne l'est la somme de ses parties prises individuellement (et ainsi former un « complexe » cognitif constitué de plusieurs éléments coordonnés).

3.2.6.2 Mise en perspective du modèle

L'accès conscient aux conceptions : une limite du modèle de complexification conceptuelle

Un thème important touché par le phénomène des conceptions multiples est celui de la connaissance consciente. Certaines conceptions intuitives sont efficaces et persistantes et le resteront toujours : ce sont des ressources cognitives que nous activons de manière intuitive, sans même y songer, et qui nous permettent d'agir efficacement et sans effort cognitif dans de nombreuses situations de la vie courante. Ces conceptions, étant intuitives, ne forment pas un savoir auquel nous accédons de manière consciente. Il n'en demeure pas moins qu'elles participent pleinement au phénomène des conceptions multiples, lorsqu'elles se posent comme concurrentes légitimes à la compréhension d'un phénomène. Notre approche à la complexification conceptuelle s'est cependant centrée sur le cas des conceptions explicites et accessibles à la conscience. En effet, les structures descriptives, évaluatives, explicatives et transformatives sont élaborées à l'occasion d'un exigeant travail intellectuel effectué sur des objets présents à la conscience. Par définition, les conceptions intuitives ne peuvent constituer un objet de cognition et ne peuvent par conséquent donner prise à ces structures. Notre modèle ne trouve donc que peu à dire sur ces conceptions intuitives et inaccessibles ou encore dans quelle mesure elles peuvent participer à un « complexe cognitif ».

Cette limite peut cependant être conçue de manière positive. Elle nous amène à nous interroger sur la nature de cet accès conscient et de son acquisition. Car il s'agit bien d'une acquisition : cet accès n'est pas d'un donné mais un acquis de l'apprentissage, qui représente probablement un luxe cognitif. Mais à notre connaissance, la question de l'accès conscient (la *metaconceptual awareness*, dans les termes de Vosniadou (1999, p.12)) n'a pas été abordée comme tel dans la littérature sur le changement conceptuel. Plusieurs questions se posent immédiatement : En quoi consiste cette conscience ? Qu'implique-t-elle ? Vient-elle par degrés ? Comment s'acquiert-elle ? Etc. Nous pensons qu'au lieu de voir l'accès conscient comme formant une limite d'applicabilité de notre modèle de complexification conceptuelle, il est beaucoup plus intéressant de le concevoir comme un important lieu d'activité cognitive qu'il serait souhaitable de mieux comprendre. En effet, si nous adoptons une perspective où l'accès conscient à une conception se construit progressivement par des efforts d'apprentissage, il devient normal de voir les structures que nous avons proposées comme *amenant* puis *consolidant* l'accès conscient au contenu des conceptions alternatives qu'elles relient.

Caractérisation de notre modèle de complexification conceptuelle

Prenons maintenant le temps de caractériser notre modèle de la même façon que nous l'avons fait pour ceux présentés à la section 2.2.

D'abord, notre modèle partage avec l'ensemble des recherches menées dans la perspective des conceptions multiples la caractéristique d'être macroscopique. En effet, nous soulignons toute l'utilité d'avoir un répertoire de conceptions, sans toutefois nous soucier de modéliser leur structure interne et le développement de celle-ci. Cependant, en nous intéressant aux structures servant d'intermédiaires entre ces conceptions et en reconnaissant que ces dernières possèdent une organisation interne (lorsque nous parlons de concepts, d'obstacles, etc.), nous pouvons dire que notre modèle est ouvert aux approches microscopiques.

Contrairement à plusieurs modèles de changement conceptuel, notre approche à la complexification conceptuelle touche à la fois la question de la compréhension des conceptions et à celle de leur évaluation (ou pour être plus précis, celle des jugements portés à leur endroit). La compréhension d'une conception est affectée

par les structures descriptives, explicatives et transformatives, puisque les particularités et les présuppositions y sont exposées, expliquées, voire renversées. Les jugements effectués sur les conceptions interviennent d'une part dans les structures évaluatives et transformatives, et d'autre part dans le processus délibéré d'activation des conceptions.

Enfin, nous avons employé, comme plusieurs autres chercheurs ayant exploré le phénomène des conceptions multiples, une approche épistémologique qui tente de développer des outils d'analyse pour mieux penser ce qui doit être réellement visé par l'éducation scientifique (dans notre cas, la maîtrise d'une pluralité de conceptions densément reliées) et pour localiser les difficultés d'apprentissage correspondantes. Notre modèle possède par conséquent une forte connotation normative, surtout en ce qui concerne les structures descriptives, évaluatives, explicatives et transformatives : il explicite et définit en quelque sorte l'un des volets de la maîtrise des théories scientifiques ; si un élève ne s'y conforme pas, nous ne concluons pas que notre modèle est falsifié, mais plutôt que l'élève possède une compréhension partielle ou erronée. En ce qui concerne les structures décisionnelles, notre approche est nettement plus psychologique et par conséquent ouverte à la recherche empirique : nous n'avons pas identifié a priori de bonne manière d'activer les conceptions; nous avons plutôt offert quelques hypothèses plausibles sur les façons dont il serait possible de s'y prendre.

Dépassement de la définition du changement conceptuel

L'approche par conceptions multiples, et plus particulièrement notre modèle de complexification conceptuelle, pointe vers un dépassement du cadre du changement conceptuel tel que formulé à la section 2.2.1. Premièrement, on y souligne que le changement conceptuel n'est pas une forme d'apprentissage qui est exclusivement non monotone, où une conception scientifique viendrait remplacer une conception initiale fondamentalement différente. Au moins dans certains cas, le changement conceptuel possède un aspect cumulatif : non seulement la conception scientifique s'ajoute-t-elle à la conception initiale, mais aussi de nombreux liens sont créés entre

les deux.⁸⁹ Deuxièmement, on constate qu'il est nécessaire d'inclure dans la modélisation du phénomène des conceptions multiples des connaissances autres que déclaratives. En effet, les structures décisionnelles constituent des connaissances conditionnelles. De plus, notre emphase sur l'utilisation des connaissances dans des tâches complexes renvoie directement à la question des connaissances procédurales associées aux contenus scientifiques, volet que nous n'avons malheureusement pas abordé.

Cela nous montre bien que l'apprentissage des sciences est un phénomène aux multiples facettes et que les définitions (comme celle du changement conceptuel que nous avons offerte initialement), même si elles sont bien utiles pour encadrer la recherche, ne doivent cependant pas constituer subséquemment des contraintes rigides.

Complexification conceptuelle et correctionnisme

Nous avons présenté à la section 2.1.4.4 la position épistémologique que nous avons adoptée pour ce travail, soit le rationalisme critique (plus précisément le rationalisme correctionniste). Nous pensons que le modèle de complexification conceptuelle que nous venons de proposer constitue un module psychologique pouvant être greffé à l'épistémologie correctionniste.

Selon Robert, un système de connaissance constitue pour un individu un instrument cognitif lui permettant d'interagir avec le monde et de réaliser ses projets. L'élaboration de ce système de connaissance est en partie subjective, au sens où elle dépend de nos intérêts pragmatiques à connaître. D'un point de vue correctionniste, être rationnel consiste à résoudre efficacement les inconsistances à l'intérieur du système de connaissance par des modifications appropriées. La théorie épistémologique de Robert concerne les connaissances en général, mais elle accorde une place importante aux théories scientifiques et à leur développement, de sorte qu'il est sous-entendu dans son ouvrage qu'une modification dans un système de connaissance consiste en un processus de substitution.

⁸⁹ Rappelons que l'augmentation de la densité des liens entre les connaissances existantes constitue une forme d'apprentissage monotone selon Chi et Ohlsson (2005).

Notre modèle de complexification conceptuelle développe le volet psychologique du correctionnisme en y ajoutant le phénomène des conceptions multiples. D'abord, nous maintenons toujours qu'un système de connaissance est élaboré dans le but d'interagir efficacement avec le monde. Notre modèle ajoute cependant que nos intérêts pragmatiques, s'ils sont diversifiés, peuvent nous inciter à avoir plus d'une alternative à l'intérieur de notre système de connaissance, chacune possédant ses forces et faiblesses en regard de nos intérêts. Un tel système de connaissance permet alors une interaction avec le monde plus efficace que ne le ferait un système qui ne conserverait qu'une seule conception. Ensuite, la rationalité consiste toujours à résoudre les inconsistances de ce système. Mais la modification apportée en réaction à une inconsistance n'est pas nécessairement un remplacement : l'ancienne explication peut être conservée aux côtés de la nouvelle. Le fait que s'y retrouvent simultanément deux explications incompatibles d'un même phénomène n'entraîne pas nécessairement une augmentation du nombre d'inconsistances dans le système de connaissance. Ces inconsistances sont en fait identifiées et gérées par les diverses structures que nous avons proposées. Leur effet est donc neutralisé. Par exemple, je peux avoir en mémoire les théories géocentrique et héliocentrique en astronomie sans vivre aucune inconsistance, à la condition que je sois capable de comparer avec arguments à l'appui leur contenu, leur valeur, etc. Être rationnel, c'est donc développer un système complexe de connaissance de plus en plus efficace pour interagir avec le monde, en s'efforçant d'éliminer ou de neutraliser les inconsistances que l'on y retrouve.

Finalement, la notion de structure transformative nous a permis d'apprécier un peu plus la complexité psychologique impliquée par une position épistémologique comme celle du correctionnisme. Comme nous le mentionnions, une structure inductiviste naïve est relativement simple à élaborer : elle est constituée de théories qui se succèdent (sans qu'il y ait toutefois une véritable filiation) et où augmente le degré de probabilité d'être vrai. Aucune structure descriptive n'est exigée pour cette structure. Par contre, une structure de type lakatosienne ou correctionniste est plus complexe : la filiation entre les théories est ici plus importante, car les problèmes rencontrés provoquent non pas le rejet mais la modification d'une composante du programme de recherche ; et ce n'est que dans la dynamique du programme de

recherche que la rationalité et la scientificité sont visibles. Ainsi, pour comprendre l'état actuel de même que la valeur d'un programme de recherche, une comparaison avec l'état antérieur du programme de recherche ou encore une comparaison avec les programmes de recherche concurrents est nécessaire. Ainsi, la construction d'une structure lakatosienne ou correctionniste a nécessairement recours à des structures descriptives et évaluatives de même qu'à des modifications argumentées.

3.2.6.3 La complexification dans les sciences humaines et la philosophie

Pour clore ce chapitre, nous aimerions proposer que la perspective des conceptions multiples (et notre approche en particulier) s'avère à première vue pertinente pour l'étude de l'apprentissage de contenus autres que ceux des sciences de la nature. Son domaine d'applicabilité nous semble déborder de la seule didactique des sciences. En effet, il est reconnu que les sciences humaines et sociales de même que la philosophie sont davantage éclatées que les sciences naturelles : plusieurs écoles, théories et modèles concurrents s'opposent sur de longues périodes de temps. Cette dispersion constitue possiblement une source de difficulté importante lors de l'apprentissage de ces domaines.⁹⁰

Nous limitons ici à deux exemples que notre modèle de complexification permet d'éclairer.

Le développement des conceptions épistémologiques

Dans le domaine de recherche sur les conceptions épistémologiques (i.e., les diverses représentations que possèdent les individus à propos de la connaissance), le développement a souvent été conçu en termes de stades globaux, i.e. indépendants

⁹⁰ Une façon courante de faire face à cet éclatement est d'inclure une histoire de la discipline. L'épistémologie constitue un bon exemple. C'est un champ philosophique qui possède une histoire formée de problèmes et de solutions, d'arguments et contre arguments, etc. Il est fréquent que les épistémologues se soucient d'esquisser une histoire de leur champ afin d'identifier les problèmes qu'ils prétendent résoudre tout en révélant les présuppositions ou lacunes de leurs prédécesseurs qui les empêchaient de voir ces problèmes (voir par exemple Robert, 1993, chapitres 5 et 6). Ces survols historiques jouent un rôle didactique et philosophique important : même si chacune de ces théories pourrait être présentée de manière raisonnablement indépendante, ces récits leur confèrent sens et valeur qu'elles n'auraient probablement pas autrement.

des contenus, le premier étant absolutiste, le deuxième subjectiviste relativiste et le dernier faillibiliste critique.

Notre modèle de complexification nous permet cependant d'envisager que les étudiants ont la possibilité de développer une pluralité de « conceptions épistémologiques », chacune ayant son utilité dans certains contextes. Autrement dit, les élèves ne sont pas nécessairement de rigides absolutistes / relativistes / faillibilistes. Leur conception de la connaissance peut varier d'un contexte à l'autre, en fonction par exemple du sujet qu'il considère et de leur objectif.

L'idée que des conceptions épistémologiques moins sophistiquées peuvent être utiles dans certains contextes a été proposée par Elby et Hammer (2001) :

« [T]he student epistemology literature fails to distinguish between the correctness and productivity of an epistemological belief. A belief is productive if it generates behavior, attitudes, and habits that lead to "progress" as defined by the given person or community. For instance, even if it is "true" that scientific knowledge is constructed by humans, it may be useful in some contexts for scientists and students to view knowledge as "discovered" in nature. Thus, elementary school students who believe that science is about discovering objective truths to questions, such as whether the earth is round or whether an asteroid led to dinosaur extinction, may ultimately be more likely to succeed in science than students who believe science is about telling stories that vary with one's perspective. Similarly, practicing scientists may find it productive to think of their work in "objectivist" terms, despite the broad consensus among philosophers of science that naïve realism is incorrect. » (Elby & Hammer, 2001, p. 555)

Ce dernier point rejoint en quelque sorte celui de Robert, qui allégeait sa théorie épistémologique en renvoyant au niveau méthodologique l'essentialisme et le réalisme épistémologique. Autrement dit, même si Robert ne postule pas dans sa théorie l'existence d'essences et d'une vérité atteignable, il reconnaît que cette idée est utile au développement des connaissances dans la mesure où elle donne bon espoir à l'individu que les inconsistances de son système de connaissances actuel peuvent être résolues si les efforts y sont mis.

En contexte pratique (d'apprentissage ou de recherche) une conception plus naïve peut donc s'avérer être plus productive. Rien n'empêche cependant qu'une conception plus élaborée puisse être développée et employée lorsque la situation convient ou l'exige. Par exemple, l'étude détaillée d'une controverse scientifique requiert une conception épistémologique sophistiquée, où sont reconnus les mécanismes sociaux du travail scientifique, la faillibilité des hypothèses, le caractère

théoriquement chargé des observations, etc. Mais en contrepartie, une telle sophistication épistémologique ne peut survenir qu'à certaines conditions : avoir le temps d'effectuer une telle analyse, avoir sa disposition l'information pertinente pour la faire, et avant tout avoir un objectif qui nécessite de l'effectuer. La décision d'employer une conception épistémologique plutôt qu'une autre s'effectue donc par une considération de la situation, du cahier des charges associé à la tâche cognitive et des caractéristiques des ressources conceptuelles disponibles.

À titre d'exemple, contrastons une analyse de rapport au savoir⁹¹ proposée par Désautels (2001) à celle que nous ferions de la même situation. Désautels présente deux discours fictifs que l'on pourrait retrouver dans les médias d'information, par exemple une nouvelle présentée au journal télévisé (tableau 3).

Journaliste A	Journaliste B
La revue Nature a fait état en décembre 1999 d'une nouvelle extraordinaire. En effet, dans le cadre du projet Génome Humain, les scientifiques ont réussi à cartographier et séquencer le chromosome vingt-deux. En clair, cela signifie que l'on connaît maintenant d'une part, l'endroit précis où se situe chacun des gènes sur le chromosome et, d'autre part, la constitution de ces gènes et donc la configuration et l'ordre des bases (ACGT) qui composent l'alphabet dans lequel est écrit le message génétique. [...]	La revue Nature rapportait en décembre 1999 que des équipes de scientifiques de plusieurs pays ont mis en commun les résultats de leurs recherches afin de compléter la cartographie et le séquençage du chromosome vingt-deux. Ainsi, selon la théorie standardisée qu'ils utilisent pour effectuer ces recherches, il serait possible de localiser ce qu'ils nomment des gènes sur ledit chromosome et, d'autre part, de décrire leur constitution suivant le modèle moléculaire typique (ADN) dans lequel les bases (ACTG) se succèdent selon un certain ordre. [...]

Tableau 3. Discours fictifs tenus par deux journalistes. Tiré de Désautels (2001, pp. 10-11).

Le premier texte serait formulé dans le cadre d'un rapport au savoir traditionnel, alors que le second témoignerait d'un rapport au savoir émancipé. Dans les termes de Désautels :

« Ainsi, dans un premier mouvement, le journaliste A situe l'activité scientifique dans un monde de choses données à voir, et duquel les sujets seront éventuellement évacués, alors que son collègue situe cette même activité dans un monde de sujets qui produisent des objets de savoir (théories, modèles, etc.) afin de répondre à leurs questions de recherche. Autrement dit, le discours du journaliste A ferme la porte à toute discussion possible sur la

⁹¹ Selon Charlot, il est possible de définir le rapport au savoir comme un « ensemble de relations de sens, et donc de valeur, entre un individu (ou un groupe) et les processus et produits du savoir. » (Charlot, 1997, p. 92) Cette notion est donc directement concernée par les conceptions épistémologiques.

nature même des entités nommées gènes et chromosomes dont les seuls porte-parole légitimes seraient les scientifiques. À l'opposé, le discours de son collègue recèle une telle possibilité de discussion car, par définition, modèles et théories peuvent être questionnés et leur portée appréciée.

[...] le journaliste A [...] pourrait difficilement engager une discussion avec des experts et des expertes scientifiques compte tenu de la position qu'il adopte à l'égard de leurs savoirs. La relation qu'il a construite plus ou moins tacitement à l'égard de ces derniers ne peut guère constituer une source d'émancipation car il est difficile de questionner le statut des savoirs qui disent le VRAI et de contester le discours de ceux et celles qui en sont les porte-parole officiels. » (Désautels, 2001, pp. 11-12)

Désautels n'affirme pas explicitement que toutes les nouvelles scientifiques devraient être présentées à la manière du journaliste B, mais il est clair qu'il déplore le rapport au savoir soumis du journaliste A, que ce dernier aurait acquis à l'école et qu'il contribuerait par ailleurs à propager par son texte.

Bien que nous considérons comme important le développement d'une épistémologie sophistiquée, notre analyse de la situation est différente de celle de Désautels. Dans le cadre d'une approche par conceptions multiples, le rapport au savoir (ou les conceptions épistémologiques) d'une personne est sensible du contexte, de sorte qu'il n'est pas possible d'étudier la possible palette de ses conceptions par l'analyse d'un seul texte. En fait, pour la tâche cognitive considérée (soit ici la communication d'une information vulgarisée de manière appropriée à l'auditoire à l'intérieur de certaines limites de temps), le texte du journaliste A est probablement plus efficace que celui du journaliste B : l'utilisation de termes modaux pour souligner la faillibilité des hypothèses (« il serait possible de »), la référence au caractère construit des connaissances (« ce qu'ils nomment des gènes sur ledit chromosome ») de même qu'au processus social de production (« des équipes de scientifiques de plusieurs pays ont mis en commun les résultats de leur recherche ») donnent une lourdeur au texte susceptible de créer une surcharge cognitive menaçant sa compréhension. Dans les termes de Sperber et Wilson (1986), le texte du journaliste A possède une pertinence plus grande que celui du journaliste B. Autrement dit, ces nuances épistémologiques, bien que valides, n'ont pas d'utilité étant donnée la tâche : tenir un discours épistémologiquement irréprochable est un luxe cognitif que l'on ne peut se permettre en permanence.

Mais lorsque la situation l'exige, l'individu devrait être capable d'employer une conception épistémologique plus complexe et plus nuancée. Dans notre perspective,

cette situation ne diffère guère de celle dans laquelle était placée Gould lorsqu'il expliquait comment le comportement social des fourmis dépendait de la quantité de gènes partagés : il avait recours à une représentation grossièrement erronée pour expliquer efficacement un phénomène, mais était cependant prêt à employer, sur commande, l'explication correcte mais plus fastidieuse.

Un instant de réflexivité

Le deuxième exemple que nous emploierons pour démontrer l'intérêt de notre modèle de complexification conceptuelle pour des contenus autres que ceux des sciences naturelles provient de la didactique des sciences : le contenu de notre thèse elle-même.⁹²

Tout d'abord, nous avons tenté d'exposer une histoire reconstituée du programme de recherche sur le changement conceptuel. Celle-ci a débuté avec une présentation des recherches sur les conceptions des élèves, recherches qui ont mené à la perspective constructiviste, qui a par la suite été dépassée par des modèles de changement conceptuel plus détaillés. Une fois ce programme de recherche lancé, les modèles ont progressivement exploré ce que nous avons appelé l'espace de la problématique, comprenant une région centrale (les modèles traditionnels) de même que des thèmes plus périphériques, comme le traitement des données anomales, l'influence de l'épistémologie personnelle, le volet social de la cognition et les facteurs motivationnels. À l'intérieur de la région centrale de la problématique, les distinctions microscopique / macroscopique, compréhension / croyance, psychologique / épistémologique, remplacement / conceptions multiples, ont constitué des outils précieux pour nous permettre de comparer les modèles entre eux, faire ressortir ce qu'ils n'explicitent pas et pour finalement conclure que la plupart du temps ceux-ci sont complémentaires plutôt qu'exclusifs.⁹³

⁹² Après tout, l'explicitation des diverses relations existant entre les alternatives conceptuelles constitue un des volets de l'expertise, et cette thèse vise entre autres à démontrer la nôtre sur un thème de la didactique des sciences, soit celui d'une facette du changement conceptuel.

⁹³ Comme nous l'avons mentionné à la section 2.2.5.2, Potvin (2002) propose une trame différente pour le programme de recherche : de la rupture vers la continuité.

Ensuite, comme on l'aura remarqué, ce troisième chapitre a fait un usage répété du modèle des jeux de la connaissance proposé par Larochelle et Désautels. L'objectif n'était pas de critiquer le modèle de Larochelle et Désautels en soi, mais plutôt de nous donner par cette critique l'occasion de mieux définir notre propre modèle en soulignant ses originalités et les problèmes qu'il résout comparativement à celui des jeux de la connaissance. Autrement dit, ceci nous a permis d'insérer ces deux modèles dans un récit argumenté éclairant à la fois l'un et l'autre.

CHAPITRE 4 - VOLET EMPIRIQUE : ÉTUDE DES STRUCTURES DÉCISIONNELLES

Retour

En nous inspirant de la littérature sur la didactique de la mécanique quantique et de celle portant sur le changement conceptuel, nous avons retenu comme sujet de recherche les structures cognitives gérant la coexistence de deux conceptions alternatives (chapitre 1).

Comme travail préparatoire à l'exploration ce sujet, nous avons explicité les bases psychologiques et épistémologiques que nous employons dans cette thèse (section 2.1). Nous avons ensuite effectué un survol plutôt détaillé de la littérature existant sur le sujet du changement conceptuel (section 2.2), au sein de laquelle nous avons retrouvé plusieurs contributions pertinentes à la compréhension du phénomène des conceptions multiples.

Mais puisque ces contributions nous sont apparues fortement dispersées au sein de la littérature sur le changement conceptuel, nous nous sommes donné comme objectif de produire, par une réflexion théorique, un modèle qui viendrait les synthétiser et les développer. Pour ce faire, nous avons d'abord tenu à rejeter explicitement certaines présuppositions que l'on semble retrouver à l'occasion dans la littérature et qui constituent selon nous des restrictions indues imposées à l'étude de ce phénomène (section 3.1) : celle que les élèves font des jugements de valeur de manière unidimensionnelle à l'endroit de leurs conceptions ; et celle que les conceptions alternatives sont isolées puisqu'elles appartiennent à des sphères d'activité cognitive essentiellement distinctes. Une fois ces restrictions explicitées et rejetées, nous avons été en mesure de répondre à notre question de recherche et de spécifier la nature des structures cognitives assurant la juxtaposition entre deux conceptions alternatives (section 3.2). Nous avons proposé de distinguer cinq types de structure : 1) les structures descriptives, décrivant les différences et les similarités des conceptions alternatives; 2) les structures évaluatives, par lesquelles sont comparées les forces et les faiblesses des conceptions; 3) les structures explicatives, qui expliquent l'origine de la plausibilité de la conception jugée inférieure; 4) les structures transformatives, qui représentent une suite de transformations opérées sur

une conception et menant à son alternative; et 5) les structures décisionnelles, par lesquelles l'individu vient à opter pour l'emploi d'une conception plutôt que son alternative.

Le chapitre 3 a synthétisé la littérature sur le phénomène des conceptions multiples et a tenté de développer quelques idées nouvelles en s'inspirant souvent de travaux épistémologiques. Mais au lieu de prétendre être parvenu à présenter un modèle complet du phénomène des conceptions multiples, nous pensons qu'il est plus exact de voir notre contribution jusqu'à maintenant comme un travail visant à fournir une esquisse grossière, mais révélatrice, de la complexité de ce phénomène.

Suite de la thèse

Nous proposons donc, dans ce quatrième chapitre, de poursuivre notre réflexion sur le phénomène des conceptions multiples en recourant à une étude empirique. La première partie du chapitre sera consacrée, d'une part, à l'explicitation du rôle que jouera l'expérimentation dans notre recherche, et d'autre part à la spécification de l'aspect du phénomène, parmi ceux possibles, sur lequel portera l'expérimentation. La seconde partie présentera d'abord une revue des méthodes de recherche empirique employées dans l'étude du changement conceptuel, puis les détails de la méthode que nous emploierons dans notre recherche. Nous procéderons finalement à la présentation et à l'analyse des données recueillies et discuterons de leur impact sur notre compréhension du phénomène.

4.1 OBJECTIF DU VOLET EMPIRIQUE

Dans cette section, nous précisons l'objectif que nous poursuivons par le volet empirique de notre recherche. Pour ce faire, nous spécifierons d'abord la fonction que nous attribuerons à l'expérimentation, i.e. sa fonction exploratoire. Par la suite, nous identifierons les nombreux axes qu'il nous est possible de tenter de développer par une telle expérimentation. Et puisque toutes ces possibilités de développement ne peuvent être poursuivies dans le cadre de cette thèse, nous concluons cette section par le choix d'un objectif spécifique de développement.

4.1.1 Fonction du volet empirique

4.1.1.1 Volet théorique

Une méthode scientifique peut être définie comme toute procédure générale et formulée systématiquement qui serait derrière la poursuite efficace de la science (Gutting, 2000). Mais malgré les efforts des épistémologues et des scientifiques eux-mêmes, aucune méthode générale ne fait consensus. Au niveau de la pratique, les scientifiques ne sont pourtant pas dépourvus de méthodes : ils ont recours à des procédures expérimentales et théoriques reconnues, même si elles ne sont pas aussi explicites et systématisées qu'un épistémologue pourrait le désirer (Gutting, 2000).

Ainsi, l'étude d'un phénomène comme celui des conceptions multiples n'est pas commandée par une procédure rigide, la même que devrait suivre toute recherche portant sur le changement conceptuel par exemple. Le choix quant à la façon de mener une recherche sur un phénomène dépend de plusieurs facteurs. Les deux que nous avons pris en considération sont 1) le bassin d'idées déjà existantes dans la littérature, et 2) les perspectives de développement de la modélisation du phénomène.

Le premier facteur nous a amené à adopter dans un premier temps une perspective plutôt théorique. En effet, du fait de l'existence d'une littérature limitée et dispersée sur le phénomène des conceptions multiples, le plus avantageux nous a paru d'opter d'abord pour une recension, une organisation et un développement de ces idées. Comme mentionné, ce fut l'objectif des chapitres 2 et 3.

Même si dans ces chapitres notre travail a été effectué sans recours à l'expérimentation, nous pensons que ce que nous avons proposé possède tout de même une certaine plausibilité. D'abord une plausibilité épistémologique, puisque nous avons tenté de faire des rapprochements avec les acquis de l'épistémologie lorsque cela s'avérait possible. Ensuite une plausibilité empirique, puisque ce que nous avons proposé s'appuie grandement sur une revue de la littérature didactique au sujet du phénomène des conceptions multiples (section 2.2.4), qui possède elle-même un support empirique assez ferme. Il serait par conséquent faux de penser que notre chapitre 3 constitue une réflexion théorique purement spéculative, dont la détermination de la valeur serait en attente de résultats empiriques jusqu'à présent inexistants.

Nous avons poussé le travail de réflexion théorique le plus loin qu'il nous a été possible de le faire, en tentant d'identifier les différents volets du phénomène des conceptions multiples, puis en systématisant et en développant les idées existantes. Pour poursuivre notre étude de ce phénomène, nous pensons qu'il est maintenant nécessaire de nous tourner vers l'analyse de données empiriques.

4.1.1.2 Volet empirique

Le recours à l'expérimentation peut accomplir plus d'une fonction. Il est par conséquent important de spécifier le rôle que nous désirons faire jouer à l'empirique.

Pour reprendre une distinction faite en épistémologie et présentée précédemment, nous pouvons distinguer, sans qu'ils soient nécessairement indépendants, deux contextes d'utilisation des données produites lors d'une expérimentation. Elles peuvent d'abord jouer un rôle justificatif : l'expérimentation permet de mettre à l'épreuve une hypothèse particulière générée par un modèle. Dans ce contexte, l'expérimentation est conçue comme un tribunal empirique où est testée la valeur du modèle. Dans le milieu de l'éducation, on parle alors de « recherche vérificative » (van der Maren, 1996, p. 200).

Mais l'expérimentation participe également au contexte de découverte. Autrement dit, la production de matériel empirique et son analyse peuvent stimuler le développement d'une approche théorique. Ainsi, la réflexion créatrice s'alimente ici

non pas des idées déjà présentes dans la littérature ou encore d'intuitions personnelles, mais des données originales produites par l'expérimentation. Dans le milieu de l'éducation, une telle recherche est dite « exploratoire » :

« La recherche exploratoire a pour but de générer des hypothèses, c'est-à-dire d'examiner un ensemble de données afin de découvrir quelles relations peuvent y être observées, quelles structures peuvent être construites. Elle cherche à voir quels énoncés pourraient être formulés à propos d'un objet problématique. » (van der Maren, 1996, p. 191)

Le terme « exploratoire » pourrait laisser penser qu'une recherche de ce type a comme fonction d'étudier un phénomène jusqu'alors inconnu ou mal compris, comme on explore une île vierge ou un continent nouveau. La découverte se ferait dans ce cas de manière essentiellement inductive, où le traitement des données empiriques serait peu ou pas contaminé par des préjugés théoriques préexistants. Si elle était défendue, une telle conception de la recherche exploratoire serait limitative et peu crédible au plan épistémologique. En effet, la reconnaissance que toute observation est chargée de théorie est un lieu commun en épistémologie depuis près d'une cinquantaine d'années. Il est illusoire de vouloir fonder l'objectivité scientifique sur des observations « pures » : tout phénomène est abordé à l'aide de notions théoriques (voir notre présentation du correctionnisme à la section 2.1.4.4). Ainsi, ce qui est exploré lors d'une recherche exploratoire, c'est non seulement un phénomène, mais aussi les outils conceptuels employés pour comprendre ce phénomène. Le monde et notre système de connaissance sont en interaction et la recherche exploratoire a pour fonction de favoriser le mûrissement de cette interaction. Il faut cependant remarquer qu'il n'existe aucune garantie qu'une telle recherche puisse effectivement aider à un développement théorique intéressant, celui-ci dépendant entre autres de la nature du phénomène, des caractéristiques du chercheur et du matériel empirique produit.

En somme, une recherche exploratoire est une recherche visant, sans qu'il y ait de garantie, le développement d'une approche théorique à propos d'un phénomène, approche théorique pouvant être initialement plus ou moins développée et plus ou moins explicite. Ainsi, le critère pour décider de se lancer ou non dans une recherche exploratoire semble être la perspective de pouvoir développer de manière intéressante les ressources théoriques initiales.

C'est sur la base de ce critère que nous avons opté pour une recherche empirique de type exploratoire dans cette deuxième partie de notre thèse. En effet, nous pensons que le phénomène des conceptions multiples est un phénomène dont plusieurs des aspects n'ont été jusqu'à maintenant que peu étudiés, et que l'approche théorique que nous avons proposée au chapitre 3 s'avère suffisamment élaborée et ouverte pour nous guider de manière intéressante dans la poursuite de son exploration.

Il aurait été possible d'opter pour une recherche empirique visant à valider une hypothèse spécifique tirée de notre modèle. Mais, dans notre situation particulière, nous croyons qu'une recherche exploratoire est, d'une part, au moins aussi simple à conduire qu'une telle recherche de validation, et, d'autre part, potentiellement beaucoup plus fructueuse.

4.1.2 Axes de développement possibles

Mais avant de se lancer dans la présentation de notre façon de mener notre recherche exploratoire, il nous apparaît nécessaire d'explicitier d'abord ce qui peut être développé à partir de notre modèle de complexification. Dans la section suivante, nous limiterons notre démarche exploratoire qu'à un seul des axes de développement possibles. En effet, le phénomène des conceptions multiples nous apparaît complexe, et il serait téméraire de tenter de développer toutes les facettes de sa modélisation à l'occasion d'une recherche d'envergure nécessairement limitée.

À la suite de Driver et Erickson (1983) et Hasweh (1988), nous avons distingué au premier chapitre trois axes aux recherches sur les conceptions des élèves. Le premier, rapidement exploré dès la fin des années 1970, consiste à identifier et à décrire les conceptions des élèves à propos de différents sujets. Le second a une visée explicative : il s'agit de modéliser ces conceptions de manière à expliquer leur stabilité et de comprendre le processus de leur développement. Le programme de recherche sur le changement conceptuel, auquel nous avons accordé toute notre attention à la section 2.2, a incarné ce besoin de dépasser les recherches simplement descriptives. Le troisième axe a un objectif prescriptif : on tente d'identifier les stratégies d'enseignement favorisant l'évolution des conceptions des élèves. Pour être

fondées, de telles recherches doivent recourir à des modèles d'apprentissage appartenant à l'axe explicatif.

Cette subdivision des types de recherche peut être reprise pour nous aider à identifier les lignes de développement potentiel de notre modèle.

Axe descriptif

Une première possibilité est d'utiliser notre modèle pour effectuer des recherches descriptives, c'est-à-dire en l'employant comme un instrument théorique nous permettant de caractériser la pensée des élèves relativement au phénomène des conceptions multiples. Bien que les recherches descriptives aient historiquement précédé et stimulé l'élaboration de modèles de changement conceptuel, notre point de départ dans le processus d'élaboration de notre modèle de complexification conceptuelle a plutôt été la littérature sur le changement conceptuel elle-même, plus précisément les diverses contributions sur le phénomène des conceptions multiples. Pour notre modèle, une telle application constituerait ainsi un premier contact direct avec les recherches descriptives. Par exemple, à la suite d'une séquence d'instruction sur les théories concernant l'origine des espèces, nous pourrions nous poser les questions suivantes :

- Quelles relations les élèves parviennent-ils à faire entre les explications créationniste, lamarckienne et darwinienne ?
- Dans quelle mesure sont-ils capables de comparer les forces et les faiblesses de chacune de ces explications ?
- Parviennent-ils à développer des structures transformatives ? Si oui, quelle rationalité incarnent-elles ? Sont-elles associées à des émotions cognitives ? etc.
- Utilisent-ils une conception lamarckienne de l'évolution dans certains contextes ?

Notre modèle peut donc servir de stimulant pour les recherches descriptives sur les conceptions multiples. De telles recherches descriptives demeurent essentielles, pour au moins deux raisons. D'abord, bien qu'elles soient en elles-mêmes insuffisantes pour déterminer les stratégies d'enseignement, il est impératif de connaître les points de départ et d'arrivée des élèves (de même que les intermédiaires) au cours d'un enseignement traditionnel si l'on désire éventuellement améliorer cet enseignement en proposant des stratégies plus adaptées.

Ensuite, les recherches descriptives pourraient influencer en retour notre modèle en exposant ses éventuelles insuffisances et en suggérant des pistes d'amélioration. Mais nous devons souligner que cette rétroaction n'est pas inconditionnelle puisque les recherches descriptives sur le changement conceptuel peuvent comporter un volet normatif. Pour prendre un exemple, si nous sommes amené à identifier la formation de structures cognitives inattendues et peu fonctionnelles chez les élèves entre le créationnisme et le darwinisme, nous n'avons pas à conclure que notre modèle est inapproprié : il est également possible de soutenir que notre modèle spécifie la nature de l'apprentissage réussi et qu'il n'a pas à être ébranlé par les étranges réponses d'élèves de leur apprentissage. En somme, la tension entre les pôles descriptif et normatif donne une certaine flexibilité à l'incidence que nous accordons à une recherche descriptive sur un modèle explicatif.

Axe explicatif

Il nous est également possible de poursuivre le développement de notre modèle en nous efforçant d'y intégrer différents facteurs ou processus cognitifs supplémentaires.

Par exemple, nous pourrions tenter de faire davantage de liens avec les études portant sur la métacognition : quels sont les facteurs influençant le développement de la métacognition (en général ou relativement à un domaine spécifique) et comment celle-ci stimule ou freine l'élaboration des diverses structures à la base de la complexification conceptuelle ? Nous pourrions également chercher à réinterpréter notre modèle selon un point de vue de gestion des conflits cognitifs et d'évaluation des données (par exemple dans l'approche de Chinn et Brewer). Aussi, la formation des structures transformatives pourrait être étudiée dans la perspective du développement des croyances épistémologiques. Nous pourrions nous attendre à ce que les aspects motivationnels et sociaux aient également une incidence importante à ce niveau. De plus, un raccord plus systématique pourrait être effectué avec la littérature sur la résolution des problèmes complexes et plus particulièrement en ce qui concerne le choix des ressources cognitives et de leur adaptation sur place aux besoins de la situation. Nul doute que ce processus cognitif complexe pourrait donner prise à plusieurs questions de recherche intéressantes.

Axe prescriptif

Finalement, il ne faut pas oublier l'axe prescriptif. Au début des recherches descriptives, plusieurs auteurs ont proposé des activités d'enseignement sur la base des conceptions qu'ils avaient identifiées chez les élèves. Mais il est apparu évident que les stratégies d'enseignement devaient, pour être justifiées, s'appuyer sur des modèles d'apprentissage éprouvés, ce qui peut expliquer certains des faux départs qu'ont pu connaître ces recherches prescriptives. Ainsi, la recherche prescriptive associée à un modèle explicatif d'apprentissage ne peut recevoir pleine attention qu'une fois que ce modèle est suffisamment étayé.

En ce sens, l'étude préalable des facteurs pouvant influencer la complexification conceptuelle, comme la métacognition, les croyances épistémologiques, les processus de résolution de problème, etc., jouera un rôle préalable déterminant pour toute recherche sur les stratégies d'enseignement. Une fois ces aspects minimalement connus, il sera plus facile d'une part de proposer de nouvelles stratégies d'enseignement plausiblement efficaces, et d'autre part de conceptualiser les points forts et faibles des différentes stratégies (nouvelles ou traditionnelles), c'est-à-dire d'évaluer dans le détail leur impact sur les différents volets de l'apprentissage tel qu'il est envisagé par le modèle. Par exemple, il serait intéressant de déterminer les effets qu'ont sur la complexification conceptuelle les approches basées sur l'histoire des sciences, les débats critiques, les activités de résolution de problèmes, etc.

Mais un modèle de changement conceptuel ne fait pas qu'ouvrir la porte à l'étude de l'efficacité des stratégies d'enseignement. En effet, ces stratégies ne sont que des moyens pour l'atteinte des objectifs d'apprentissage; or ces objectifs peuvent eux-mêmes être reformulés ou modifiés à la lumière du modèle d'apprentissage. Ici ressort l'aspect normatif d'un tel modèle : il aide à préciser la nature de l'apprentissage souhaité. Selon notre modèle de complexification, une pensée « complexe » devient un des objectifs à atteindre, et la place de cette visée au sein du curriculum doit à son tour être pensée et discutée. Cette réflexion mérite certainement davantage d'attention que celle que nous lui avons accordée jusqu'à maintenant.

4.1.3 Aspect du modèle retenu pour la recherche exploratoire

Nous avons donc devant nous un bon nombre de façons de poursuivre l'étude du phénomène des conceptions multiples sur la base du modèle présenté au chapitre 3, un nombre évidemment trop élevé pour qu'il soit raisonnable de toutes les poursuivre dans le cadre de cette thèse. Nous devons donc restreindre notre foyer d'attention à un sous-ensemble limité de questions.

4.1.3.1 Choix l'axe de développement

Choisissons d'abord l'axe de développement. L'axe prescriptif est particulièrement important, puisque c'est par lui qu'il est possible de venir influencer et améliorer les pratiques éducatives. Mais nous pensons que ce n'est que lorsqu'un modèle d'apprentissage est suffisamment étayé qu'il peut servir efficacement de guide aux recherches prescriptives; nous remettons donc à plus tard le développement de cette voie.

D'autre part, de nombreuses et intéressantes questions théoriques se retrouvent potentiellement dans l'axe explicatif, notamment aux différentes jonctions qu'il existe entre notre modèle de changement conceptuel et les autres secteurs de la psychologie cognitive (par exemple : évaluation des données, croyances épistémologiques, argumentation, résolution de problèmes). Mais ces questions, pour être formulées et explorées de manière empirique, requerraient au préalable des revues de la littérature plus systématiques que celles que nous avons effectuées sur ces thèmes jusqu'à maintenant.

Quant à l'axe descriptif, il peut sembler nettement moins innovateur que l'axe explicatif. En effet, les recherches visant à identifier les conceptions se sont rapidement multipliées dans les années 1980 : une fois les premières réalisées, il n'y avait qu'à varier le thème étudié (mouvement, gravité, matière, électricité, système digestif, reproduction, nature de la science, etc.) et l'âge des sujets (niveau primaire, secondaire, collégial, universitaire) pour obtenir une nouvelle recherche. Cependant, ces recherches ne risquent de blaser que si elles se font dans un environnement théorique trop appauvri pour engendrer de nouvelles idées. Ainsi, avec un modèle déjà en main, une recherche descriptive peut être éclairante en pointant vers des

lacunes théoriques, en suggérant de nouvelles relations causales, etc. C'est pour ce type de recherche que nous opterons, puisqu'il est ainsi possible, sans préparation théorique supplémentaire, de stimuler le développement de notre modèle.

4.1.3.2 Choix de l'aspect du modèle

Notre modèle propose l'existence de plusieurs structures à la base de la complexification conceptuelle. Une recherche descriptive peut s'intéresser à l'une ou l'autre, ou encore toutes à la fois. Plusieurs possibilités s'offrent à nous, mais nous n'en retiendrons qu'une seule.

D'abord, les structures descriptives que les élèves créent (ou manquent de créer) entre diverses alternatives conceptuelles pourraient être étudiées. Nous pourrions par exemple tenter de déterminer sur quoi portent les ressemblances et les différences identifiées par les élèves : sur des caractéristiques superficielles ou encore sur des aspects plus fondamentaux (des obstacles) ? Aussi, nous pourrions tenter d'évaluer la capacité qu'ont les élèves à traduire des énoncés formulés dans le cadre d'une conception dans les termes d'une conception alternative.

L'évaluation des conceptions par les élèves a fait l'objet de nombreuses recherches, mais notre approche souligne l'intérêt d'étudier les évaluations faites de manière comparative. L'empirique vient-il jouer un rôle accru dans les contextes comparatifs ? Ya-t-il utilisation de critères épistémologiques plus sophistiqués ? etc.

Concernant les structures explicatives, il serait assurément tentant d'étudier la maîtrise des différentes formes d'explication par des élèves situés à différents niveaux, mais aussi la puissance qu'ils accordent à une telle explication dans la hiérarchisation des conceptions alternatives.

Les structures transformatives sont des structures complexes. Les élèves des différents niveaux académiques sont-ils en mesure d'en élaborer ? Dans quelle mesure utilisent-elles des structures descriptives, évaluatives et explicatives ? Incorporent-elles une certaine conception du progrès cognitif ? Parviennent-elles à faire vivre certaines émotions cognitives complexes ?

Il faut reconnaître que l'existence de ces quatre types de structures cognitives apparaît déjà plausible pour quiconque consulte un bon livre d'histoire des sciences ou encore d'épistémologie, où les idées scientifiques sont présentées, discutées, comparées, évaluées, etc. Nous nous sommes d'ailleurs inspirés à plusieurs occasions d'auteurs appartenant à ces domaines dans la section 3.2. Une recherche exploratoire qui porterait sur les structures descriptives, évaluatives, explicatives ou encore transformatives serait fort pertinente et déboucherait assurément sur de nombreuses conclusions intéressantes, mais elle viendrait développer des aspects de notre modèle de complexification conceptuelle qui possèdent déjà une plausibilité théorique.

Il en va autrement en ce qui concerne les structures décisionnelles. Cette notion n'a pas vraiment de pertinence du point de vue de l'histoire des sciences et de l'épistémologie traditionnelle et nous n'avons pu tirer de ces domaines des hypothèses initiales pertinentes. La thèse de l'existence de structures décisionnelles est une thèse entièrement psychologique : même si une conception est historiquement dépassée ou encore épistémiquement dévalorisée, un individu peut l'entretenir en même temps que ses alternatives, auquel cas un processus de décision doit exister pour spécifier son contexte d'utilisation. Ce processus d'activation est un processus psychologique malheureusement extrêmement peu connu. Les « théories du contexte » proposées dans la littérature nous sont apparues très sommaires. Nous avons retenu l'hypothèse de signaux terminologiques et conceptuels. Nous avons proposé l'existence possible de signaux sociologiques. De plus, nous nous sommes efforcé de développer l'idée d'une activation par l'évaluation coûts-bénéfices, qui serait basée sur la construction d'un cahier des charges et l'utilisation de jugements sur les caractéristiques des ressources conceptuelles à la disposition des élèves.

La composante décisionnelle du phénomène des conceptions multiples est celle qui nous apparaît la plus obscure à l'heure actuelle. Nous pensons qu'il faille faire preuve d'humilité devant cet aspect du phénomène et reconnaître que les hypothèses que nous avons retenues et développées ne constituent que des tâtonnements hésitants au sein de cette obscurité. Par conséquent, nous jugeons que c'est cet aspect de la complexification conceptuelle qui bénéficierait le plus de la lumière que pourrait générer une recherche exploratoire.

4.2 MÉTHODE

Une fois spécifié l'objet de notre recherche exploratoire, nous devons choisir la procédure que nous allons suivre pour la conduire. C'est l'objectif de cette section. Nous effectuerons d'abord un survol des méthodes employées dans les principales recherches sur le changement conceptuel, qui aura pour fonction de révéler la diversité de ces méthodes. Nous enchaînerons par la suite par l'exposition de la méthode expérimentale spécifique que nous avons retenue pour notre recherche. Cette exposition consistera alors en la présentation du type de méthode retenue, des sujets et des tâches soumises aux sujets.

4.2.1 Les méthodes employées dans l'étude du changement conceptuel

Comme nous l'avons constaté à la section 2.2, l'espace de la problématique du changement conceptuel a été exploré par une multitude de recherches, qui doivent être vues comme complémentaires plutôt qu'en opposition. La diversité des approches théoriques se fait sentir au niveau méthodologique : il n'y a pas une façon unique d'étudier le changement conceptuel. Une revue des pratiques de recherche empirique nous permettra donc de mettre en perspective notre propre méthode.⁹⁴

4.2.1.1 Les principaux modèles de changement conceptuel

Le modèle macroscopique de Posner, Strike, Hewson et Gertzog

La recherche sur le changement conceptuel a fortement été stimulée par le modèle de Posner et al. (1982). Rappelons que ce modèle a tenté d'identifier les conditions pour lesquelles il serait rationnel que les étudiants optent pour l'explication proposée en classe. Pour formuler leur modèle, ces auteurs se sont grandement inspirés des théories épistémologiques développées dans les années 1960 et 1970. En contrepartie, l'analyse de données empiriques semble n'avoir joué qu'un faible rôle. Dans leur article de 1982, les auteurs rapportent avoir effectué des entrevues au sujet de la relativité restreinte avec un nombre non spécifié d'étudiants suivant un cours d'introduction à la physique de niveau collégial. Il était demandé aux participants de

⁹⁴ Cette revue concerne les méthodes employées et leurs rôles dans chaque recherche. Pour une présentation du contenu théorique de ces recherches, voir la section 2.2.

résoudre des problèmes à haute voix, en justifiant leur réponse. Cependant, les résultats de ces entrevues n'ont servi qu'à illustrer les aspects du modèle et non à le développer.

De ces auteurs, Hewson est le seul qui s'est efforcé de rattacher le modèle à des résultats empiriques. Par exemple, Hewson (1982) a effectué une étude de cas sur la compréhension de la relativité restreinte d'un étudiant gradué en physique. Cet étudiant a été interviewé à trois occasions alors qu'il suivait un cours sur le sujet. Cette étude de cas n'avait pas une fonction vérificative, mais semble plutôt avoir joué un rôle exploratoire : Hewson s'en est servi pour montrer le rôle que jouent les engagements métaphysiques dans ce processus spécifique de changement conceptuel et comment ces engagements peuvent être influencés par des interventions.

Les modèles microscopiques de diSessa et de Vosniadou

Bien que le travail intellectuel conduisant aux théories scientifiques soit rarement visible dans une publication (G. N. Gilbert & Mulkay, 1984), il apparaît clairement que diSessa a développé son approche suite à un important travail de réflexion portant sur des résultats empiriques. En effet, diSessa a rejeté très tôt l'idée que les conceptions constituaient des entités psychologiques monolithiques en s'appuyant sur des analyses de données recueillies à l'aide de micromondes informatiques (diSessa, 1982). Ces environnements informatisés, représentant des situations physiques, pouvaient être manipulés par le sujet dans sa tentative de résoudre un problème simple (par exemple, donner une impulsion à un objet pour lui faire atteindre une cible). En proposant à son unique sujet de résoudre une série de tâches, diSessa a pu mettre en évidence l'utilisation de stratégies intuitives fragmentées (non systématisées). De plus, la succession des tâches lui a permis de faire une analyse génétique, montrant que le sujet a orchestré progressivement une grande quantité de compréhensions partielles (diSessa, 1982). Ce n'est qu'une décennie après ces premiers travaux empiriques que diSessa a effectué une présentation définitive de son modèle théorique, où il introduit les notions de p-primis et de classes de coordination (diSessa, 1993).

Stella Vosniadou a procédé de manière similaire dans l'élaboration de son modèle (Vosniadou & Brewer, 1992). En questionnant individuellement soixante élèves de

niveau primaire (appartenant à différentes années) lors d'entrevues de 30 à 45 minutes, cette chercheuse a inventorié les divers modèles mentaux que semblaient employer ces élèves à propos de la Terre (voir figure 8). Suite à ce travail descriptif, Vosniadou a proposé l'existence chez les élèves de présuppositions difficiles à renverser, expliquant ainsi la difficulté du changement conceptuel et les modèles synthétiques trouvés chez plusieurs élèves. Vosniadou a publié une analyse similaire des réponses de ces mêmes élèves au sujet du cycle jour/nuit (Vosniadou & Brewer, 1994). Puisque le modèle de Vosniadou avait déjà été formulé au moment de cette publication, cette dernière semble avoir joué une fonction davantage expositive et vérificative qu'exploratoire.

Comme mentionné précédemment, Ioannides et Vosniadou (2002) ont appliqué avec succès le modèle de cette dernière au cas de la mécanique intuitive en employant une procédure similaire à celle utilisée par Vosniadou et Brewer, avec cette fois-ci 105 élèves de 4 à 15 ans. Les résultats de cette recherche ont cependant été critiqués par diSessa et ses collègues, suite à une réplique de la partie empirique de la recherche de Ioannides et Vosniadou (diSessa et al., 2004). Par ces recherches, les modèles de diSessa et Vosniadou en sont donc arrivés à un stade de comparaison empirique, de nature clairement vérificative.

Les modèles épistémologiques intermédiaires

Même si la didactique francophone s'est beaucoup inspirée de Bachelard, ce dernier n'a pas travaillé à partir de matériel empirique. Bachelard a développé son idée d'obstacle épistémologique en faisant référence à son expérience d'enseignant des sciences et, surtout, en s'appuyant sur ses analyses historiques (Bachelard, 1938/1999). En didactique francophone, cette notion a été employée par de nombreux auteurs pour l'analyse des conceptions élèves mises en évidence par leurs recherches empiriques. Mais vu la diversité de ces recherches, il n'est pas possible d'associer la notion d'obstacle à l'emploi d'une méthodologie particulière.

Le deuxième modèle que nous avons classé dans la catégorie des modèles épistémologiques est celui proposé par la psychologue Chi, qui propose que la difficulté d'un changement conceptuel réside dans la nécessité du repositionnement d'un concept dans l'arbre des catégories ontologiques (Chi, 1992). Chi a développé

ce modèle en s'appuyant sur les recherches sur les conceptions des élèves produites depuis la fin des années 1970, mais aussi sur diverses théories épistémologiques. Aucune recherche empirique spécifique n'est donc à la base de ce modèle. Récemment, Chi s'est penchée particulièrement sur le changement conceptuel requis pour l'apprentissage des processus émergents, apprentissage que le modèle de Chi prédit comme étant difficile (Chi, 2005). Cette prédiction a été testée par une recherche empirique vérificative à propos de l'apprentissage des notions de base en électricité, phénomène catégorisé comme un processus émergent (Slotta & Chi, 2006). La méthode employée consistait à faire précéder le cours en électricité par une formation générale sur les processus émergents pour le groupe test (12 participants de niveau universitaire) et par un module sans lien pour le groupe contrôle (même nombre de participants). L'analyse des pré-tests et post-tests (des questions à choix multiples) a révélé que la formation sur les processus émergents a effectivement bénéficié aux participants du groupe test.

La troisième approche que nous avons présentée dans la section des modèles épistémologiques intermédiaires est celle de Chinn et Samarapungavan (Chinn & Samarapungavan, 2008). Comme mentionné, ces auteurs utilisent la notion de modèle pour synthétiser plusieurs des résultats de recherche sur le changement conceptuel. Aucune recherche empirique, exploratoire ou vérificative, n'a encore été effectuée spécifiquement à partir de cette approche théorique.

L'étude du traitement des données anormales par Chinn et Brewer

Dans les recherches sur le changement conceptuel, beaucoup d'attention a été accordée au thème du conflit cognitif. Dans cette revue des méthodologies, nous nous limiterons au cas des travaux de Chinn et Brewer. Ces auteurs ont d'abord proposé une taxonomie des réponses possible face à des données anormales en faisant référence aux travaux en histoire des sciences, en psychologie et en didactique des sciences (Chinn & Brewer, 1993). Ils ont par la suite testé leur taxonomie en soumettant à 168 sujets universitaires un texte proposant une théorie sur l'extinction des dinosaures, puis une ou deux données anormales à expliquer par écrit. L'analyse des réponses obtenues a confirmé l'existence des 7 types de réponses proposées initialement, mais un type de réponse a dû être ajouté à la taxonomie (Chinn &

Brewer, 1998a). Cette recherche empirique a donc joué un rôle à la fois vérificatif et exploratoire.

Les résultats de cette même recherche empirique ont été employés par ces chercheurs pour appuyer leur hypothèse sur le processus cognitif à la base du traitement des données anomales : les sujets se construisent un modèle mental pour évaluer ces dernières (Chinn & Brewer, 2001). Bien que ces auteurs présentent cette recherche empirique comme ayant une fonction vérificative, il est possible qu'elle ait en fait joué un rôle d'abord exploratoire.

Discussion

Cette revue des méthodes empiriques employées dans les contributions marquantes sur le changement conceptuel révèle plusieurs choses. D'abord, en ce qui concerne le contexte de découverte, nous constatons que plusieurs de ces travaux sont issus d'une réflexion essentiellement théorique s'inspirant des travaux en didactique et en psychologie bien sûr, mais également en épistémologie et en histoire des sciences. Les recherches empiriques subséquentes peuvent alors aider à poursuivre ou préciser le modèle théorique, ou encore à illustrer la façon dont il permet de lire la réalité.⁹⁵ Au contraire, d'autres modèles semblent avoir été élaborés à la suite d'une recherche descriptive empirique portant sur les conceptions des élèves.⁹⁶ Il est intéressant de souligner que ces modèles sont ceux que nous avons catégorisés comme étant microscopiques, c'est-à-dire les modèles qui cherchent à décrire la structure psychologique fine derrière les conceptions des élèves de même que son évolution.

En ce qui concerne le contexte de justification, nous pouvons remarquer que les recherches empiriques à fonction vérificative sont souvent effectuées quelques années après la formulation initiale du modèle (lorsqu'elles le sont). Ce type de recherche n'apparaît pas être une préoccupation pressante pour les chercheurs. Ceci pourrait être dû au fait que l'espace de la problématique du changement conceptuel est vaste et que peu de modèles entrent encore réellement en conflit, ce qui rendrait nécessaire un recours au tribunal empirique. Le conflit que l'on retrouve entre les

⁹⁵ En terminologie anglaise, cette façon de procéder serait qualifiée de *top-down*.

⁹⁶ En terminologie anglaise, cette façon de procéder serait qualifiée de *bottom-up*.

modèles de diSessa et de Vosniadou constitue encore un cas encore isolé dans le programme de recherche. Dans ce contexte, la popularité d'un modèle réside peut-être plus dans sa plausibilité (en regard des recherches antérieures et des autres disciplines) et dans sa fertilité (sa capacité à pointer vers de nouvelles pistes de recherche) que dans sa vérification empirique directe.

4.2.1.2 Les recherches sur les conceptions multiples

Nous pouvons poursuivre notre revue en nous intéressant spécifiquement aux méthodes empiriques employées dans l'étude du phénomène des conceptions multiples. La diversité des approches est encore une fois à souligner.

Les modèles existants sur les conceptions multiples

Joan Solomon a proposé son modèle des domaines de connaissance (ordinaire versus symbolique) en s'inspirant de la phénoménologie de Schutz. Dans ses publications, Solomon a vérifié avec succès certaines prédictions tirées de son modèle au sujet des formes d'énergie (Solomon, 1983, 1984). Pour ce faire, il a recueilli des données auprès de six classes d'élèves de secondaire 4 suivant un cours de physique (nombre de participants non spécifié), par des enregistrements audio de discussions thématiques en classe, par des devoirs faits à la maison et par des questions posées à l'occasion d'un examen de fin d'année.

Larochelle et Désautels ont développé leur approche des jeux de la connaissance suite à une revue critique de la littérature sur les conceptions et le changement conceptuel, alimenté par plusieurs références épistémologiques (Larochelle & Désautels, 1992). Leur ouvrage inclut également une recherche empirique détaillée. Cette recherche ne visait toutefois pas le test du modèle lui-même, mais plutôt à déterminer la pertinence et la faisabilité d'une stratégie d'enseignement conçue pour provoquer ce que les auteurs nomment l'envol épistémologique (i.e., la prise de conscience de l'existence de jeux de la connaissance). La stratégie mise à l'épreuve a été un cours spécialement conçu, d'une durée de 12 semaines, donné à 35 participants de niveau collégial. Plusieurs outils ont été employés dans le cadre du cours : mémos de nature épistémologique, logiciel de simulation, cahier de laboratoire, rapport de recherche, colloques et journal personnel. Les auteurs ont

conclu que la stratégie proposée avait contribué au développement de la pensée épistémologique des étudiants, même si la majorité n'avait pu atteindre le niveau de l'envol épistémologique proprement dit.

La troisième modélisation importante du phénomène des conceptions multiples est celle de Mortimer (1995), qui a essentiellement repris et développé l'idée de profil proposée par Bachelard (1940/2002) en épistémologie. Mortimer n'a effectué aucune recherche empirique en lien avec son modèle.

Autres recherches sur les conceptions multiples

Outre ces modèles, quelques recherches ont étudié le phénomène des conceptions multiples en science, notamment en ce qui concerne les modèles de l'atome employés en chimie. Taber (2000) a constaté la pluralité de ces modèles à l'occasion d'une recherche empirique longitudinale, où 23 entrevues ont été effectuées avec un sujet de niveau collégial sur une période de deux années scolaires. Harrison et Treagust (2000) ont également employé une étude de cas longitudinale sur un sujet de fin de secondaire en chimie pour démontrer que celui-ci avait développé des multiples modèles pour comprendre l'atome. Dans une recherche subséquente, toujours sur l'utilisation des modèles atomiques, Coll et Treagust (2003) ont plutôt choisi d'interviewer 24 sujets de différents niveaux (secondaire, baccalauréat, maîtrise) en leur demandant de décrire ou d'expliquer différents cas relatifs aux liaisons interatomiques, ce qui leur a permis de montrer l'effet de la formation en chimie sur la multiplicité des modèles atomiques.

Finalement, deux recherches ont spécifiquement étudié de manière empirique la question du choix d'une conception parmi ses alternatives. D'abord, c'est dans le cadre d'une recherche empirique que Palmer (1999) a proposé l'emploi par les élèves d'une proposition « si ... alors ». Palmer a alors questionné 63 élèves de sixième année et 44 autres de secondaire 4 lors d'entrevues individuelles d'environ 15 minutes, où étaient posées des questions sur la notion de rôle en biologie. Ensuite, Pozo et ses collègues ont étudié les facteurs qui influençaient l'utilisation des conceptions microscopiques versus macroscopiques à l'aide de questions qualitatives en chimie (Pozo et al., 1999). Ils ont proposé à 120 participants, répartis sur quatre niveaux académiques différents, trois séries de questions à répondre de manière

écrite lors d'une séance d'environ 20 minutes. L'analyse quantitative des données a révélé que la formulation des questions de même que le niveau d'expertise des sujets avait une influence significative sur le choix du type de réponse employé.

Discussion

L'existence du phénomène des conceptions multiples est une conclusion qui ressort clairement des diverses recherches empiriques exploratoires auxquelles nous venons de faire référence. Mais les modèles les plus développés de ce phénomène proviennent plutôt de réflexions purement théoriques s'inspirant à la fois de la didactique et de l'épistémologie. Pour ces modèles, les études empiriques vérificatives n'ont pas été effectuées systématiquement. Comme dans le cas des recherches sur le changement conceptuel en général, ceci peut être en partie attribué à l'absence de conflits théoriques réellement vécus. Cette situation est somme toute normale étant donné la complexité du phénomène et le peu de ressources qui lui ont été accordées jusqu'à maintenant.

4.2.1.3 Conclusion

Cette revue nous a permis de mettre en évidence le fait qu'il est loin d'y avoir une méthode unique pour étudier le phénomène du changement conceptuel.

Tout d'abord, en contexte de découverte, la recherche empirique joue un rôle globalement minoritaire. La plupart des principaux modèles sont issus d'une réflexion théorique, où l'épistémologie constitue une ressource majeure. Ceci révèle que le changement conceptuel est un phénomène complexe qu'il est difficile d'apprécier sans lunette théorique nous permettant de voir l'un ou l'autre de ses aspects.

Ensuite, que ce soit en contexte de découverte ou de justification, les façons de conduire les recherches empiriques sont très variées. D'abord, les recherches empiriques peuvent porter sur l'aspect ontologique d'un modèle ou encore sur son aspect dynamique. Lorsqu'un modèle propose l'existence d'entités cognitives, il est alors possible de tenter de déterminer si les conceptions des sujets se conforment à ce modèle. La recherche peut alors se limiter à collecter les données à un moment, sans tenter d'obtenir de traces d'une évolution. Si la recherche porte sur la dynamique de

l'apprentissage, donc sur le *changement* conceptuel, il lui est au contraire nécessaire de prendre le pouls de la pensée des élèves à plusieurs moments. Ceci peut être effectué par des études longitudinales (où les sujets sont interviewés à des intervalles de quelques mois par exemple), ou en prenant des sujets situés à différents niveaux de formation, ou encore en démontrant l'effet positif d'un module de formation spécialement basé sur le modèle et en employant des pré-tests et post-tests (en comparant avec un groupe contrôle). Il est également possible que cette prise de pouls soit faite de manière intensive : les recherches microgénétiques s'efforcent de suivre systématiquement les apprentissages afin de pouvoir mieux identifier et comprendre les moments précis où les changements surviennent (Chinn, 2006).

Puis, le nombre de sujets employés dans les recherches empiriques est très variable. Plusieurs chercheurs ont recours à des études d'un seul cas, sélectionné parmi un faible nombre de participants. Cette approche part du postulat que tous les êtres humains possèdent une même nature en deçà des apparentes différences individuelles et culturelles, et que l'examen approfondi d'un cas est susceptible de fournir des informations précieuses sur l'apprentissage en général (van der Maren, 1996, p. 197). À l'inverse, d'autres chercheurs optent pour des analyses statistiques faites sur les réponses d'un nombre important de sujets, via l'utilisation de catégories généralement définies avant la collecte des données. Mais, entre ces extrêmes, on remarque l'existence de méthodes intermédiaires qui font intervenir plusieurs participants, non pas dans l'espoir d'atteindre une validité statistique, mais plutôt dans celui d'obtenir un ensemble de données recelant davantage de diversité que ne le ferait une seule étude de cas.

Finalement, mentionnons que l'entrevue clinique est une méthode largement répandue dans l'étude du changement conceptuel pour l'obtention du matériel empirique. Le type de tâche employée lors de l'entrevue est cependant variable (description ou explication d'un phénomène, résolution d'un problème) et propre à chaque matière. L'ampleur de ces tâches et le temps des entrevues sont évidemment dépendants du nombre de sujets participants.

4.2.2 La méthode utilisée

Les méthodes de recherche empirique sur le changement conceptuel sont grandement diversifiées. Aucune ne s'impose d'elle-même, chacune est développée en fonction de l'objectif poursuivi, des contraintes temporelles et matérielles, et évidemment de l'objet à l'étude. Dans cette section, nous décrivons et justifions nos choix méthodologiques.

4.2.2.1 Choix méthodologiques

À la section 3.2.5, nous avons proposé plusieurs façons de choisir entre des conceptions alternatives :

- la reconnaissance de signaux terminologiques ou sociologiques;
- l'utilisation d'un critère conceptuel;
- l'évaluation coûts-bénéfices (à l'aide d'un cahier des charges);
- la référence à un répertoire de situations déjà rencontrées.

Pour le reste de cette recherche, notre objectif sera de tenter d'étudier empiriquement ces stratégies de choix. Plus précisément, nous tenterons de mettre en évidence l'existence de certaines de ces stratégies et de générer des hypothèses à leur endroit en nous appuyant sur le matériel recueilli.

Puisque nous avons opté pour une étude exploratoire et descriptive des stratégies d'activation, la question de leur développement (leur apprentissage) ne sera pas abordée. Au niveau méthodologique, cela se traduit par une simplicité relative : il ne sera pas nécessaire de rencontrer nos sujets plus d'une fois. Par ce fait, l'étude empirique sera certainement d'une portée limitée, mais elle sera en contrepartie plus facile à mener.

Comme la plupart des études empiriques sur le changement conceptuel, nous effectuerons la collecte des données à l'aide d'entrevues cliniques. Van der Maren décrit ainsi cette technique.

« L'idée à la base de cette technique se résume à demander au sujet d'exprimer les perceptions qu'il a de son action ou de son état, de verbaliser son action pendant qu'il effectue une tâche particulière, et à observer les conduites du sujet confronté à des nécessités d'action. [...] Pour savoir comment l'enfant construit une notion ou résout un problème, on lui demande de réaliser une tâche, de résoudre un problème, et on 'discute intelligemment' avec lui pendant qu'il s'exécute. » (van der Maren, 1996, p. 317)

Ce méthodologue recommande que le chercheur induise sur place une hypothèse sur le processus activé et cherche immédiatement à vérifier cette hypothèse en soumettant au sujet une nouvelle tâche, susceptible de produire des indices pertinents en regard de l'hypothèse (p. 318). Nous n'inclurons cependant cette flexibilité que de manière limitée dans le processus d'entrevue : nous poserons des questions de relance non prévues dans le protocole, mais nous n'improviserons pas de nouvelles tâches au courant de l'entrevue. Les tâches que nous soumettrons aux sujets possèdent un certain degré de complexité et demandent d'être préparées à l'avance. De plus, une certaine uniformité dans le déroulement de l'entrevue permettra de mieux comparer les réponses des sujets.

Quant au nombre de sujets, celui-ci sera intermédiaire : nous n'effectuerons pas une étude de cas et ne viserons pas à émettre des hypothèses ayant une validité statistique. Nous cherchons avant tout à obtenir du matériel empirique varié de manière à stimuler la production de nouvelles hypothèses. De plus, puisque nous avons retenu l'hypothèse (déjà proposée dans la littérature) que le degré d'expertise influence la capacité à choisir entre deux conceptions alternatives, nous pensons qu'il est moins risqué de recourir à des participants appartenant à différents niveaux scolaires, soit les niveaux collégial et universitaire, ce qui est commun dans les recherches sur le changement conceptuel. Ces niveaux ont été choisis du fait de la probabilité d'y retrouver sans présélection des sujets maîtrisant suffisamment les contenus concernés par les tâches et moins susceptibles de vivre une surcharge cognitive occasionnée par la métacognition exigée par les tâches.

Ces choix méthodologiques vont certainement dans le sens d'une étude empirique de taille modeste. Mais puisque le volet empirique de notre recherche est secondaire relativement à celui théorique, il ne nous est pas possible de consacrer beaucoup de temps à la collecte des données ni à l'analyse d'un grand volume de données. Nous laisserons au lecteur le soin de juger si les analyses résultantes s'avèrent malgré tout intéressantes.

4.2.2.2 Présentation des sujets

Les sujets que nous avons retenus pour notre étude appartenaient à deux groupes. Le premier était formé d'étudiants de niveau collégial, complétant la deuxième et

dernière année du programme de sciences de la nature, qu'ils suivaient au Cégep de Sherbrooke. Malgré le fait que le projet de recherche ait été annoncé à de nombreux groupes et qu'une rémunération était offerte aux participants, seulement 9 volontaires se sont manifestés. Heureusement, ce nombre était suffisant et 5 d'entre eux ont été retenus. Tous ces participants suivaient le cours *Ondes, optique et physique moderne*, le troisième cours de physique du programme, et ce avec le même professeur. Les participants ont été choisis en fonction de leurs résultats scolaires, l'objectif étant de favoriser la diversité au sein de notre échantillon. Les entrevues avec ces participants ont eu lieu durant le mois de mai 2007, dans un local de laboratoire rendu disponible par les professeurs du département de physique.

Le second groupe était constitué d'étudiants universitaires, inscrits en quatrième session (deuxième année) du programme de baccalauréat en physique à l'Université de Sherbrooke. Ces étudiants complétaient au moment de l'entrevue leur second cours de mécanique quantique. Nous avons effectué l'annonce du projet en personne à la fin d'une classe de mécanique quantique. Une demi-douzaine d'étudiants s'est rapidement montrée intéressée, et de ce nombre 3 ont été retenus, davantage sur la base de leur intérêt apparent que de leurs résultats académiques. Les entrevues avec ces participants ont été réalisées au début du mois d'août 2007, dans un local réservé à la bibliothèque de la faculté des sciences.

Tous les participants étaient d'âge majeur au moment des entrevues, et aucun consentement supplémentaire n'était requis de la part des professeurs ou de l'administration des établissements mentionnés puisque la tenue des entrevues était indépendante des cours suivis par les participants. Tous avaient la possibilité d'interrompre l'entrevue ou d'exiger que celle-ci ne soit utilisée pour cette recherche, mais aucune intention n'a été manifestée en ce sens.⁹⁷

4.2.2.3 Les tâches de vulgarisation

Dans ce qui suit, nous présenterons les deux types de tâches que nous avons élaborées, soit les tâches de vulgarisation et les tâches à propos de l'expérience des

⁹⁷ Le certificat d'éthique obtenu pour effectuer les entrevues de même que les formulaires de consentement signés par les participants sont présentés en annexe.

doubles fentes en physique. Par ces tâches, nous pensions pouvoir recueillir des traces relatives à des stratégies de choix d'une conception parmi plusieurs possibles.

Nature des tâches de vulgarisation

Nous avons appelé le premier type de tâche les « tâches de vulgarisation ». Une telle tâche consiste à mettre le sujet dans un contexte où il doit tenter d'expliquer un phénomène complexe à un jeune public d'une manière qu'il juge appropriée.

Nous recourons à ce type de tâche car nous trouvons plausible l'hypothèse que sa réalisation fasse intervenir un choix basé sur une évaluation coûts-bénéfices. En effet, nous pensons que la production d'une explication vulgarisée passe par l'élaboration d'un modèle explicatif (parmi d'autres possibles) adapté aux contraintes que sont les caractéristiques du public, le temps et les ressources permises par la situation, et que cette tâche est suffisamment inhabituelle et subjective pour que le choix ne se fasse pas sur la base d'un signal terminologique ou conceptuel, ou encore par le rappel d'une solution déjà connue par expérience.

Mais pour faciliter le recours à cette stratégie, nous pensons que certaines conditions doivent être respectées. D'abord, il est évident que le sujet doit maîtriser un bassin de ressources conceptuelles pertinentes dans lequel il peut puiser; autrement il ne s'agirait pas d'une tâche de vulgarisation mais d'improvisation. Aussi, cette maîtrise doit être suffisante afin de permettre une activité métacognitive : d'une part, les ressources doivent être minimalement consolidées pour pouvoir faire l'objet d'une métacognition; d'autre part, celle-ci doit se faire avec suffisamment d'aisance pour éviter une surcharge cognitive. Ensuite, la tâche doit constituer un problème ouvert, puisqu'un problème trop bien défini orienterait rapidement le sujet vers une approche conceptuelle particulière, coupant court à tout processus d'évaluation coûts-bénéfices. Finalement, la tâche de vulgarisation doit être plutôt simple et limitée afin qu'elle puisse être complétée dans le cadre d'une entrevue d'environ une heure (contrainte qui exclut d'emblée, malheureusement, le recours à des problèmes plus complexes).

Présentation des tâches

Les tâches de vulgarisation porteront sur des thèmes relativement communs dans la formation scientifique offerte aux niveaux secondaire et collégial, soit les adaptations biologiques, la chaleur et la matière. Nous préférons soumettre les sujets à trois tâches de vulgarisation plutôt qu'une seule afin d'être en possession d'un plus grand corpus de données pour l'analyse, mais aussi dans le but de permettre aux sujets de s'acclimater au processus d'entrevue et à ce type de tâches. Le tableau 3 présente les énoncés des tâches de vulgarisation qui seront soumis par écrit aux participants.

Thèmes	Contexte soumis par écrit
1 – Les adaptations	Comme travail d'été, vous êtes animateur (animatrice) dans un camp d'été pour jeunes âgés de 10 à 12 ans. Une sortie de groupe est organisée au zoo de Granby. Lors de la visite, vous et votre groupe passez près de l'enclos des girafes. Quelques-uns de vos jeunes se demandent pourquoi les girafes ont un cou et des pattes aussi longues. Vous prenez quelques minutes pour leur fournir une explication. Mais pas plus, car leur attention se perd rapidement et il faut passer à l'activité suivante !
2 – La chaleur	Vous êtes dans une cuisine avec votre jeune cousin (10-12 ans, fin primaire). Une soupe est sur le feu, une louche en métal dans le chaudron. Votre cousin veut s'en servir un bol. Vous l'arrêtez en lui disant qu'il risque de se brûler en utilisant cette louche, et qu'il est préférable qu'il en prenne plutôt une en plastique. Quelle explication lui fournissez-vous pour lui faire comprendre le phénomène et le rendre plus prudent à l'avenir ?
3 – La matière	Par une journée ensoleillée, vous êtes à la maison de votre jeune cousine (toujours de 10-12 ans) en train de mettre des vêtements à sécher sur la corde à linge. Votre cousine dit que c'est important de suspendre le linge sur la corde à linge car cela lui permettra de s'égoutter et ainsi de sécher. Quelle explication lui fournissez-vous pour lui faire comprendre le processus d'évaporation et les facteurs qui l'influencent ?

Tableau 4. Textes soumis lors des tâches de vulgarisation.

Rappelons que Wisner et Amin (2001) ont étudié l'intégration des conceptions alternatives relatives au concept de chaleur, que Pozo et ses collègues (Pozo et al., 1999) ont fait de même avec le thème de la nature de la matière et de la chaleur, et que Palmer (1999) a conclu à l'existence d'une proposition « si ... alors » suite à l'étude des conceptions sur le rôle biologique de certains organismes. Le choix des

thèmes n'est donc pas vraiment original, mais nous rassure quant à la probabilité d'y retrouver un phénomène de complexification conceptuelle.

Si originalité il y a dans notre méthodologie, elle se retrouve non pas dans les thèmes employés, mais plutôt dans la nature de la tâche demandée et dans notre façon de recueillir des données.

Processus d'entrevue

Comme le suggère Mortimer, une tâche explicative unique n'est pas suffisante pour mettre en valeur la maîtrise d'une pluralité d'alternatives conceptuelles :

« It is possible to determine if a student has acquired a new zone in his/her conceptual profile by looking for the use of the categories that characterize this zone in the explanation of some phenomena. [...] To verify if students use different stable elements of a conceptual profile in different occasions would require the use of a variety of problems according to each context identified in the theoretical analysis of the profile. The capacity to identify the context and to answer using the appropriate area of the profile could be an indication not only that a student has a profile but also that he or she is conscious of it. » (Mortimer, 1995, p. 283)

Ainsi, c'est à travers le recours à une variété de tâches que nous aurons plus de chance non seulement d'identifier l'existence d'une pluralité de conceptions, mais aussi d'observer la capacité des sujets à effectuer un choix au niveau de la conception à employer.

Dans le contexte d'une tâche de vulgarisation, une façon plausible d'obtenir cette variété est de modifier légèrement le contexte de la tâche après que celle-ci ait été complétée une première fois. Par exemple, après avoir produit une vulgarisation pour un public de 10-12 ans, nous pouvons demander au sujet s'il aurait opté pour l'explication qu'il a proposée s'il avait plutôt fait face à un public de 15-16 ans (secondaire 4). Une telle variation pourrait montrer que certains éléments du contexte viennent influencer le choix de l'explication proposée.

Cependant, une méthode qui se limiterait à varier le contexte de la tâche de vulgarisation puis à observer l'explication produite ne maximiserait pas à notre avis nos chances d'être en possession d'un matériel intéressant à analyser du point de vue de notre modèle. En effet, un des intérêts à opter pour des sujets de niveau postsecondaire est leur plus grande aisance à effectuer une activité métacognitive. Nous pourrions donc profiter de l'occasion pour demander au sujet de justifier

directement sa vulgarisation. Ceci peut s'avérer nécessaire puisque, comme le soulignent Hewson et Thorley (1989), le contenu des conceptions recueillies auprès des sujets ne révèle bien souvent que peu de choses sur le statut qu'ils donnent à ces conceptions, mais l'utilisation de questions spécifiques s'avère cependant efficace à ce niveau. Puisqu'une évaluation coûts-bénéfices requerrait des jugements sur les conceptions, nous pensons que de telles questions explicites sont susceptibles de constituer une source d'information importante.

Pour chacune des tâches de vulgarisation, nous soumettrons dans un premier temps l'énoncé de la tâche au sujet. Ensuite, celui-ci sera invité à écrire sur une feuille mise à sa disposition les principaux éléments de son explication vulgarisée, à un niveau de détail qu'il jugera approprié. Cela aura comme fonction non pas d'obtenir l'énoncé de l'explication du sujet, mais plutôt celle de lui faire prendre le temps de bien réfléchir à la tâche et de maîtriser sa propre production. Une fois cette rédaction complétée, nous débiterons l'entrevue semi-dirigée, qui aura comme points de repère les questions du protocole suivant (valide pour tous les thèmes).

- | |
|--|
| <p>1 – « Pourrais-tu me présenter l'explication que tu proposerais ? »</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Pourquoi dis-tu cela ? » <p>2 – « Ton explication aurait-elle été différente si ... »</p> <ul style="list-style-type: none"> • « ... l'âge des jeunes avait été plus bas, par exemple 6-7 ans ? » • « ... l'âge des jeunes avait été plus élevé, par exemple 14-15 ans ? » • « Pourquoi ? » <p>3 – « Pourquoi ne pas toujours employer l'explication que tu donnes aux jeunes de 14-15 ans ? »</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Quelles sont ses forces et ses faiblesses ? » • « Cette explication est-elle plus vraie que les autres ? » • « L'explication donnée aux jeunes de 6-7 ans est-elle fausse ? » |
|--|

Figure 14. Protocole d'entrevue commun à toutes les tâches de vulgarisation.

La première étape de l'entrevue consiste à demander au sujet de formuler verbalement l'explication vulgarisée qu'il propose d'offrir (à un public de 10-11 ans). Si cela s'intègre bien au processus, il sera possible de lui demander dès lors de justifier certaines de ses affirmations.

Une fois cette première partie terminée, nous proposerons au sujet des contextes légèrement modifiés et lui demanderons si cette modification affecte l'explication

qu'il fournirait, et si oui, en quel sens. Cette fois-ci, nous demanderons systématiquement à l'étudiant de justifier ses modifications (ou l'absence de modification).

Finalement, nous emploierons une troisième ligne de questions, plus directe cette fois. Il s'agit de faire reconnaître au sujet qu'il existe des explications différentes (plus complexes, ou moins complexes selon le cas) parmi celles qu'il a employé ou encore qu'il connaît, et nous lui demanderons si ces explications auraient pu être pertinentes selon lui. Nous enchaînerons par des questions qui réfèrent explicitement aux « forces et faiblesses » des alternatives ainsi identifiées. Nous terminerons par une question sur la vérité des explications possibles, pour donner une occasion supplémentaire mais différente de s'exprimer sur les forces et les faiblesses de ses explications.

Limites du protocole

Nous pouvons identifier au moins deux limites méthodologiques relatives au recours à la justification par les sujets de leurs explications vulgarisées.

Premièrement, pour être valide, toute trace verbale doit provenir de la mémoire de travail du sujet, ce qui implique que les verbalisations concomitantes sont préférables aux verbalisations rétrospectives et que les informations sont moins accessibles au sujet lors des activités cognitives automatiques que lors de celles intentionnelles (Caverni, 1988, p. 268). Notre protocole respecte ces deux conditions. D'une part, les demandes de justification suivent de très près la formulation des explications vulgarisées par le sujet et peuvent même être concomitantes (le sujet aura la possibilité de revenir sur son explication lorsqu'il fournira ses justifications). D'autre part, nous pouvons présumer que cette tâche de vulgarisation n'est pas courante et n'est donc pas automatisée.

Mais même si elle est valide, la verbalisation des raisons sous-jacentes à la vulgarisation peut ne pas être représentative du réel processus cognitif ayant eu lieu lors de l'élaboration de la vulgarisation originale (où la justification est rétrospective), mais seulement représentative des modifications ultérieures dans l'entrevue (où les justifications peuvent être concomitantes). En effet, une verbalisation concomitante des raisons rend une activité de résolution de problème plus délibérée, ce qui résulte souvent en une amélioration de la performance (Dominowski, 1998), de sorte qu'il

ne faut pas présumer qu'une vulgarisation faite avec la contrainte d'avoir à être justifiée est la même que celle faite sans cette contrainte. Mais mentionnons qu'une vulgarisation produite plus délibérément peut tout de même être très éclairante sur la pensée des sujets.

Deuxièmement, nous devons reconnaître qu'une question comme « Quelles sont les forces et les faiblesses de ces deux explications ? » comporte un certain biais méthodologique relativement à notre approche. En effet, cette question pourrait amener le sujet à penser sa vulgarisation en termes de coûts-bénéfices, auquel cas il serait circulaire de conclure que le sujet a employé un raisonnement coûts-bénéfices plutôt que d'avoir choisi cette explication par un autre processus (activation par signal terminologique, conceptuel, etc.). À ceci, nous répondons que cette question ne constituera qu'une des occasions pour le sujet de justifier sa vulgarisation et qu'elle sera placée à la fin du protocole : le sujet aura donc d'autres occasions de se justifier autrement qu'en termes coûts-bénéfices. Nous incluons cette question afin de nous assurer que le sujet ait l'opportunité explicite de spécifier les avantages et les inconvénients des alternatives conceptuelles qu'il a à sa disposition.

Finalement, gardons en perspective le fait que la verbalisation des justifications de la part des sujets ne constitue qu'une des deux sources de données pouvant être analysées, l'autre étant les vulgarisations elles-mêmes et les modifications qui leur sont apportées. Ces deux sources devraient fournir ensemble d'intéressantes informations sur le processus de résolution des tâches de vulgarisation.

4.2.2.4 Les tâches des doubles fentes

Nous nous proposons d'employer un deuxième type de tâche en vue d'explorer un thème qui nous a servi à l'élaboration de notre problématique, soit l'apprentissage de la mécanique quantique. Comme nous le mentionnions à la section 1.2, la discrimination entre la physique classique et la physique quantique a été reconnue comme constituant une difficulté majeure d'apprentissage. Notre objectif n'est pas ici de tenter de décrire les conceptions quantiques des étudiants et d'y pointer les compréhensions partielles ou de retrouver la logique de leurs erreurs, la revue de la littérature que nous avons effectuée nous renseigne déjà à ce sujet. Nous visons plutôt à étudier précisément la procédure de choix que les étudiants viennent à employer

pour aiguillonner leur pensée soit vers la physique classique, soit vers la physique quantique.

Contrairement aux tâches de vulgarisation, où nous n'avons pas de raison particulière de croire que nous retrouverons des différences majeures entre les sujets collégiaux et universitaires, nous pensons que les tâches en physiques quantiques devraient être résolues avec plus d'aisance par les étudiants universitaires en physique. En effet, lors de leur cours d'*Ondes, optique et physique moderne*, les étudiants collégiaux ne consacrent que quelques heures à la physique quantique, généralement à la fin de la session, alors que les étudiants universitaires interviewés achèvent leur deuxième cours consacré à cette théorie.

Nature de la tâche

La tâche sera centrée sur un phénomène bien « classique » en mécanique quantique, soit l'expérience des doubles fentes dans le cas des électrons. En 1801, Thomas Young fait la première expérience de ce type avec de la lumière, dévoilant ainsi clairement sa nature ondulatoire. Comme mentionné à la section 3.2.3.3, une expérience semblable a été effectuée avec des électrons et des résultats similaires ont été produits, exposant de manière frappante la nature ondulatoire des électrons. En interrogeant les sujets sur ce phénomène, nous espérons déterminer de quelles façons ils parviennent à gérer la frontière entre les mondes classique et quantique.

Pour les tâches de vulgarisation, il est raisonnable de penser qu'une évaluation coûts-bénéfices sera employée du fait que le problème est posé de manière ouverte. Pour les tâches des doubles fentes quantiques, nous savons que le choix de recourir à l'explication quantique plutôt que classique devrait reposer sur un critère conceptuel simple, $a \leq \lambda$, mais nous pensons a priori que dans les faits les étudiants collégiaux auront tendance à employer des signaux terminologiques ou un critère conceptuel simple étant donnée la précarité de leur compréhension de la physique quantique.

Première partie de la tâche et protocole d'entrevue

La tâche soumise aux sujets consistera à expliquer ce qui se passe lors d'une expérience avec doubles fentes. La tâche comprendra deux parties.

La première portera sur la version classique de l'expérience de Young réalisée avec de la lumière, puisqu'il nous apparaît important d'apprécier la compréhension qu'en ont les sujets. Le phénomène d'interférence de la lumière fait partie de l'optique ondulatoire, qui est abordée dans le cours de physique collégiale qui introduit également à la physique moderne. Il est évident que la compréhension de la version originale de l'expérience des doubles fentes affecte celle de sa version quantique.

Nous demanderons d'abord aux sujets de décrire, lors d'une entrevue semi-dirigée, le phénomène optique qui se produit lors de l'expérience des fentes de Young, en leur présentant le schéma du montage suivant.

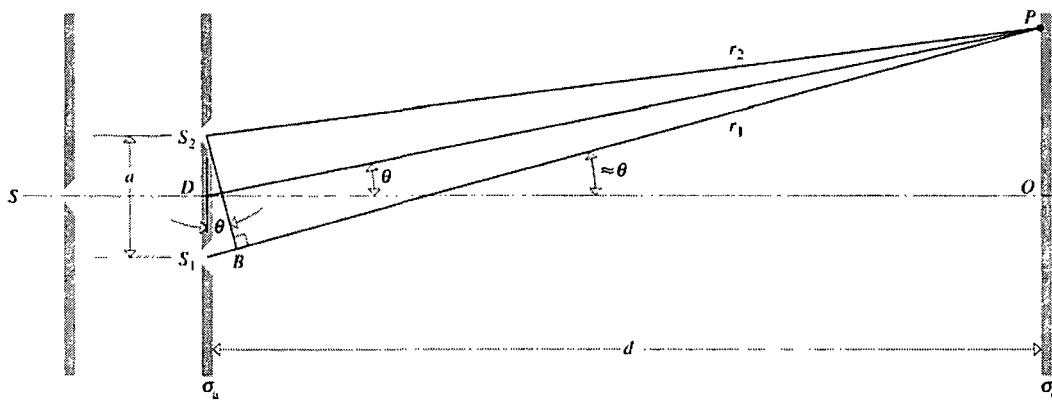


Figure 15. Schéma du montage de l'expérience des fentes de Young avec de la lumière.
S est la source de lumière, a la largeur entre les deux fentes.

Pour ce faire, nous nous référerons au protocole d'entrevue de la figure 16. La première partie du protocole sert à amener le sujet à parler librement de l'expérience. La deuxième vise plutôt à mettre à l'épreuve sa compréhension de la relation entre l'optique géométrique et l'optique ondulatoire quant à leur domaine de validité respectif. En effet, il s'agit là d'une première situation de complexification conceptuelle à l'intérieur même de la physique classique, même si ce n'est pas celle que nous tenterons d'étudier.

- 1 – Description du phénomène :
- « Qu'est-ce qui se produit lors de cette expérience ? »
 - « Qu'est-ce que cette expérience révèle ? »
- 2 – Concernant les conditions d'existence de ce phénomène :
- « Dans quelles conditions ce phénomène ondulatoire se produit-il ? »
 - « Comment peut-on faire disparaître le patron d'interférence ? »
 - « Les phénomènes ondulatoires seront-ils toujours présents ? »

Figure 16. Protocole d'entrevue de la tâche sur l'expérience des fentes de Young en optique.

Deuxième partie de la tâche et protocole d'entrevue

Dans un deuxième temps, nous aborderons la version quantique de l'expérience, c'est-à-dire celle faite avec des électrons (ou autres particules). Le schéma du montage expérimental étant le même, nous présenterons au sujet ce qui diffère de l'expérience des fentes de Young, soit la distance entre les fentes, la vitesse des particules et la plaque réceptrice qui montre bien à la fois les impacts individuels des électrons (donc leur aspect particulaire) et le patron d'interférence formé progressivement (donc leur aspect ondulatoire).

Expérience des doubles fentes avec électrons

- Le montage est schématiquement le même que pour les fentes de Young, avec des proportions différentes et une source d'électron (ponctuelle) plutôt que de lumière.
- Masse d'un électron : $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg
- Vitesse des électrons : 6000 km/s (soit environ 100 eV)
- Distance entre les fentes : $\sim 1 \cdot 10^{-10}$ m

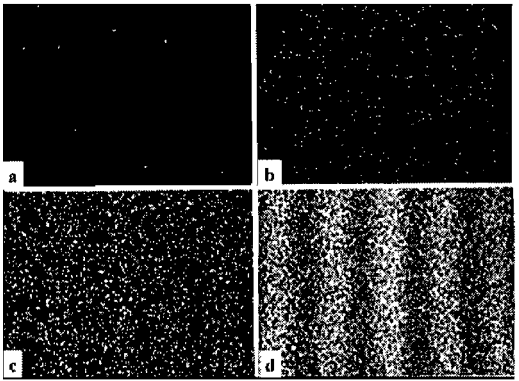


Figure 17. Présentation de l'expérience des doubles fentes avec des électrons.

Lors de l'entrevue semi-dirigé, nous demanderons tout d'abord aux sujets de décrire l'expérience quantique des doubles fentes dans leurs propres mots afin d'apprécier leur compréhension du phénomène. Ensuite, nous tenterons de déterminer de quelle façon les sujets conçoivent la frontière entre la mécanique quantique et la mécanique classique dans une telle expérience. Nous donnerons l'occasion aux sujets de formuler eux-mêmes leur critère de démarcation, puis enchaînerons en leur demandant ce qui se produirait si, au lieu des électrons, étaient

employés des objets progressivement plus massifs (au comportement typiquement classique). Comme dans le cas des tâches de vulgarisation, la stratégie ici employée est celle de modifier légèrement le contexte afin de tenter de déterminer à quoi est sensible le choix opéré par les sujets.

- | |
|---|
| <p>1 – Description du processus :</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Qu'est-ce qui se produit ? » • « Qu'est-ce que cette expérience révèle ? » <p>2 – Concernant les conditions d'existence de ce phénomène :</p> <ul style="list-style-type: none"> • « À quelle(s) condition(s) le phénomène ondulatoire disparaît-il ? » • « Qu'arrive-t-il si on emploie des protons ou des neutrons comme projectile ? » • « Des atomes, des molécules ? » • « Une poussière ou un grain de sable ? » • « Une balle de baseball ? » • « Ces objets possèdent-ils eux aussi une dualité onde-corpuscule ? » • « Pourquoi ne pas employer toujours la conception ondulatoire/quantique ? » |
|---|

Figure 18. Protocole d'entrevue de la tâche sur la version quantique de l'expérience des doubles fentes.

Limites du protocole

Encore une fois, il est impératif d'avoir conscience des faiblesses de notre méthode empirique. Notre processus d'entrevue est conçu afin de révéler spécifiquement la maîtrise du critère conceptuel qui devrait être employé pour opter en faveur d'une des deux mécaniques. Nous sommes cependant moins optimiste quant à l'efficacité de ce protocole pour étudier l'utilisation des signaux terminologiques ou sociologiques, pourtant susceptibles d'être employés par les sujets. En effet, il nous apparaît probable que les sujets auront une tendance naturelle et inconsciente à vouloir dissimuler toute stratégie d'activation basée sur de tels signaux, puisqu'ils savent probablement qu'il s'agit là d'heuristiques qui devraient idéalement être remplacées par des stratégies épistémiquement justifiées. La formulation de critères conceptuels évasifs ou improvisés pourra trahir cette tentative de dissimulation, mais ne nous permettra pas par contre l'étude directe et positive des signaux terminologiques et sociologiques. Pour ce faire, une méthodologie spécifique devrait être élaborée. Nous nous restreindrons cependant à la méthode que nous venons de proposer pour plusieurs raisons : cette méthode semble pertinente nous permettre d'étudier le choix par critère conceptuel; nous poursuivons par cette recherche

empirique un objectif exploratoire; et le processus d'entrevue (incluant les tâches de vulgarisation) possède déjà une durée d'environ une heure (limite que nous ne désirons pas dépasser).

4.3 RÉSULTATS ET ANALYSE

Dans cette section, nous présenterons une partie du matériel recueilli et procéderons à son analyse, ce que nous effectuerons en trois temps. Les deux premières sous-sections seront consacrées aux structures décisionnelles employées lors de la réalisation des tâches. Notre objectif est d'abord de présenter les résultats de l'expérimentation, puis de procéder à leur analyse. Les tâches de vulgarisation et celle des doubles fentes étant de natures différentes (par hypothèse), elles seront traitées séparément. Dans la troisième sous-section, nous présenterons des hypothèses provenant de l'analyse des données qui ne portent pas sur les structures décisionnelles. Le volet empirique de notre recherche ayant une fonction exploratoire, il n'est pas surprenant que notre expérimentation ait produit du matériel soulevant des pistes de recherche inattendues.

4.3.1 La structure décisionnelle dans les tâches de vulgarisation

Les tâches de vulgarisation ont été conçues de manière à constituer un problème ouvert pouvant être résolu à l'intérieur d'une courte période de temps par des sujets sans véritable expertise. Nous avons proposé l'hypothèse que la structure décisionnelle sollicitée par un tel problème consisterait en une évaluation coûts-bénéfices, où les caractéristiques des ressources conceptuelles seraient comparées aux contraintes de la situation (formant ce que nous avons proposé d'appeler le cahier des charges cognitives). L'objectif du recours à ces tâches était d'abord d'essayer de déterminer si une telle structure décisionnelle était effectivement employée, puis d'émettre des hypothèses supplémentaires à l'endroit de cette structure.

Bien que nous ayons soumis aux sujets trois tâches de vulgarisation, il sera suffisant d'en analyser le contenu de deux : la tâche de vulgarisation sur les adaptations biologiques et celle sur la conduction thermique. La troisième tâche, portant sur le processus d'évaporation, comporte plusieurs aspects similaires à celle sur la chaleur et il nous apparaît par conséquent peu intéressant de la traiter spécifiquement. Aussi, bien que tous les sujets aient accompli toutes les tâches de vulgarisation qui leur ont été soumises, nous limiterons notre présentation des résultats à seulement deux sujets pour chaque tâche, ce qui à notre avis s'avère suffisant pour alimenter nos analyses.

Ce choix est cohérent avec la visée exploratoire de notre recherche, qui vise à générer des pistes de compréhension sans toutefois prétendre à une validité statistique.

Chaque analyse de vulgarisation comprendra trois éléments. Le premier est la présentation de la vulgarisation proposée par le sujet pour le public référence, celui formé d'enfants de 10-11 ans. Le second est la présentation et l'analyse des vulgarisations proposées pour les publics alternatifs, soit celui des enfants de 6-7 ans et celui des adolescents de 14-15 ans. Pour finir, nous incluons les commentaires justificatifs proposés par les sujets à propos de leurs vulgarisations.

Avant de procéder à l'analyse, mentionnons que les tâches de vulgarisation se sont très bien déroulées. Nous pensions que le recours à trois tâches plutôt qu'une risquerait de blaser les sujets, mais cette crainte s'est avérée injustifiée : l'intérêt semble avoir été soutenu et certains sujets ont même exprimé ouvertement leur plaisir à effectuer ces vulgarisations. De plus, nous avons initialement craint que les sujets entrevoient la question de recherche derrière les tâches de vulgarisation, mais encore une fois cette possibilité ne s'est pas concrétisée : bien que les sujets aient probablement été surpris de se voir soumettre des tâches en apparence élémentaires et qu'ils aient dû se questionner sur l'objectif réel derrière nos questions, aucun n'a semblé « décrocher » du contexte; autrement dit, leurs réponses ont en tout temps fait référence à la tâche de vulgarisation, comme si celle-ci constituait en soi l'objet à l'étude. Un tel décrochage, s'il avait eu lieu, aurait introduit des biais qu'il aurait alors été difficile de compenser lors de l'analyse.

4.3.1.1 Tâche sur les adaptations biologiques

Dans cette tâche, nous avons demandé aux sujets de fournir une explication à des jeunes sur l'origine (le pourquoi) du long cou ou des longues pattes des girafes. Pour l'analyse, nous avons retenu les vulgarisations effectuées par les sujets U1 et C4.⁹⁸

⁹⁸ Nous ferons référence aux sujets en employant un code simple : une lettre faisant référence au niveau du sujet (C pour collégial et U pour universitaire) et un chiffre correspondant à l'ordre dans lequel nous avons effectué l'entrevue avec le sujet (1 à 5 pour les sujets collégiaux, 1 à 3 pour les sujets universitaires).

Le sujet U1

Au cours de l'entretien semi-dirigé, ce sujet nous a mentionné qu'il avait été animateur dans des camps de vacances durant trois étés (dont la clientèle est justement constituée de jeunes du niveau fin primaire) en plus d'avoir déjà été animateur scientifique dans un observatoire astronomique. Ceci semble expliquer l'assurance manifeste qui a accompagné ses réponses lors de chacune des tâches de vulgarisation. Comparativement aux autres sujets, nous pouvons dire que U1 possède en quelque sorte un début d'expertise en matière de vulgarisation.

Ce sujet a eu recours à plusieurs reprises à une simulation mentale de la version réelle de la tâche sous forme de protodialogues pour présenter sa vulgarisation. Pour en faciliter la lecture, ses réponses seront souvent séparées en répliques. Voici comment il s'y serait pris pour expliquer la longueur du cou des girafes à des jeunes de 10-11 ans :⁹⁹

- U1 En premier lieu, ce que je vais faire, c'est d'arrêter les jeunes et leur retourner la question :
- Qu'est-ce que les girafes mangent selon vous ?
 - Et puis là ils vont tous lever leur main : Moi je pense qu'ils mangent des [?]. Non moi, je pense que ce sont des feuilles !
 - Alors là je vais dire : C'est les feuilles ! Puis je vais dire : Les feuilles, c'est où dans les arbres ?
 - Donc [ils répondent] : Ah, c'est haut dans les arbres.
- U1 Ok, finalement, ce qu'il faut faire, c'est établir un principe de correspondance, associer à quelque chose dans leur vie à eux. Je leur donnerais un exemple dans leur vie où il faut qu'ils essaient de s'étirer le bras pour manger quelque chose.
- Je leur dirais : Ah, vous n'êtes pas capables. Bien la girafe, elle, au fur et à mesure des générations, au début début, il y a des millions d'années, la girafe avait un petit cou. Au fil des générations, les girafes qui avaient des plus grands cous étaient plus fortes que les girafes avec des petits cous, parce qu'elles étaient capables de manger plus de feuilles. Ce sont les girafes avec des grands cous qui ont survécu. Alors le cou des girafes a augmenté au cours des années.
 - [Réponse :] Ahhhh....

Cette explication fournie par U1 fait clairement intervenir la notion d'évolution des espèces, et possède de plus une touche darwinienne, puisqu'elle fait référence à la survie des girafes au grand cou. Évidemment, plusieurs aspects de la conception moderne de l'évolution des espèces ne sont pas inclus, comme la reproduction, la

⁹⁹ L'entrevue intégrale avec le sujet U1 est incluse en annexe à titre d'exemple.

nécessité et la source des mutations, la différence entre phénotype et génotype, etc. Nous n'avons pas tenté de déterminer si ces aspects avaient été écartés par choix ou parce que U1 possédait des connaissances limitées en la matière. L'important était de déterminer l'explication qui constituerait le point de référence de cette tâche.

Dans un deuxième temps, nous avons demandé à U1 s'il modifierait cette explication s'il avait plutôt affaire avec un public plus jeune (10-11 ans), puis avec un public plus vieux (14-15 ans). Pour le public de 14-15 ans, U1 affirme que son explication serait plus complexe, mais sa réponse est plutôt vague quant à la nature de cette complexité supplémentaire, signe possible qu'il ne possède pas les connaissances pour la spécifier.

U1 Au lieu de lui expliquer finalement que les girafes ayant un plus long cou gagnent, j'aurais apporté un élément plus complexe, un petit peu la théorie de l'évolution de Darwin, que les adolescents ont commencé à voir un peu. J'aurais dit, les girafes avec des plus grands cous avaient un avantage génétique sur les girafes avec des plus petits cous, et ça a monté comme ça.

I Mais avec les plus jeunes, tu ne l'as pas fait un peu ça ?

U1 Je l'ai fait un peu, mais je n'ai pas dit Darwin, et je n'ai pas dit la théorie de l'évolution.

Le contraste avec la référence est beaucoup plus net dans le cas de l'explication destinée au public de 6-7 ans :

I Si disons au lieu d'avoir 10-11 ans, les jeunes avaient été au début du primaire, 6-7 ans, est-ce que tu aurais changé quelque chose ?

U1 Je n'aurais pas parlé que les girafes avaient un petit cou avant.

I Qu'est-ce que tu aurais dit ?

U1 J'aurais juste dit que les girafes ont un grand cou pour manger les feuilles qui sont très très hautes. J'aurais, comment dire ... coupé l'évolution, ça aurait été un petit peu plus complexe pour eux.

Nous pourrions être tenté d'interpréter cette explication comme étant téléologique (lamarckienne) : les girafes auraient développé un long cou afin de manger les feuilles situées à une grande hauteur. Mais U1 exprime clairement que c'est toute la notion d'évolution qu'il élague de son explication, et que ce qui reste demeure vrai :

U1 La girafe elle a un grand cou pour manger les feuilles ... je veux dire, la girafe a un grand cou, car ça lui permet de bien manger les feuilles. C'est une vérité, j'ai juste omis de dire comment elle a acquis son grand cou.

Donc, si cette explication diffère de celle de référence, ce n'est pas parce qu'elle cesse d'être darwinienne, mais plutôt dû au fait qu'elle cesse carrément d'être génétique pour se limiter à être une réponse fonctionnaliste, puisque U1 se contente de préciser la fonction physiologique qu'accomplit le long cou des girafes.¹⁰⁰

U1 a justifié explicitement cette modification radicale en affirmant que la notion d'évolution n'était pas accessible aux jeunes enfants, du fait de leurs difficultés à comprendre la notion de temps, au niveau ontogénétique et a fortiori au niveau phylogénétique.

I Pour quelle raison penses-tu que ça aurait été plus complexe pour les plus jeunes ?

U1 En fait, ça dépend quel âge, mais il y a un stade dans la jeunesse, où les jeunes ont plus de misère à s'imaginer l'avant et l'après. Leur grand-père a toujours été vieux et sera toujours vieux. Ça c'est avant 7 ans mettons. Donc avant 7 ans, ça ne se peut pas, dans leur tête, que la girafe qu'ils voient là était un bébé avant.

I [...]Pour le développement de l'espèce, c'est encore plus complexe que pour le développement de l'individu ?

U1 Ouais, c'est ça. Ça aurait été quelque chose de peut-être un peu trop loin. Il aurait fallu leur expliquer, finalement, que les vaches ont toujours vécu, mais qu'elles n'auraient pas été toujours de la même façon, ce qui aurait été un peu plus ardu. C'est pour ça que je pense que l'évolution, pour les 7 ans ou moins ... [c'est trop complexe].

Le sujet C4

Le deuxième sujet dont nous analyserons les réponses est de niveau collégial et ne possède pas à notre connaissance d'expérience particulière en matière de vulgarisation. Comparativement aux autres sujets de ce niveau, C4 est davantage volubile et à l'aise avec la tâche, malgré les nombreuses réserves qu'il inclut dans ses réponses.

Lorsque questionné sur la vulgarisation qu'il offrirait à des enfants de 10-11 ans, C4 propose une explication qui inclut certains rudiments de la théorie darwinienne : les caractéristiques des girafes résultent d'un processus évolutif, où l'adaptation au milieu est nécessaire à la survie.

¹⁰⁰ Ernst Mayr (1982, pp. 67-68) distingue par exemple deux types d'études en biologie : l'étude des causes proximales (à propos des fonctions d'un organisme et de ses parties, de même que de son développement) et celle des causes ultimes (concernant les raisons pour lesquelles un organisme est ce qu'il est).

C4 Bien j'expliquerais au petit bonhomme ou à la petite fille que différentes espèces existent dans le monde et que dépendamment du milieu ou de l'habitat où elle est s'est développée ou il est né, la manière dont vit cette espèce-là, bien il y a un développement soit physique, et mental je suis peut-être pas prêt à dire ça, mais il y a un développement qui se fait pour que l'animal puisse survivre dans le milieu où il habite. Donc la girafe dans le milieu où elle a sûrement évolué, bien elle a dû avoir un long cou et des longues pattes pour pouvoir manger puis survivre par rapport à ce qu'elle vivait, au milieu qu'elle a à faire face.

Comme pour U1, cette explication ne fait pas référence à la source du développement de l'espèce (les mutations génétiques) ni à l'étape sélective de la reproduction.

Nous avons ensuite demandé à C4 s'il modifierait quelque chose à cette explication de référence s'il avait plutôt affaire avec un public plus jeune (6-7 ans).

C4 Bien je dirais que cet animal-là a besoin de ces qualités-là pour survivre ... D'après moi elle comprendrait. Sa nourriture elle [la girafe] la mange dans les arbres par exemple, elle a besoin d'un long cou, des longues pattes ... Ce serait aussi simple que ça.

À l'instar de U1, C4 retire toute considération évolutive de son explication et se limite à un simple constat fonctionnaliste : la girafe a de longs membres pour aller chercher sa nourriture dans les arbres.

Toujours comme U1, C4 propose pour les adolescents une explication contenant quelques éléments supplémentaires par rapport à celle de référence : une emphase sur la survie et la mort des individus, puis une mention de la propagation du matériel génétique ainsi sélectionné lors de la reproduction.

C4 Je lui expliquerais peut-être justement la théorie de l'évolution. [...] En gros les plus forts restent, ceux qui ont les habilités à survivre dans une situation survivent, puis les autres se font, pas éliminer, mais ne restent pas. Donc ceux qui restent sont ceux qui se reproduisent, et ils transmettent les gènes si tu veux qu'ils aient à la naissance au reste de leur famille.

Le sujet C4 a bien conscience que la simplicité de ses explications augmente lorsque l'âge de son public diminue, et que somme toute cela convient aux enfants :

C4 Il me semble que moi, dans ma tête, plus l'enfant est jeune, plus tu as tendance à lui dire, pas ce qui est faux, mais à banaliser, et puis à dire, « bien c'est comme ça ». Et puis l'enfant, habituellement, de ce que j'ai vécu, il se contente de ça, en autant que ça ne le bouleverse pas trop ...

Lorsqu'interrogé sur les raisons derrière ces choix explicatifs, C4 invoque plus d'une fois le désir de savoir des jeunes comme facteur déterminant : une explication trop simple, seulement fonctionnaliste, ne satisferait pas la curiosité des adolescents.

C4 Je pense qu'au fur et à mesure que tu vieillis, tu veux en savoir plus, tu veux savoir la vérité si tu veux. [...] Donc quelqu'un de secondaire 3-4, ça ne lui serait comme pas suffisant pour lui une explication « ah bien tout ce qu'elle veut manger c'est dans les arbres ... ».

À la fin de la tâche, le sujet C4 exprime bien le fait qu'il tient compte de différents paramètres dans le choix de l'explication qu'il fournit aux enfants de 10-11 ans.

I Et puis ton explication par rapport à celle de Darwin, c'est quoi ses forces et ses faiblesses ?

C4 La force de ça c'est que ça explique en gros pourquoi ... C'est sûr qu'il n'y a pas les détails, ça c'est une faiblesse, ça n'explique pas en profondeur, et puis tu sais il y a des choses qu'on n'est encore même pas sûr. [...] Mais je dirais que la force de ça c'est que pour quelqu'un qui n'a pas toutes les connaissances, ou que c'est limité [dans le temps] ce qu'il peut apprendre à ce moment-là, je pense que ça explique bien, et que ça ne met pas en erreur totale. Tu sais, c'est comme si je disais « les girafes ont un long cou parce que c'est comme ça », ou bien « parce que Dieu l'a fait ainsi », bien je ne suis pas sûr que je lui amènerais tous les éléments, genre corrects selon moi ... C'est sûr, ça dépend ... Je pense que c'est ça.

D'une part, le temps disponible et les connaissances antérieures du public cible semblent agir comme contraintes situationnelles. D'autre part, le niveau de détail et le degré de vérité des explications possibles sont considérés. Le niveau de détail peut être varié (et être ajusté au désir de connaître), mais tout n'est pas permis sous licence de vulgarisation : certaines explications simplifiées doivent être considérées comme erronées et par conséquent rejetées.

4.3.1.2 Tâche sur les échanges de chaleur

Lors de cette tâche, nous avons demandé aux sujets de fournir une explication vulgarisée à propos du phénomène de conduction thermique, plus précisément dans un contexte de propagation de la chaleur à travers une louche placée dans une soupe chaude. Les deux sujets que nous avons retenus pour cette analyse sont de niveau universitaire : U1 et U3.

Le sujet U1

Comme pour la tâche de vulgarisation concernant la longueur des membres des girafes, le sujet U1 simule l'acte de vulgarisation qu'il vivrait si la tâche était réelle. Pour expliquer l'absence de conduction de chaleur à travers la louche en plastique, U1 emploie explicitement une analogie avec l'écoulement d'un liquide.

- U1 Le petit gars veut toucher la louche,
- Puis je dis : Non non non non, pour ta petite sécurité on ne va pas y toucher.
 - Puis là il dit : Non je veux ...
 - Et là tu lui dis : Non, le métal c'est chaud, c'est comme si en touchant le métal tu touchais directement à la soupe. Le plastique, c'est comme une barrière entre toi et la soupe.
 - [Il dit] Hein, comment ça ?
 - Tu dis : Parce que la chaleur, ça bouge, ça circule, un petit peu comme de l'eau. Et là le métal c'est comme un gros tuyau d'eau : la chaleur peut passer beaucoup dans le métal. Tandis que dans le plastique, il n'y en a pas beaucoup qui passe [?]. Si tu veux, petit gars, on peut y toucher à la louche. Fais attention.
 - Là il y touche : Ouch, ça fait mal !
 - Je te l'avais dit mon petit gars.
- U1 C'est ça, tu lui dis que c'est chaud, et que ça ne conduit pas. C'est tout.

Dans le processus de propagation, la chaleur est présentée d'une manière qui s'approche du substantialisme : « la chaleur, ça bouge, ça circule ». Le rapprochement avec l'écoulement de l'eau dans un tuyau tend à consolider cette conception de la chaleur, même s'il est présenté en tant qu'analogie (« un petit peu comme de l'eau »). Dans cette analogie, l'eau et la taille du tuyau sont respectivement les analogues de la chaleur et de la conductivité. Cette analogie a d'importantes affinités avec la théorie du calorique, à la base de la thermodynamique au début du 19^e siècle, ce que le sujet U1 reconnaît lui-même.

Avec le public d'adolescents, U1 délaisse l'approche substantialiste en faveur d'une explication microscopique de la chaleur. La chaleur cesse d'être une entité pour devenir l'énergie associée à un état de la matière, i.e. à l'agitation des molécules de l'objet. Les liens intermoléculaires, ou interatomiques, deviennent alors le facteur déterminant pour la conductivité thermique.

- U1 Là tu rentres un peu plus loin dans l'explication. Tu dis : la chaleur c'est l'agitation des molécules. C'est que les molécules dans un métal sont très liées, comme avec des crochets. Ce qui fait que quand il y en a une qui bouge beaucoup, l'autre bouge beaucoup, très vite. Un peu comme quand tu décides de bouger une corde. Tandis que dans le plastique, elles sont moins bien liées finalement. Elles ne sont plus avec

des crochets, elles sont comme [ça ?]. Quand une bouge, l'autre elle ne suit pas automatiquement l'autre à côté, parce qu'elle n'est pas accrochée comme ça en fait. Alors là elle bouge, l'autre ne bouge pas. Alors là en fait la chaleur circule mal dans le plastique. C'est comme ça que je leur expliquerais à peu près.

Avec des enfants de 6-7 ans, U1 nous dit qu'il aurait clairement opté en faveur de l'analogie du tuyau d'eau, tandis que « tantôt je n'étais pas trop sûr de parler de tuyau avec l'enfant de 10-12 ans; c'est comme un entre-deux. » Essentiellement donc, U1 possède deux explications : l'une analogique et macroscopique, l'autre microscopique. Comme pour la tâche à propos de la grandeur des girafes, U1 invoque les capacités intellectuelles des enfants comme le facteur déterminant son choix :

I Qu'est-ce qui fait que ce que tu modifierais à travers les âges ce soit d'utiliser ou non l'analogie avec les conduits d'eau ?

U1 Le degré d'abstraction de l'enfant. Si l'enfant est capable de s'imaginer des atomes qui s'échangent de la chaleur ou pas. Un enfant de 10-12 ans n'a peut-être pas encore la capacité de faire abstraction du métal et puis de dire : il y a des atomes là, qui sont accrochés. C'est plus facile pour eux de faire une abstraction avec un objet courant, qu'ils ont touché souvent, comme un tuyau justement. Tandis qu'un atome, ils n'ont pas souvent vu ça.

Puisque les enfants ont des capacités limitées, ils ne peuvent apprendre tout d'un coup. Il est donc nécessaire que l'enseignement se fasse par étapes. U1 envisage par conséquent d'employer différents niveaux de formulation de la notion de chaleur.

U1 Mais tu sais, un enfant de 12 ans, si tu expliques tout ce qui est la chaleur, il ne va rien comprendre. Alors ça va par étape finalement. [...] Tu lui expliques la fluidité de la chaleur, puis ensuite tu lui expliques que c'est de l'agitation des molécules, alors il fait le lien avec ce qu'il a vu deux ans avant, que c'était comme de l'agitation des molécules. Tu sais, l'apprentissage, c'est la science de la répétition ... Tu répètes le même concept, mais en englobant de plus en plus tous les domaines. Donc chaque fois que tu expliques quelque chose, ce n'est pas nécessairement faux, c'est juste incomplet.

Le sujet U3

Outre U1, le sujet U3 est celui qui s'est exprimé le plus clairement et le plus aisément dans cette tâche de vulgarisation. Pour un public de niveau primaire (U3 affirme qu'il offrirait essentiellement la même explication aux jeunes de 6-7 ans qu'à ceux de 10-11 ans), ce sujet adopte une approche substantialiste, qui est véhiculée implicitement par les verbes tels « conduire », « emmagasiner ». Contrairement à U1, U3 n'a pas le réflexe de recourir à une analogie pour concrétiser son explication.

U3 Essentiellement ce que je dis c'est que le métal c'est un bon conducteur de chaleur, ce qui fait que si tu le mets dans un liquide chaud, le métal va conduire la chaleur, va lui-même devenir chaud. C'est ça que je voulais dire : c'est un bon conducteur, il va devenir chaud. Ce qui fait que si tu y touches tu risques de te brûler. Le plastique, contrairement, c'est un mauvais conducteur de chaleur, donc lui va rester plus froid. Il ne va pas emmagasiner la chaleur. C'est ça.

Pour les adolescents, U3 affirme d'abord que son explication serait la même, et que ce qui changerait serait la quantité d'exemples qu'il emploierait et analyserait. À la toute fin de sa réponse, U3 ouvre la porte à une explication microscopique, un peu comme si une telle explication constituait un autre niveau explicatif auquel il pourrait éventuellement accéder sous certaines conditions.

U3 Je dirais la même chose, mais j'irais plus loin en fait, je les relancerais sur une autre question. Je leur dirais, quand tu as une cuillère de métal et que tu mets tes mains dessus, tu as l'impression qu'elle est froide. Et quand tu mets tes mains sur du bois, tu as l'impression que c'est chaud. Pourtant les deux sont à température de la pièce par exemple. Pourquoi as-tu l'impression que la cuillère de métal est froide ? Parce que justement c'est un bon conducteur, alors ça vient tirer la chaleur sur ta main, et ça laisse une sensation de froid au niveau de ta main. Je les relancerais sur une autre question en fait, pour essayer de généraliser ou montrer d'autres exemples sur le même phénomène. Et puis s'ils sont intéressés, j'aurais le goût de leur parler d'agitation thermique. C'est des petits atomes.

Questionné à savoir sur quoi il se baserait pour inclure ou non une explication microscopique dans sa vulgarisation, U3 répond que la compréhension atomique de la matière représente un volume de connaissance trop vaste et trop abstrait pour être abordée en quelques minutes. Les adolescents ont sur les plus jeunes l'avantage d'avoir été progressivement « initiés » par leurs cours de science.

I Tu proposais, pour des adolescents de 14-15 ans, de faire référence à la nature de la chaleur comme étant un degré d'agitation thermique, au niveau des atomes et des molécules. Mais pourquoi tarderais-tu à introduire ce concept-là ? Pourquoi tu ne l'introduirais pas pour des personnes plus jeunes ?

U3 Je crois qu'ils n'ont encore jamais été sensibilisés ou amenés à la nature atomique du monde, ils n'ont pas encore été initiés à ça. Puis ça implique, si je veux leur en parler, qu'ils sachent que c'est constitué d'atomes, puis c'est quoi un atome, puis qu'on est tous faits d'atomes, puis qu'est-ce qui se passe dans un atome, puis toute l'énergie, l'agitation de la molécule. En fait ça implique un énorme bagage qui prendrait plus que 2 minutes à leur expliquer. Surtout aussi ça demande un degré d'abstraction en fait dans lequel je ne suis pas suffisamment à l'aise pour tenter de leur expliquer.

4.3.1.3 Discussion

La pluralité des explications fournies par les sujets

Les extraits des entrevues que nous avons réalisées avec les sujets U1, U3 et C4 montrent bien que ces derniers ont modifié l'explication qu'ils ont employée lorsque le contexte de la tâche variait. Ceci démontre que ces sujets avaient accès à une pluralité d'options, qu'elles aient été préexistantes dans la mémoire ou encore construites sur place spécifiquement pour la tâche. Pour la tâche de vulgarisation concernant le pourquoi du cou des girafes, les explications proposées semblaient varier entre un pôle uniquement fonctionnaliste et un autre où domine une genèse darwinienne. Dans le cas de la tâche de vulgarisation sur la conduction thermique, deux pôles explicatifs semblaient également à l'oeuvre : une approche substantialiste macroscopique à propos de la nature de la chaleur (avec possibilité d'une analogie plus ou moins explicite avec les fluides), puis la conception microscopique faisant intervenir les degrés d'agitation des molécules de même que les liens intermoléculaires. Les vulgarisations proposées par les sujets se situaient généralement quelque part entre ces pôles, constituant ainsi des explications mixtes.

Nous n'avons présenté qu'une fraction du matériel recueilli pour les tâches de vulgarisation. À notre avis, ces extraits ont été suffisants pour exposer les possibilités explicatives envisagées par les sujets. Les entrevues avec les autres sujets pour ces deux tâches, et l'ensemble de l'entrevue pour la troisième tâche (à propos du phénomène d'évaporation), ne nous semblent pas apporter d'éléments supplémentaires à l'analyse. De plus, mentionnons de nouveau que les extraits que nous avons présentés ont été sélectionnés pour la clarté avec laquelle cette souplesse explicative était exposée et justifiée explicitement. Dans plusieurs des entrevues, surtout celles des sujets de niveau collégial, cette souplesse et ces justifications ont plutôt fait place à une rigidité (une même explication pour tous) et une certaine confusion, que nous expliquons au moins en partie par un manque de connaissances à propos du phénomène faisant l'objet de la tâche (ce que les sujets n'avaient pas tendance à avouer, mais qui a parfois été révélé par l'utilisation de questions explicites).

L'emploi de la stratégie coûts-bénéfices

Lors des tâches de vulgarisation, le seul élément du contexte que nous avons fait varier a été l'âge du public auquel s'adressait la vulgarisation. Évidemment, il aurait été intéressant d'altérer le contexte selon d'autres dimensions (par exemple : proposer une situation formelle plutôt qu'informelle, ou encore faire varier le temps et les ressources mis à la disposition du sujet), mais nous avons estimé que la variation de l'âge serait suffisante pour mettre en évidence une modification de l'explication fournie par les sujets. Cette simplicité méthodologique se répercute au niveau de l'analyse dans la mesure où elle nous a permis d'exclure d'emblée l'emploi de certains mécanismes d'activation de l'explication. Par exemple, les modifications apportées par les sujets ne peuvent être provoquées par des signaux terminologiques ou sociologiques, puisque les termes et les catégories sociales employés dans l'énoncé de la tâche demeuraient inchangés. De plus, l'utilisation d'un critère conceptuel est à exclure puisque le phénomène à être expliqué demeure le même. La possibilité de l'emploi d'un répertoire de situations déjà rencontrées duquel les sujets récupérerait l'explication toute faite ne peut toutefois être rejetée sur la même base. Il est en effet possible que certains sujets aient déjà eu l'occasion de vulgariser ces phénomènes spécifiques (ou d'autres très semblables) à de tels publics. Cette possibilité nous apparaît cependant improbable, et c'était là un des intérêts que nous trouvions à ces tâches. Même en ce qui concerne le sujet U1, qui a pourtant été animateur dans un camp de vacances et dans un observatoire astronomique, il nous apparaît peu probable qu'il ait déjà eu à vulgariser précisément ces phénomènes, et qu'ainsi il ait eu l'occasion de se constituer en mémoire une solution toute prête à être employée.

Contrairement à ces mécanismes d'activation, nous n'avons aucune raison d'écarter a priori la stratégie de choix par évaluation des coûts et bénéfices, le seul autre mécanisme que nous avons envisagé à la section 3.2.3. Conclure par élimination que ce mécanisme est celui employé par les sujets serait cependant peu convaincant. C'est pourquoi nous avons inclus dans le protocole d'entrevue des questions donnant l'occasion aux sujets de justifier leurs vulgarisations.

Telle que nous l'avons proposée, la stratégie coûts-bénéfices implique que les sujets se créent un cahier des charges cognitives, constitué de l'ensemble des visées à

atteindre et des contraintes à respecter lors de la tâche. Pour qu'une ressource conceptuelle (ici, une explication) puisse être sélectionnée, il doit y avoir adéquation entre cette dernière et le contenu du cahier des charges que s'est formé le sujet.¹⁰¹ Si un tel processus d'activation est employé, nous sommes en droit de nous attendre à ce que les commentaires justificatifs des sujets fassent références à des facteurs venant contraindre ou permettre le choix de leur explication.

Les extraits présentés plus haut contiennent des passages où les sujets justifient leur explication en invoquant certains facteurs. Le nombre de facteurs invoqués lors d'une seule tâche de vulgarisation était bien souvent un seul, mais pouvait aller d'aucun à exceptionnellement trois, voire quatre. Ce faible nombre nous a quelque peu surpris, mais nous étions réticents à modifier le protocole d'entrevue afin d'inclure davantage de questions exigeant une justification de la part des sujets. En effet, il est probable que les tâches de vulgarisation aient été résolues très rapidement par les sujets, sans que ceux-ci se formulent explicitement les raisons de leur choix. Par exemple, lorsque questionné, C4 décrit d'abord une impression :

C4 Il me semble que moi, dans ma tête, plus l'enfant est jeune, plus tu as tendance à lui dire, par ce qui est faux, mais à banaliser, et puis à dire, « bien c'est comme ça ».

Ce n'est que lorsqu'il se fait demander pourquoi il a cette impression que C4 fait intervenir explicitement divers facteurs (voir les extraits présentés plus haut). Nous avons préféré poser les questions justificatives sans grande insistance, afin de donner l'occasion aux sujets d'explicitement les raisons derrière leurs choix, tout en évitant de leur demander trop d'efforts justificatifs qui risqueraient de déboucher sur des reconstructions idéalisées par rapport aux aspects de la tâche réellement considérés. Mentionnons également qu'il est arrivé que certains sujets reviennent modifier partiellement leur vulgarisation alors qu'ils étaient en train de justifier celles-ci. Ceci trahit manifestement le fait que ce travail justificatif est, au moins dans certains cas, un travail de reconstruction, mais cadre bien en revanche avec l'idée proposée à la section 3.2.3 selon laquelle l'activation par évaluation des coûts-bénéfices peut se faire

¹⁰¹ Nous avons proposé l'idée à la section 3.2.3 que l'information disponible constituait également un des termes de l'adéquation (par exemple, rien ne sert d'opter pour des ressources conceptuelles adéquates avec le cahier des charges si nous n'avons pas à notre disposition l'information pour employer ces ressources). Cette facette de la stratégie n'est pas importante ici puisque les tâches de vulgarisation en restent à un niveau qualitatif pour lequel les sujets n'ont pas vraiment besoin de connaissances factuelles.

de manière itérative (du fait de l'absence d'algorithme pour la résolution des problèmes ouverts).

Bien que chaque sujet n'ait invoqué lors d'une même tâche qu'un faible nombre de facteurs responsables des modifications apportées par rapport à leur vulgarisation de référence, nous en retrouvons une gamme variée lorsque nous considérons l'ensemble des tâches et des sujets. Ces facteurs peuvent être regroupés en trois catégories (pour chaque facteur, nous indiquons quel sujet l'a invoqué et pour quelle tâche : le suffixe *a* réfère à la tâche des adaptations biologiques, *b* à celle de la conduction thermique, *c* à celle de l'évaporation).

La première catégorie est celle des caractéristiques de la situation :

- Le temps : le fait de n'avoir que quelques minutes agit comme une contrainte (C4a, U3b);
- L'objectif : si l'objectif est tout simplement de ne pas se brûler, rien ne sert de fournir une explication complexe (C1b, C4b, C5b);

Puis, certaines raisons font référence aux caractéristiques du public :

- Le niveau de développement des capacités intellectuelles : les jeunes enfants sont incapables d'imaginer que les choses aient pu être différentes dans le passé (U1a); les enfants ont des difficultés à concevoir des entités inobservables, abstraites (U1b);
- Les connaissances antérieures : les enfants ne possèdent pas certaines des connaissances qui seraient nécessaires pour comprendre l'explication (C3b, C4a, U3b);
- Le désir de savoir, la curiosité : les adolescents ont tendance à vouloir en savoir davantage et ne se contentent pas d'une explication simpliste (C4a);
- La motivation : une explication trop complexe ne captera pas l'intérêt des jeunes (C2c, C5b, U2a);

Finalement, les sujets ont mentionné l'influence de certaines caractéristiques des explications considérées :

- Le niveau d'abstraction : certaines notions sont plus abstraites que d'autres (U2a, U2b, U3a);
- Les termes : certains termes sont spécialisés et ont avantage à être remplacés par d'autres plus communs (C4a, U2a);
- Le niveau de détail : il est possible d'inclure plus ou moins de détails dans l'explication et la rendre ainsi plus ou moins complète (C4a, C4c, C5a); il existe plusieurs niveaux de formulation (niveaux de détail) qui constituent des étapes

naturelles d'apprentissage (C3c, C4c, U1b, U1c);

- L'essentialité : certains aspects de l'explication sont considérés comme essentiels ou fondamentaux, et il est difficile ou non souhaitable de ne pas les inclure (C1c, C2b, U3a);
- Le degré de vérité : une vulgarisation peut se permettre d'être incomplète, mais on ne peut aller jusqu'à donner des explications fausses (C4a, U2b).

Ces facteurs ne sont évidemment pas indépendants. Ils s'interpellent de manière complexe et c'est à l'intérieur de ce jeu complexe de contraintes que la recherche d'une solution adéquate s'effectue. Nous ne tenterons pas dans cette analyse de représenter la façon dont ces facteurs sont reliés, bien que ce ceci puisse s'avérer intéressant pour l'étude des actes de vulgarisation en soi.

Nous constatons donc que, globalement, les sujets ont effectué de nombreux jugements à propos des caractéristiques de la situation et des explications. D'une part, ceci va dans le sens de la thèse que nous avons avancée à la section 3.1.1, à savoir que les recherches sur le changement conceptuel faisant appel à la notion de statut sous-estiment la capacité des étudiants à porter toute une gamme de jugements à l'endroit des explications. D'autre part, cela démontre que les sujets ont été sensibles à ces paramètres lorsqu'ils réalisaient les tâches de vulgarisation. Les extraits présentés (et d'autres non présentés) montrent que les sujets, en considérant ces paramètres contraignants, vivaient une tension et tentaient d'atteindre un compromis adéquat (voire optimal). Ces indices nous permettent de conclure de manière raisonnable qu'au moins certains sujets ont employé une stratégie d'évaluation coûts-bénéfices dans le choix de l'explication qu'ils allaient offrir à leur public.

Commentaires méthodologiques

L'analyse des résultats obtenus lors des tâches de vulgarisation appuie donc l'hypothèse, suggérée à la section 3.2.3.2, que les problèmes ouverts sont susceptibles de requérir l'utilisation d'une stratégie d'activation complexe, où un cahier des charges cognitives est construit et où sont évalués les avantages et inconvénients des ressources conceptuelles disponibles. Mais notre recours aux tâches de vulgarisation avait avant tout un objectif plus ambitieux qu'une première validation empirique de cette hypothèse. Nous pensions obtenir également des résultats stimulants qui nous auraient amené à produire de nouvelles hypothèses concernant ce mécanisme

d'activation. Il faut avouer qu'à cet égard les conclusions de nos analyses sont décevantes, et ceci demande explication.

Outre notre possible manque de créativité, plusieurs raisons nous semblent avoir concouru à cette situation. D'abord, nous devons reconnaître l'existence de quelques lacunes dans l'application du protocole d'entrevue. En effet, certaines questions de relance un peu trop directives ont été posées à certains sujets, notamment nos premiers sujets collégiaux, lorsque ceux-ci montraient une rigidité inattendue dans leurs vulgarisations. De plus, certaines questions du protocole ont été omises par inadvertance lors des entrevues avec C1 et C2. Pour ces raisons, nous avons accordé moins d'importance à cette portion des données. Nous avons resserré par la suite l'application du protocole et obtenu des résultats satisfaisants pour les autres sujets, de sorte que ces lacunes n'ont probablement pas eu d'effet notable sur la richesse des données recueillies.

Ensuite, nous avons été surpris de constater que la plupart des sujets avaient une connaissance fragile des phénomènes faisant l'objet des vulgarisations (sauf les étudiants universitaires à propos des deux phénomènes physiques). Par exemple, C5 aurait bien voulu donner aux adolescents plus de détails à propos de la conduction thermique, mais il a avoué ne pas les connaître. À ce niveau, il faut envisager une certaine tendance toute naturelle des sujets à vouloir camoufler cette ignorance, qui devient alors un facteur dont l'influence est difficile à estimer. Il se trouvait parfois que cette ignorance était trahie par leur vulgarisation elle-même, comme dans le cas de U2 qui, en pensant parler de la théorie de l'évolution, faisait référence à un processus lamarckien (« puis les girafes, c'est à cause de leur alimentation, c'est à cause en fait qu'ils se nourrissent ... C'est la façon qu'elles ont évolué, leur physionomie s'est adaptée à leurs habitudes. »).¹⁰² De telles connaissances lacunaires viennent nécessairement restreindre chez les sujets à la fois le bassin des ressources conceptuelles à leur disposition et leur facilité à y accéder consciemment. La richesse des vulgarisations et des verbalisations produites s'en trouve par conséquent réduite.

¹⁰² Ce type de conception de l'évolution est d'ailleurs encore fréquent chez les étudiants collégiaux et universitaires, même après l'enseignement de la théorie néodarwinienne (Brumby, 1984; Bishop & Anderson, 1990).

Finalement, bien que les tâches de vulgarisation aient constitué des problèmes ouverts, les sujets les ont complétés très rapidement : quelques minutes pour la vulgarisation initiale (pendant lesquelles nous demandions aux sujets d'écrire les principaux éléments de leur vulgarisation); de manière presque instantanée pour les vulgarisations modifiées. La rapidité de l'exécution de ce processus de choix a probablement réduit la capacité des sujets à le commenter de manière fiable et détaillée par la suite.

Bien que les tâches de vulgarisation nous aient fourni du matériel permettant de démontrer l'utilisation d'une stratégie d'activation coûts-bénéfices, nous pensons que toute étude exploratoire ultérieure au sujet de cette stratégie devrait employer une méthodologie substantiellement différente. Nous suggérons de recourir à un problème ouvert au moins aussi complexe et dont la résolution se ferait sur une durée nettement plus longue. La complexité et la longueur du problème devraient être telles qu'elles donnent la possibilité au chercheur d'accéder directement au processus de résolution du problème, soit par l'observation de la production de traces écrites, soit par une verbalisation concomitante. De plus, une complexité accrue devrait augmenter les chances d'observer s'il y a lieu les aspects itératifs de la résolution du problème (les boucles d'essais, erreurs et corrections). La stratégie méthodologique de la modification post hoc du contexte nous est apparu cependant très révélatrice dans le cas des tâches de vulgarisation et son utilisation est encouragée. Finalement, la question de la flexibilité conceptuelle dans le processus de résolution de problème ouvert nous semble fortement rattachée à celle de l'expertise du sujet. Nous recommandons en conséquence de déterminer au préalable l'expertise des sujets relativement aux contenus concernés par les problèmes, et suggérons de plus qu'il serait intéressant d'observer l'effet de l'expertise en sélectionnant des sujets appartenant à des niveaux clairement différents (experts, intermédiaires, novices).

4.3.2 La structure décisionnelle dans les tâches des doubles fentes

La deuxième série de tâches que nous avons employée avec nos sujets avait également comme fonction de nous permettre d'étudier un type particulier de structure décisionnelle. Nous nous sommes inspiré pour ce faire d'un domaine qui a

été à la base de nos réflexions sur la complexification conceptuelle, soit l'apprentissage de la mécanique quantique.

Soulignons que l'objectif de cette partie de notre recherche exploratoire ne porte pas sur la compréhension qu'ont les étudiants de l'univers quantique et la mise en évidence des diverses difficultés qu'ils peuvent rencontrer (à ce sujet, voir la section 1.2.1). Il concerne plutôt un thème bien spécifique : la question de la démarcation entre mécanique classique et mécanique quantique.

Pour étudier ce thème, nous avons eu recours à une expérience spectaculaire et régulièrement présentée dans les cours d'introduction, soit l'expérience des doubles fentes réalisées avec des électrons. Rappelons que cette expérience consiste à diriger un faisceau d'électrons de très faible débit (un à un) sur deux fentes d'un écran et de détecter de l'autre côté de cet écran la position de l'électron à l'aide d'une plaque réceptrice. Les impacts ponctuels visibles sur la plaque démontrent la nature corpusculaire des électrons, tandis que, globalement, des franges d'interférence sont clairement visibles sur la plaque, révélant ainsi la nature ondulatoire des électrons. Le schéma expérimental de cette expérience comporte plusieurs paramètres qui peuvent être variés, de sorte qu'elle peut constituer un cadre permettant d'étudier la compréhension de la démarcation entre la mécanique quantique (pour laquelle le résultat est un patron d'interférence) et la mécanique classique (laquelle fait correspondre une tache à chaque fente).

De manière générale, les phénomènes quantiques deviennent importants lorsque l'action caractéristique du système est égale ou inférieure à la valeur de \hbar . Dans le contexte de l'expérience des doubles fentes, ceci revient à dire que le phénomène d'interférence deviendra important lorsque la distance entre les fentes (a) est égale ou inférieure à la longueur d'onde (λ) des particules projetées : $a \leq \lambda$. La longueur d'onde est quant à elle inversement proportionnelle à la vitesse et à la masse des particules (relation de de Broglie). Puisque ce critère conceptuel demande une certaine maîtrise de la théorie quantique, il est peu probable qu'il soit employé par nos sujets, notamment ceux de niveau collégial. Il est donc fort à parier qu'ils se rabattent sur des stratégies d'activation moins sophistiquées, que ce soit par la détection de signaux terminologiques, de signaux sociologiques ou encore en

employant un critère conceptuel simpliste. Par exemple, nous savons par expérience que la distinction entre « échelle microscopique » et « échelle macroscopique » est souvent présentée comme définissant les domaines de validité des deux mécaniques.

Le protocole a été conçu spécifiquement pour exposer l'utilisation d'un critère conceptuel par les sujets. D'abord, après avoir décrit dans leurs propres mots les versions lumineuse et électronique de l'expérience des doubles fentes, les sujets ont été amenés à formuler ce qu'ils croient être les conditions de démarcation entre mécanique classique et mécanique quantique relativement à ce schéma expérimental. Dans un deuxième temps, nous avons employé une stratégie similaire à celle utilisée dans les tâches de vulgarisation : la modification d'un des aspects du contexte, soit l'utilisation d'un faisceau non plus constitué d'électrons, mais de particules plus massives (protons et neutrons, atomes, molécules, etc.). Cette stratégie a comme objectif de nous aider à déterminer ce à quoi est sensible la stratégie d'activation employée par les sujets.

Contrairement à ce que nous avons fait pour les tâches de vulgarisation, nous présenterons et analyserons les données obtenues non pas par sujet, mais par type de critère conceptuel recensé. Puisque notre objectif est exploratoire, nous présenterons, pour chaque type de critère, un nombre limité d'extraits provenant de divers sujets. Ces segments d'entrevue ont une fonction expositoire dans notre analyse et sont sélectionnés à la fois pour leur clarté et leur représentativité. La différence étant majeure entre les connaissances des sujets collégiaux et ceux universitaires relativement à ce thème, nous prendrons soin de distinguer les deux niveaux académiques lors de notre analyse.

Mais avant de procéder à celle-ci, glissons un mot sur la compréhension des sujets à propos des deux versions de l'expérience des doubles fentes, qui formaient après tout le contexte dans lequel nous avons abordé le thème de la démarcation entre les deux mécaniques. En ce qui a trait à l'expérience des doubles fentes avec de la lumière, nous notons une certaine confusion chez les sujets (sauf pour un sujet universitaire, U1) entre le phénomène d'interférence (qui se produit entre deux sources lumineuses ponctuelles et cohérentes) et celui de diffraction (qui consiste en l'interférence d'un rayon lumineux avec lui-même lorsqu'il passe par une fente de

largeur un peu plus grande que sa longueur d'onde). Cette confusion est compréhensible puisqu'il s'agit de deux phénomènes découlant de la nature ondulatoire de la lumière.

Nous pouvons cependant conclure que l'idée d'interférence constructive et destructive en optique était suffisamment maîtrisée pour servir de base à la discussion concernant la version de l'expérience des doubles fentes employant des électrons. En effet, tous les sujets ont remarqué la présence des franges d'interférence et ont mentionné la nature ondulatoire des électrons comme étant la principale conclusion de cette expérience. Cependant, seuls les sujets universitaires ont pu apprécier l'implication la plus intrigante de cette expérience, soit que chaque électron interfère avec lui-même au passage du système de fentes, ce qui nous oblige à dire qu'il passe en quelque sorte par les deux à la fois (ce qui n'est pas paradoxal du point de vue ondulatoire). Par exemple, C5 semble perplexe sur ce point :

I Qu'est-ce qui arrive dans cette région-ci avec notre électron ?

C5 Il va prendre un des deux [trous]. Bien ... [silence]. C'est sûr qu'il ne passera pas dans les deux trous en même temps.

I Pourquoi qu'il ne passerait pas par les deux en même temps ?

C5 Parce que c'est un électron. Il ne peut pas passer à deux places en même temps [...].

Ce constat rejoint celui d'Olsen (2002), mentionné au chapitre 1, qui concluait que la dualité onde-corpuscule était comprise plus facilement dans le cas de la lumière que dans celui des électrons. Nous jugeons que la compréhension de l'expérience des doubles fentes avec des électrons s'avère toutefois suffisante chez les sujets collégiaux pour que celle-ci constitue un contexte pertinent dans lequel nous pouvons poser la question de la démarcation entre la physique classique et la physique quantique, l'objet réel à l'étude dans cette tâche.

4.3.2.1 Les critères conceptuels employés

Notre analyse des résultats obtenus nous permet d'identifier trois types de critère conceptuel employé par les sujets.

Critère d'échelle

Une stratégie courante dans l'enseignement de la physique moderne est d'associer le domaine de pertinence de la physique quantique au monde « microscopique », le

monde « macroscopique » continuant d'être décrit par la physique classique. Nous nous attendions donc à ce qu'il soit invoqué par plusieurs sujets, surtout ceux de niveau collégial.

En effet, ce critère conceptuel nous semble avoir été celui adopté par défaut par l'ensemble des sujets, autant collégiaux qu'universitaires. Lorsque nous posons une première question sur les conditions expérimentales à respecter pour obtenir soit le résultat classique soit le résultat quantique, la plupart des réponses montraient un certain degré de confusion. Le sujet U1 s'est cependant démarqué en énonçant dès lors le critère microscopique / macroscopique :

U1 Bien il faut rendre les grandeurs microscopiques au lieu de macroscopiques. Ça j'avoue que je ne dirais pas ça à des jeunes de 10-12 ans ! Il faut en fait que tu fasses apparaître la nature ondulatoire de la matière, puis ça c'est de l'ordre très très petit.

Pour les autres sujets, il aura fallu attendre la partie du protocole mentionnant des faisceaux de particules plus massives pour que référence soit faite à ce critère de démarcation. Et dans plusieurs cas, ce n'est qu'une fois la question de la démarcation explicitement formulée que le critère fut énoncé, comme dans l'extrait suivant.

I Mais est-ce que tu connais la frontière entre le monde classique et le monde quantique ?

C5 Je ne sais pas à partir de où, mais il faut absolument que ça soit petit. [...] Je ne sais pas où est la frontière, mais je pense qu'un proton c'est trop gros pour qu'on puisse résoudre un problème quantique avec ça.

I Trop gros, en termes de volume ou de masse ?

C5 Trop gros, en termes de volume, de masse, d'énergie, de tout ...

Ceci nous amène à penser que la distinction microscopique / macroscopique est un critère conceptuel que les sujets sont peu habitués à employer dans des situations précises. Il s'agirait davantage d'une connaissance déclarative apprise à propos des domaines de pertinence de la mécanique newtonienne et de la mécanique quantique que d'une connaissance intégrée à une structure décisionnelle fonctionnelle.

Un indice supplémentaire de ceci se retrouve dans le fait que ce critère est compris de manière très vague. À quelle limite correspondent précisément les termes « microscopiques » et « macroscopiques » ? Même le sujet universitaire U3, ayant démontré par ailleurs une solide compréhension de l'expérience quantique des doubles fentes, reste initialement évasif lorsque questionné sur ce point.

- I Finalement, quand est-ce qu'on tranche entre une interprétation quantique et une version classique ?
- U3 Il me semble c'est quand tu reviens à une dimension plus humaine de tes franges.
[...]
- I Mais est-ce que tu es capable de me donner une limite plus précise, parce que « dimension humaine », c'est plutôt vague ...
- U3 J'ai de la misère à dire. Moi j'ai juste un ordre de grandeur, en centimètre, un truc comme ça ... ou du mètre.

Afin d'inciter les sujets à s'exprimer davantage concernant le choix entre mécanique newtonienne et mécanique classique, nous avons modifié le contexte de l'expérience en leur demandant ce qui se produirait si un faisceau de particules plus massives était employé. Par ces questions, les sujets ont été amenés à voir que la distinction microscopique / macroscopique est à elle seule floue et que nous nous attendions à un peu plus de précision. Pressés en ce sens, les sujets ont offert deux types de critères en guise de raffinement.

Critère ontologique

D'abord, selon tous les sujets collégiaux, il serait possible de produire des patrons d'interférence avec des protons ou des neutrons, alors qu'il serait impossible de le faire avec des poussières ou des objets encore plus gros ou plus massifs. Lorsqu'ils se sont fait proposer des particules progressivement plus massives, les sujets collégiaux ont tous fait part d'une réticence à octroyer un comportement ondulatoire aux atomes. Malgré les hésitations dans les réponses de C2, ceci est observé dans l'extrait suivant :

- I Maintenant, qu'est-ce qui arriverait si on prenait un faisceau de protons ou de neutrons au lieu des électrons ?
- C2 Bonne question ... C'est plus gros, comment ça va agir avec tout ça ...
- I Tu peux t'essayer.
- C2 C'est sûr que plus on augmente, plus on se rapproche de la physique classique, Newton et toutes ces affaires-là. Mais protons et neutrons, ça reste quand même petit... Euf, j'aurais tendance à dire que ça va faire le même genre de chose. Ouais, ça va interférer.
- I Ça va faire un patron d'interférence...
- C2 Ouais.
- I Pour pousser un peu plus loin, qu'est-ce qui arriverait si on prenait un atome, comme un atome de carbone.
- C2 Ouais, mais là il y a plusieurs particules dans un atome : neutrons, protons, électrons.

I Si on prenait cet ensemble-là de particules ...

C2 Et on le lance ... Hmm ... Ah, là ça ne marche plus ! [rires] Il y trop d'affaires. Hum, j'ai l'impression que tout va s'annuler. Puis là que tu as des électrons qui interfèrent avec des protons et des neutrons.

Les sujets collégiaux perçoivent une différence qualitative importante entre les électrons, protons et neutrons d'une part, puis les atomes d'autre part : les atomes constituent une organisation de composantes plus élémentaires. Cette différence semble être récupérée comme limite supérieure d'application de la dualité onde-corpuscule, comme dans le cas de C3 :

I C'est la taille qui te fait douter ?

C3 Non pas nécessairement, parce que le carbone ce n'est pas ... Tu sais, un proton ça a une charge positive, un neutron ça n'a pas de charge et un électron ça a une charge négative. Tandis que là un atome, il y a des électrons qui tournent autour, il y a des protons à l'intérieur, des neutrons à l'intérieur. C'est plein de choses en même temps.

I C'est une structure complexe.

C3 Ouais c'est ça.

Que l'atome et sa composition complexe soient ainsi invoqués par tous les sujets collégiaux comme limite entre domaine quantique et domaine classique nous a quelque peu étonné dans un premier temps, mais ceci pourrait être expliqué par une faiblesse dans leur très jeune compréhension de la mécanique quantique. Vokos et ses collègues (2000) remarquent que les étudiants s'initiant à la théorie quantique font souvent l'erreur de considérer la longueur d'onde de l'électron comme une de ses propriétés intrinsèques. Nos sujets collégiaux pourraient bien faire de même à propos des électrons, protons et neutrons, des particules toutes situées à la même échelle de la réalité. Mais dans cette perspective, si chacune des composantes de l'atome possède sa propre longueur d'onde, on voit mal comment l'atome lui-même posséderait une longueur d'onde unique qui lui serait intrinsèque. On pourrait bien penser que, puisque l'atome est une organisation de particules subatomiques, sa nature ondulatoire serait construite à partir de celle de chacune de ses composantes. Mais l'onde résultante devrait alors être une superposition des ondes de chacune des particules subatomiques, ce qui ne saurait constituer une onde ayant une longueur d'onde unique. Bref, les sujets auraient bien du mal à conjuguer la notion de complexité avec celle de dualité onde-corpuscule.

L'erreur à la base d'un tel raisonnement est évidemment de ne pas réaliser que la mécanique quantique, tout comme la mécanique newtonienne, possède une neutralité ontologique. Nous pouvons appliquer les lois de Newton à n'importe quel objet, peu importe sa nature : un électron, une balle, un bateau (pourvu qu'on puisse considérer qu'il ait une structure interne rigide). Il en va de même pour la mécanique quantique : nous pouvons attribuer à tout objet une longueur d'onde déterminée par sa masse et sa vitesse, peu importe sa composition. D'ailleurs, restreindre l'existence de longueurs d'onde aux électrons, protons et neutrons serait oublier que ces particules sont composées à leur tour de particules encore plus élémentaires : les quarks.

Critères faisant référence aux dimensions du système de fentes

Bien que les sujets universitaires aient, à l'instar de ceux collégiaux, d'abord fait référence à la distinction microscopique / macroscopique, le critère qu'ils ont élaboré par la suite en réaction à nos questions pressantes est allé dans une tout autre direction que celle d'un critère ontologique.

En effet, les sujets universitaires ne font aucunement référence au caractère complexe de l'atome et celui-ci n'est pas envisagé comme lieu de la limite. Ces sujets semblent plutôt tenter de formuler un critère en posant une analogie avec la version lumineuse de l'expérience des doubles fentes : puisque les phénomènes de diffraction disparaissent lorsque la largeur des fentes devient un peu plus grande que la longueur d'onde de la lumière, la situation devrait être similaire avec les particules.

Cette analogie permet effectivement d'énoncer un critère de démarcation valide, mais son utilisation exige tout de même un certain développement qui ne se fait pas sans difficulté. Par exemple, U2 développe mal l'analogie lorsqu'il fait référence à la *taille* des atomes plutôt qu'à leur longueur d'onde :

U2 Tu sais, les atomes ont des fonctions d'onde quand même, et les fonctions d'onde, par exemple l'atome d'hydrogène, si tu regardes les franges d'interférence que l'onde produit, c'est sphérique, ce sont des cercles concentriques comme ça. Alors je pense qu'avec des atomes on observerait quand même un comportement quantique, plus que classique.

I À partir de quel moment on observerait un comportement classique alors ?

U2 Je pense que c'est à partir du moment que la largeur des fentes est beaucoup plus grande que la taille des atomes. Donc très très très grande en fait. Si c'était ouvert complètement, ce serait un jet, un faisceau d'électrons dirigés

Le sujet U1 fait quant à lui référence à la longueur d'onde des particules, mais pour immédiatement stipuler que cette longueur d'onde est en fait comparable à la taille de la particule elle-même.

U1 C'est la limite où la dualité onde-particule apparaît en fait. Quand tu commences à faire des expériences où l'ordre des grandeurs que tu utilises est très très très petit, du même ordre finalement que la longueur d'onde intrinsèque de la particule, qui est à peu près de la grosseur de la particule en tant que telle.

Dans cette conception, la longueur d'onde est explicitement caractérisée comme étant une propriété intrinsèque de la particule. La relation de de Broglie est alors entièrement ignorée; la masse des particules ainsi que leur vitesse sont des paramètres qui ne sont pas considérés, même si ils sont clairement indiqués sur la feuille que les sujets ont devant eux, immédiatement à la gauche des images montrant la formation des patrons d'interférence.

Quelques questions plus loin, le sujet U1 revient spontanément sur sa conception lorsqu'il pousse plus loin l'analogie avec l'expérience des doubles fentes avec la lumière, en remarquant (avec beaucoup d'hésitations) que la longueur d'onde de la lumière dépend de son énergie, et qu'il devrait en être de même avec la matière (un raisonnement similaire à celui qu'a conduit de Broglie à son équation).

I Comment tu fais pour définir ce qui est microscopique dans un schéma comme ça ?

U1 Bien là c'est la taille de l'électron. Oui. Mais non en fait il y a l'énergie qui rentre en ligne de compte. Parce que l'énergie d'une particule est reliée à sa longueur d'onde. Alors l'énergie de la lumière est reliée à sa longueur d'onde. L'énergie de la particule est-elle reliée à sa longueur d'onde ? ... Non, je pense que non. Euh ...
 Hmm. C'est une bonne question. Je pense que oui, que son énergie est reliée à sa longueur d'onde. Puis plus elle a de l'énergie, plus on est capable de travailler sur un schéma plus grand. Je ne sais pas ...

De tous nos sujets, seul U3 est parvenu à bien exploiter le parallèle avec la version lumineuse des doubles fentes en déterminant de manière juste la longueur d'onde associée à une particule, en employant la relation de de Broglie (en fait, en la redérivant par lui-même) et en faisant référence aux paramètres du montage expérimental.

- U3 C'est quoi la limite ... Mais comme je te dis en fait, il y a toujours la relation entre la largeur de tes fentes, qui doit être de l'ordre de grandeur de ta longueur d'onde. Ça, tu vas avoir de l'interférence dans ces cas-là. Puis en fait les longueurs a et d sont beaucoup plus grandes que ta longueur d'onde, là tu vas retomber dans la limite géométrique. Ça tu regardes ça comme limite, c'est la même chose que tantôt [que pour les doubles fentes avec de la lumière]. Là on parle de longueur d'onde, mais oui il y a aussi une longueur d'onde pour nos atomes et nos électrons, puis tout ça.
- I Et ça dépend de quoi cette longueur d'onde là ?
- U3 Bien euh, la longueur d'onde c'est toujours le même truc ... [écriture]
- I Ça, ça serait pour un proton.
- U3 Ouais ... Qu'est-ce qu'y en est pour les autres ... Il faudrait retrouver λ ... aaahhh. Comment on fait pour trouver λ pour l'atome ? C'est ... $p = \hbar k$, et $p = mv$, alors $k = 2\pi/\lambda$... donc $\lambda = \hbar 2\pi/mv$... Ça va être, si je me souviens bien, la longueur d'onde de la particule. Avec sa masse et sa vitesse, tu vas trouver une longueur d'onde. Il faut que tes fentes soient de même dimension ... Qu'est-ce qu'il y en est ici ... Masse des électrons, 6000 km/s ... Est-ce que c'est valide ça ? Si on avait $\hbar 2\pi$...
- I Là tu calcules quoi ?
- U3 La longueur d'onde de l'électron ... C'est valide ?

4.3.2.2 Discussion

Résumé

Amener les sujets à parler de la version quantique de l'expérience des doubles fentes nous a permis de faire quelques observations concernant les stratégies que peuvent employer des étudiants pour décider de recourir soit à la mécanique quantique, soit à la mécanique traditionnelle. Il est impératif de garder à l'esprit que nos observations ont une portée limitée étant donné le faible nombre de sujets que nous avons interviewés. Néanmoins, certaines tendances ont clairement été dégagées.

D'abord, la distinction entre échelle microscopique et échelle macroscopique, souvent mentionnée dans les cours de physique moderne, semble constituer le critère conceptuel qui est employé de prime abord pour identifier le domaine d'application de la théorie quantique. Mais pressés par nos questions spécifiques à l'expérience quantique des doubles fentes, les sujets se sont rendu compte de l'insuffisance de ce critère et ont tenté de reconstruire un critère conceptuel davantage opérationnel. Le caractère non opérationnel de la distinction microscopique / macroscopique montre que celui-ci constitue une connaissance déclarative qui aide probablement à gérer le

conflit conceptuel entre les deux mécaniques, sans toutefois constituer une structure décisionnelle fonctionnelle. Une absence de pratique relativement à la sélection de l'une ou l'autre des mécaniques pourrait être à l'origine de cette lacune, présente même chez les sujets universitaires.

Le processus de reconstruction d'un critère conceptuel, entrepris par les sujets, a débouché sur des résultats diversifiés. Les sujets collégiaux ont tous opté pour un critère ontologique : les atomes, du fait de leur structure interne, ne possèdent pas de nature ondulatoire et ne peuvent donc produire un patron d'interférence. Comme nous l'avons souligné, ce critère s'appuie sur une mauvaise compréhension de la portée de la mécanique quantique, qui, tout comme la mécanique newtonienne, ne considère qu'un nombre restreint de paramètres et ne se préoccupe pas de la structure interne des objets dont elle traite. Quant aux sujets universitaires, leur travail de reconstruction s'est basé sur une analogie avec l'expérience des doubles fentes avec la lumière, expérience pour laquelle la limite entre optique géométrique et optique ondulatoire avait déjà été raisonnablement bien identifiée au préalable. Bien que cette analogie puisse conduire à la formulation d'un critère conceptuel valide, deux des trois sujets universitaires ont éprouvé des difficultés, en faisant référence à la dimension des particules plutôt que d'utiliser convenablement la relation de de Broglie et de reconnaître l'importance de la masse et de la vitesse des particules du faisceau. Ces résultats démontrent qu'un critère conceptuel ne constitue pas nécessairement une connaissance factuelle, sans logique et devant être apprise par coeur : un tel critère peut être le fruit d'un raisonnement, possiblement mené à l'intérieur même du contexte d'une tâche particulière. Mais nous constatons qu'un tel travail de reconstruction, pour être valide, nécessite une bonne compréhension des théories en question.

Commentaires méthodologiques

Pour conclure notre analyse de la tâche des doubles fentes, nous pouvons effectuer quelques remarques d'ordre méthodologiques.

Il faut d'abord rappeler que notre méthode restreignait notre étude des structures décisionnelles à l'utilisation de critères conceptuels. En effet, il est probable que tout sujet ait une tendance naturelle à vouloir employer un critère conceptuel justifié

plutôt qu'un signal terminologique ou sociologique pour sélectionner une conception, du fait que ces stratégies sont probablement employées de manière irréfléchie et qu'elles possèdent un statut d'heuristiques commodes mais non justifiées, les rendant difficilement avouables en entrevue. Pour les activations par signaux terminologiques ou sociologiques, une méthodologie semblable à celle employée par Pozo et ses collègues (1999), qui ne recouraient pas à des entrevues où les sujets étaient amenés à discuter de leurs réponses, pourrait donc être plus appropriée.

D'autre part, il faut reconnaître rétrospectivement que la méthode consistant à faire varier progressivement le contexte de l'expérience par l'utilisation d'un faisceau de protons, neutrons, atomes, etc., a certainement influencé le travail de reconstruction d'un critère conceptuel par les sujets de niveau collégial. En effet, nos questions à ce niveau étaient formulées de manière telle qu'elles pouvaient laisser entendre aux sujets que le critère de démarcation se situait bel et bien quelque part sur cet axe ontologique, ce qui n'est pas le cas. En lui-même, le critère ontologique suggéré par les sujets collégiaux doit donc être pris avec réserve. Cependant, notre conclusion sur l'existence d'un travail de reconstruction d'un critère conceptuel par les sujets, travail cependant miné par une lacune fondamentale dans la compréhension de la mécanique quantique, demeure valide.

Finalement, il est important de garder à l'esprit que l'expérience des doubles fentes ne constitue qu'un seul contexte et que le critère reconstruit par les sujets ne s'applique qu'à celui-ci. Il aurait été intéressant d'étudier les critères conceptuels employés (ou reconstruits) par les sujets pour d'autres situations physiques pouvant recevoir un traitement soit quantique soit classique.

4.3.3 Autres éléments d'analyse

Tel que nous l'avons présenté plus haut, l'objectif d'une recherche exploratoire est de favoriser le développement des ressources théoriques initiales par leur mise en interaction avec du matériel empirique obtenu à cette fin. Le succès d'une recherche exploratoire se mesure alors par la fertilité de cette interaction, tandis qu'aucune garantie n'existe au sujet de cette fertilité.

Les tâches que nous avons conçues visaient spécifiquement à explorer la nature des structures décisionnelles dans deux contextes particuliers. Alors que dans le cas des tâches des doubles fentes certains résultats inattendus ont été mis en évidence au sujet des critères conceptuels, les tâches de vulgarisation ne nous ont pas mené à de nouvelles hypothèses au sujet de la stratégie d'activation par évaluation coûts-bénéfices. Notre recherche s'est donc avérée d'un succès limité en ce qui a trait aux structures décisionnelles.

Nous n'avons cependant aucune obligation de nous limiter à ce volet de la complexification conceptuelle dans l'analyse des données que nous avons obtenues. La fertilité d'une recherche exploratoire ne se retrouve pas nécessairement là où elle est attendue. Et effectivement, les tâches de vulgarisation nous fournissent du matériel intéressant concernant les autres types de structures cognitives. Dans cette section, nous poursuivrons deux pistes d'analyse supplémentaires. La première porte sur l'absence de contradiction ressentie par les sujets entre leurs diverses vulgarisations (section 4.3.3.1). La seconde s'inspire des protodialogues spontanément employés notamment par U1 lors des tâches de vulgarisation pour suggérer quelques hypothèses de nature sociocognitive (sections 4.3.3.2 et 4.3.3.3).

4.3.3.1 Notions de vérité, de validité et de complétude

Lors des entrevues concernant les tâches de vulgarisation, nous avons inclus une question portant sur la vérité des explications fournies par les sujets (voir la figure 14, section 4.2.2.3). Cette question avait pour but premier de donner l'occasion explicite aux sujets de justifier leurs choix de vulgarisation. Après tout, si l'explication fournie aux adolescents de 14-15 ans est différente de celle fournie aux jeunes de 6-7 ans, les deux ne peuvent être également vraies. Le fait de ne pas donner toujours l'explication « vraie » (ou, formulé d'une manière plus provocatrice, le fait de donner une explication « fausse ») demande alors justification.

Il nous est apparu que dans les réponses des sujets à cette question de relance la notion de vérité ne s'opposait pas à celle de fausseté. En effet, les sujets semblaient réfractaires à l'idée de considérer fausses les explications simplifiées qu'ils adressaient aux jeunes enfants. Bien sûr, il est possible que cette réticence des sujets provienne de leur souci d'éviter de donner une image de soi dévalorisante en tant que

vulgarisateur, selon laquelle ils enseigneraient des « faussetés ». Mais cette réticence nous est apparue trop spontanée et trop fréquente pour qu'elle soit expliquée de cette seule façon. Une conception inattendue de la vérité nous a semblé également en cause.

Au lieu de la dichotomie vérité / fausseté que nous anticipions de prime abord et qui était implicite dans la formulation de cette question, plusieurs sujets ont employé un continuum pour s'exprimer sur le statut de leurs explications. Ce continuum semble comporter deux aspects : celui de la valeur épistémique et celui de la complétude du contenu.

La vérité et la validité

Au niveau de la valeur épistémique, nous avons d'abord remarqué que certains sujets s'opposaient à l'idée de considérer fausse la vulgarisation qu'ils proposaient au jeune public. Par exemple, dans la tâche de vulgarisation concernant les échanges de chaleur, le sujet C4 qualifie de « vraies » les deux explications qu'il a proposées :

- I Un peu la même question, mais en termes de vérité. Qu'est-ce que tu as à dire à propos de cette explication-là [donnée aux jeunes de 6-7 ans], et celle en termes d'agitation moléculaire [donnée aux adolescents] ?
- C4 Bien les deux sont vraies ... bien je pense ... Je pense que c'est juste la conclusion qu'on peut en amener du phénomène moléculaire qui se produit. C'est juste moins poussé. Les deux sont vraies, c'est juste qu'il y en a une qui est moins détaillée que l'autre, qu'elle est plus résumée si tu veux ...

Pour la même tâche, le sujet U2 qualifie lui aussi de « vraie » l'explication s'adressant aux jeunes enfants, mais il s'agit explicitement dans son cas d'une vérité partielle. Chez U2, la vérité d'une explication semble donc varier le long d'un continuum, à l'extrémité inférieure duquel se retrouvent les faussetés (« conneries »), soit les explications radicalement différentes et erronées :

- I Est-ce que l'explication est vraie, celle que tu leur fournis à 6-7 ans ?
- U2 Moi je pense que oui, je pense qu'elle est vraie. Mais je pense aussi qu'en leur expliquant d'une manière vulgarisée, très très très basique, peut-être que quand ils vont être plus vieux, ils vont réaliser que c'était vrai, mais pas tout à fait vrai. [...] C'est sûr que dans les grandes lignes tu ne dis pas des conneries quand même. Ça ne servirait à rien que je lui dise que c'est Dieu qui fait ça : « ah c'est Dieu qui a mis la chaleur dans le métal », il va faire comme : « euh ... ah ouin ... ? » C'est sûr que je ne vais pas dire ça.

Lors de la tâche de vulgarisation concernant l'évaporation, le sujet U3 semble également penser le statut de ses explications à l'aide d'un continuum. Bien qu'il ne soit pas clair que la partie supérieure du continuum soit envisagée comme étant la vérité (« Comme si il y avait une vérité avec un grand V. Ça non plus il n'y en a pas. On se donne un modèle, on essaie d'expliquer ... »), sa partie intermédiaire semble être conçue en termes de *validité* :

I Comment conçois-tu la vérité pour chacune des trois explications que fournirais ?
Quel est leur statut ?

U3 Bien c'est certain que l'explication pour les plus âgés, c'est ce que je trouve de plus complet et de plus rigoureux, de plus solide comme explication. Puis celle pour les jeunes en fait, c'est une explication, c'est une vulgarisation, c'est donner une idée et les initier aux transferts thermiques et à la thermo sans rentrer dans le technique, sans rentrer dans les détails, sans donner toutes les subtilités. C'est pour donner une idée en fait. C'est moins rigoureux, c'est moins valide ... c'est une explication grossière. C'est une explication grossière, mais je veux dire c'est quand même valide, c'est juste que c'est pas complet. Mais ça reste très correct comme explication. Je veux dire, entre ça et faire intervenir des extra-terrestres, je préfère encore ça et de loin.

En somme, aucun sujet n'a utilisé la dichotomie vérité / fausseté implicite à notre question de relance et ceux qui ont élaboré leur pensée sur ce thème ont invoqué une notion de vérité plus flexible et graduelle.

La complétude

Plusieurs sujets ont préféré exprimer les différences de statut entre leurs explications non pas en termes de vérité, mais plutôt en termes de complétude.¹⁰³ L'extrait que nous venons de présenter de l'entrevue réalisée avec C4 comporte une phrase qui est explicite sur ce point :

C4 Les deux sont vraies, c'est juste qu'il y en a une qui est moins détaillée que l'autre
[...]

À plusieurs moments de l'entrevue (dans les tâches de vulgarisation et dans la tâche des doubles fentes) le sujet U1 a clairement recadré la question du statut en termes

¹⁰³ La notion de complétude peut être comprise dans le cadre des structures explicatives. En effet, la relation « être moins complète » est assimilable à une explication de type conceptuelle. Rappelons que par une telle explication, l'intérêt d'une conception C₁ est expliqué par le fait qu'elle constitue une simplification de la conception privilégiée C₂, par laquelle sont négligés certains aspects de C₂.

de complétude de l'explication. Par exemple, dans la tâche de vulgarisation des échanges de chaleur :

U1 Comme je disais tantôt, dans une explication, tu dis quelque chose de vrai, mais tu ne dis pas tout dans l'explication. Ce que je dis, c'est toujours relativement vrai. [...]

U1 Donc, je crois que c'est correct finalement de donner une explication ... pas fausse, mais incomplète ... C'est ça le mot : ce sont des explications pas fausses, mais incomplètes qui n'englobent pas toute la définition de ce qu'est la chaleur.

Dans la même tâche de vulgarisation, le sujet U3 exprime cette même idée avec des termes plus sophistiqués. Il considère que de décrire les transferts de chaleur sans les expliquer au niveau microscopique constitue une explication valide, mais phénoménologique (i.e. qui permet de rendre compte efficacement de ce qui est observable dans les échanges de chaleur, sans se soucier des mécanismes à la bases de ces phénomènes).

I Et est-ce que tu considères que le fait de ne pas faire intervenir la notion d'atome et d'agitation thermique pour expliquer des phénomènes comme ceux-là, c'est rogner un peu sur la vérité, écarter un peu la vérité, produire peut-être même une explication fausse ? Est-ce que tu as l'impression de sacrifier la vérité finalement ?

U3 Non, pas ici. Et ça, le fondement au niveau des transferts de chaleur, la phénoménologie reste valide. Le fait d'être conducteur ou mauvais conducteur, ça s'explique au niveau des atomes et tout ça. Mais tu n'as pas besoin de savoir ça pour distinguer un bon conducteur d'un mauvais conducteur thermique, pour savoir qu'est-ce que ça va faire comme conséquence. C'est juste un niveau de connaissance que je ne leur ouvre pas. Je leur donne une explication, je leur donne une formulation correcte, et que je considère valide en fait, qui est vraie, mais il y a tout un pan plus avancé, plus poussé, auquel je ne m'aventure pas. Ça fait que je leur donne encore une information vraie, véridique. Je ne leur cache rien, c'est ça que je veux dire. [...] Pour moi c'est une explication phénoménologique.

Ainsi, plusieurs sujets préfèrent utiliser la notion de complétude pour penser le statut relatif de leurs explications. Contrairement à la notion de vérité qui, dans son sens fort s'oppose à celle de fausseté, la notion de complétude n'est pas fondamentalement en opposition avec celle d'incomplétude. Alors qu'une explication fausse est incompatible avec l'explication vraie, une explication incomplète peut être vue comme compatible avec l'explication complète. Ces sujets semblent ainsi concevoir leurs différentes explications comme étant différents niveaux de formulation de ce qui est essentiellement la bonne explication (l'explication scientifique). Entre ces niveaux de formulation, il y a une continuité, un glissement.

Pour s'exprimer sur le passage d'un niveau de formulation à l'autre, sur le passage d'une explication moins complète à une plus complète, les sujets ont souvent utilisé une métaphore spatiale bien connue ne contenant aucune trace d'incompatibilité : celle opposant une surface (moins complet) à un intérieur (plus complet, plus réel), métaphore que l'on reconnaît facilement par les termes tels « approfondir », « creuser », « entrer », etc.¹⁰⁴ Par exemple :

- « Je pense qu'elle [l'explication] reste valide, mais ce n'est pas la plus approfondie. » (C2)
- « La force de ça c'est que ça explique en gros pourquoi ... C'est sûr qu'il n'y a pas les détails, ça c'est une faiblesse, ça n'explique pas en profondeur, et puis tu sais il y a des choses qu'on n'est encore même pas sûr. » (C4)
- « Moi je trouve que ce n'est pas nécessaire de creuser plus loin. » (C3)
- « Là tu rentres un peu plus loin dans l'explication. » (U1)
- « Puis celle pour les jeunes en fait, c'est une explication, c'est une vulgarisation, c'est donner une idée et les initier aux transferts thermiques et à la thermo sans rentrer dans le technique, sans rentrer dans les détails, sans donner toutes les subtilités. » (U3)

Un modèle de la notion de vérité employé par les sujets

Il est possible de distinguer entre deux conceptions de la vérité, l'une instrumentaliste et l'autre réaliste.¹⁰⁵ Selon la conception instrumentaliste (ou antiréaliste) de la vérité, une théorie est vraie dans la mesure où elle permet de rendre compte efficacement des observables et d'effectuer des prédictions à leur endroit (une théorie est vraie lorsqu'elle « sauve les phénomènes »). Selon la conception réaliste, une théorie est vraie lorsqu'elle explique comment le monde est réellement.

Cette distinction pourrait nous permettre de mieux comprendre les réponses des sujets quant au statut épistémique de leurs explications. Nous proposons l'hypothèse que les sujets emploient un continuum faisant intervenir différentes notions de la vérité :

¹⁰⁴ Lakoff et Johnson (1980) ont identifié de nombreuses métaphores employées couramment pour penser la connaissance. En didactique des sciences, voir également Roth & Roychoudlhury (1994, p. 16) et Hammer & Elby (2002).

¹⁰⁵ Au sujet de ces deux positions épistémologiques, voir également la section 2.1.4.2

- La valeur supérieure du continuum serait réservée à l'explication ultime, vraie dans un sens réaliste fort (V_R). Le vrai ultime (V_R) est nécessairement efficace à rendre de compte de l'ensemble des phénomènes observables, il implique par conséquent le vrai au sens instrumentaliste (v_I).
- Dans la partie intermédiaire du continuum, on retrouverait une notion de vérité réaliste dans un sens faible (v_R) : une explication est vraie (v_R) lorsque les entités ou les mécanismes qu'elle postule sont d'une nature essentiellement comparable à celle de l'explication vraie (V_R). Une explication est plus ou moins vraie (v_R) lorsqu'elle est plus ou moins complète par rapport à l'explication vraie (V_R). Cette explication est également plus ou moins vraie dans le sens instrumentaliste (v_I), puisqu'elle rend compte avec une certaine efficacité des phénomènes observables.
- Finalement La valeur inférieure serait réservée aux explications fausses au sens réaliste (f_R), i.e. les explications qui sont fondamentalement différentes de l'explication vraie (V_R) au niveau des entités ou des mécanismes qu'elles emploient. Le faux (f_R) peut bien s'avérer efficace et donc vrai au sens instrumentaliste (v_I).

Dans ce continuum, le vrai (V_R) est absolu et unique, alors que le vrai (v_R) vient par degrés et peut être multiple. Le faux (f_R) n'est pas non plus unique (plusieurs explications différentes peuvent être fausses) et n'est possiblement pas absolu (il pourrait varier par degrés). La frontière entre le vrai (v_R) et le faux (f_R) est relative à ce qui est jugé essentiel au niveau des entités et des mécanismes constituant l'explication, ce qui est susceptible de varier selon les contextes. Le vrai instrumentaliste (v_I) est quant à lui facile à caractériser : il a une valeur supérieure mais il n'est pas exclusif (deux explications peuvent être également vraies (v_I)), et il vient par degrés sans s'opposer à un faux instrumentaliste.

Ce modèle nous permet de mieux comprendre l'utilisation des termes « vraie », « valide », « correcte » et « complète » par les sujets, termes susceptibles de prêter à confusion du fait de leur diversité ou encore de la polysémie du mot vérité. Dans les passages suivants, les notions de vérité interpellées sont indiquées entre crochets :

- Les deux sont vraies [les deux sont v_R , ou possiblement l'une est V_R et l'autre est v_R], c'est juste qu'il y en a une qui est moins détaillée que l'autre ... (C4)
- ... ils vont réaliser que c'était vrai [v_R], mais pas tout à fait vrai [V_R]. (U2)
- C'est sûr que dans les grandes lignes tu ne dis pas des conneries [f_R] quand même. (U2)
- Ce que je dis, c'est toujours relativement vrai [v_R , par opposition à V_R]. [...] Donc, je crois que c'est correct finalement de donner une explication ... pas fausse [f_R], mais incomplète [v_R] ... (U1)

- C'est une explication grossière, mais je veux dire c'est quand même valide [$v_1 + v_R ?$], c'est juste que c'est pas complet [V_R]. Mais ça reste très correct [v_R] comme explication. Je veux dire, entre ça et faire intervenir des extra-terrestres [f_R], je préfère encore ça et de loin. (U3)
- Je leur donne une explication, je leur donne une formulation correcte [v_R], et que je considère valide [$v_1 + v_R ?$] en fait, qui est vraie [$?$], mais il y a tout un pan plus avancé, plus poussé, auquel je ne m'aventure pas. Ça fait que je leur donne encore une information vraie, véridique [v_R]. Je ne leur cache rien, c'est ça que je veux dire. [...] Pour moi c'est une explication phénoménologique [v_1]. (U3)

Bien que les distinctions que nous venons d'effectuer rendent la lecture de certains passages plus compréhensible, certains termes restent tout de même ambigus. C'est le cas de la notion de validité employée notamment par le sujet U3 dans les deux derniers extraits. Il est manifeste que cette notion ne renvoie pas au vrai V_R , mais il n'est pas clair si elle possède un sens instrumentaliste, réaliste ou encore à la fois instrumentaliste et réaliste. Le matériel à notre disposition ne permet pas de trancher à ce niveau.

Discussion

Lien avec la littérature sur les croyances épistémologiques

Le thème de la vérité est important pour comprendre la complexification conceptuelle. En effet, la multiplicité des conceptions (ou la multiplicité de leurs niveaux de formulation) soulève directement la question de leur hiérarchisation épistémique. Ce thème n'a cependant pas été étudié spécifiquement dans les recherches sur les conceptions épistémologiques des étudiants faites en psychologie et en didactique. En conséquence, il demeure à l'heure actuelle assez peu connu, particulièrement en ce qui concerne le phénomène des conceptions multiples.

Nous pouvons cependant affirmer que le modèle de la notion de vérité que nous venons de proposer est compatible avec la littérature traitant des croyances épistémologiques des étudiants. Ces recherches font état de différents niveaux de sophistication épistémologique : les jeunes élèves adopteraient une conception où la connaissance consiste en un ensemble de faits isolés possédant une valeur absolue et produits lors d'un contact direct et objectif avec la nature, alors que les étudiants plus vieux auraient quant à eux davantage tendance à concevoir la connaissance comme

constituée d'observations et d'explications interreliées, résultantes d'un processus intellectuel complexe et ayant une valeur non absolue et soumise à l'argumentation (voir par exemple : Grosslight et al., 1991; Hofer & Pintrich, 1997). En employant un continuum pour penser la vérité de leurs explications au lieu d'employer une dichotomie réaliste naïve, nous considérons que les sujets que nous avons cités ont fait preuve d'une telle sophistication épistémologique.

Certains chercheurs ont associé la sophistication épistémologique à l'adoption d'un antiréalisme et d'un relativisme (voir à ce sujet la critique faite par Elby & Hammer, 2001). Nous jugeons que nos sujets (surtout ceux universitaires) ont démontré une sophistication épistémologique au sens ci-haut, mais il nous semble clair que la notion de vérité qu'ils ont employée était principalement réaliste. En effet, la notion de complétude ne prend sens que dans une perspective réaliste : une explication n'est incomplète (grossière, moins détaillée, moins approfondie, correcte) que par rapport à l'explication complète, l'explication vraie (V_R). Cependant, comme nous l'avons mentionné plus haut, certains passages (faisant intervenir la notion de validité) pourraient être assimilables à l'utilisation d'une notion instrumentaliste de la vérité (v_I).

Dans l'étude des conceptions épistémologiques, plusieurs chercheurs soulignent l'importance du contexte sur les réponses des étudiants (Elby & Hammer, 2001; Driver, Leach, Millar, & Scott, 1996). D'abord, on souligne que l'épistémologie observée chez les étudiants risque fortement de différer selon que les questions sont formulées de manière générale (par exemple : « Qu'est-ce que la vérité ? ») ou à l'intérieur d'un contexte spécifique (par exemple : « Cette explication est-elle plus ou moins vraie que l'autre ? »). De plus, l'épistémologie employée par les sujets peut varier d'un contexte spécifique à l'autre. Par conséquent, il est nécessaire de reconnaître que nos remarques sur la conception de la vérité de nos sujets ne sont valides que pour le contexte des tâches de vulgarisation. Nous pensons qu'il est probable qu'une conception différente de la vérité aurait ressurgi s'ils avaient été questionnés avec des termes différents pour ces mêmes tâches,¹⁰⁶ ou si une tâche

¹⁰⁶ Par exemple, les étudiants considéreraient comme plus solides ou plus matures les lois que les théories, et les théories que les hypothèses (Larochelle & Désautels, 2003). En employant le terme « explication » ou

différente avait été employée (par exemple, parler de vérité dans le cadre d'un débat entre deux théories) ou encore s'ils avaient été interrogés de manière générale sur ce sujet.

Avenues.de_recherche

Comme nous venons de le mentionner, d'autres contextes auraient pu faire ressortir des conceptions différentes de la vérité. Un contexte de débat, où l'on doit trancher entre deux alternatives théoriques, serait très intéressant à étudier. Il est raisonnable de penser que la notion de complétude (et de vrai (v_R)) n'y serait pas vraiment pertinente et qu'en contrepartie le vrai (V_R) et le faux (f_R) y interviendraient davantage. Il est également possible qu'en cas de match nul les deux alternatives soient dites vraies dans un sens instrumentaliste (v_I).

Nous proposons plus haut qu'une explication est considérée vraie (v_R) lorsque les entités ou les mécanismes qu'elle postule sont d'une nature essentiellement comparable à celle de l'explication vraie (V_R). L'explication vraie (v_R) n'est pas considérée comme fausse (f_R) mais incomplète. Le faux (f_R) est réservé aux explications fondamentalement différentes de l'explication vraie (V_R). Cette conception de la vérité et de la fausseté semble faire intervenir une sorte d'essentialité : ce n'est que passé un certain seuil de simplification ou de distorsion qu'une explication devient une fausseté. Il pourrait être intéressant de tenter d'étudier plus en profondeur ce en quoi consiste le caractère essentiel des explications. Pour ce faire, nous pensons que les tâches de vulgarisation sont très révélatrices. Mais il serait également pertinent d'employer également d'autres tâches, puisqu'il est possible que cette frontière entre le vrai (v_R) et le faux (f_R) dépende du contexte.

« vulgarisation » dans nos questions, il est possible que nos sujets aient adopté spontanément une perspective faillibiliste au sujet de leurs explications.

4.3.3.2 Dialogues et complexification conceptuelle

Les interactions sociocognitives et la complexification conceptuelle

Lors de l'analyse des résultats des tâches de vulgarisation concernant les adaptations biologiques et les échanges des chaleurs, nous avons présenté les dialogues fictifs rudimentaires employés spontanément par le sujet U1. Voici le dialogue qu'il a produit sur le thème de l'évaporation :

- U1 Là tu as une jeune cousine qui pense que l'eau ça tombe du linge, et qu'en fait tu t'arranges pour lui faire comprendre par elle-même la fausseté de son raisonnement, en lui demandant :
- Oui mais, quand le linge est humide, ça sèche quand même.
 - Elle dit : Bien oui.
 - Je lui dis : Vois-tu l'eau qui tombe du linge humide ?
 - Elle me dit : Bien non.
 - Puis là je lui dis : Si on s'assoie là, et qu'on reste à côté, tu ne verras jamais une goutte qui tombe.
 - [Elle dit :] Bien non.
 - Et je dis : Tu sais, en fait la piscine qui est juste là, ta maman il faut qu'elle la remplisse souvent.
 - Elle dit : Bien oui.
 - Puis là je dis : Mais là, l'eau elle ne va pas partout quand vous sautez dans la piscine.
 - [Elle dit :] Oui, et l'eau descend quand même.
 - Tu dis : C'est parce que l'eau s'évapore en gaz.
 - Elle est là : Hein !
 - [Je dis :] Eh oui eh oui, comme dans ta bouilloire ! Quand ta bouilloire bout, ça fait du gaz. L'eau en fait s'est transformée en gaz. En fait, c'est que quand l'eau est agitée, qu'elle a beaucoup beaucoup de chaleur (on revient à l'explication de tantôt en fait), elle se trouve tellement agitée qu'elle n'est plus capable de rester en liquide et elle se transforme en gaz. Et en fait c'est ce qui arrive quand tu étends ton linge sur la corde à linge : c'est le soleil qui chauffe l'eau qui est dans ton linge, et l'eau se transforme en gaz. Comme ça, elle s'envole par le soleil !
 - Puis là elle dit : Ah oui ? mais quand il ne fait pas chaud ça sèche quand même.
 - Puis je dis : Ça sèche n'importe quand l'eau en fait, et surtout le vent ça aide beaucoup, parce que ça chasse l'eau qui s'est transformée en gaz à côté. Et là quand l'eau a été chassée, l'eau qui est restée dans le linge est capable encore plus de s'évaporer.

Ce dialogue fictif montre bien que U1 utilise, pour penser la tâche de vulgarisation et la résoudre, une représentation (au moins schématique) de ce que pense la jeune enfant au sujet de l'évaporation. Puisque cette représentation s'ajoute à la conception que U1 possède lui-même au sujet de ce phénomène, nous pouvons dire que, lors de son interaction fictive avec l'enfant, U1 jongle avec une pluralité de conceptions.

Ainsi interprétés, ces protodialogues nous amènent à envisager l'idée plus générale que les interactions sociocognitives fournissent des contextes où les individus, puisqu'ils doivent se représenter la pensée des autres, composent avec une pluralité de conceptions. À notre avis, cette pluralité peut être analysée à profit à l'aide de la notion de la complexion conceptuelle telle que nous l'avons proposée au chapitre 3.

Dans le dernier droit de notre travail, nous désirons développer rapidement cette réflexion et ajouter de cette façon un volet sociocognitif à la notion de complexification conceptuelle, que nous n'avons abordée jusqu'à maintenant que sur le plan individuel. Pour ce faire, nous nous limiterons à deux pistes de réflexion : les dialogues (cette section) et l'enseignement (section 4.3.3.3).

La complexification conceptuelle lors des dialogues entre locuteurs partageant des conceptions différentes

Les êtres humains possèdent des capacités cognitives inégales, une de celles-ci concernant l'attribution d'états mentaux à d'autres individus (croyances, désirs, intentions, etc.), capacité que même les chimpanzés pourraient ne pas avoir. En d'autres termes, ils possèdent une théorie de l'esprit (Premack & Woodruff, 1978).

Cette capacité constitue un avantage certain pour un être humain : les représentations qu'il se construit au sujet des états mentaux des autres lui permettent d'expliquer et de prédire leurs comportements puis de s'ajuster en conséquence. Au niveau communicationnel, cette capacité lui donne l'avantage d'attribuer aux autres la possession d'informations qu'il ne dispose pas lui-même, ce qui lui confère la possibilité de privilégier l'interaction avec certains interlocuteurs plutôt que d'autres.

De manière plus intéressante pour nous, le fait qu'un individu possède une théorie de l'esprit l'amène à attribuer à son interlocuteur une intention communicative : cet interlocuteur possède une représentation qu'il n'a pas lui-même et tente de la lui communiquer. L'attribution de cette intention fait intervenir un postulat de rationalité : cet interlocuteur entretient une représentation qui est pour lui plausible, qui est supportée par des raisons (ou à tout le moins des causes). Dans le cas d'un dialogue entre deux interlocuteurs partageant deux conceptions différentes, ce postulat de rationalité est essentiel : grâce à lui, un locuteur sera amené 1) à

reconnaître la possibilité d'une conception alternative chez l'autre, et 2) à persévérer dans sa tentative de comprendre la conception de l'autre (qui peut employer des concepts et des présuppositions fort différents).

Nous proposons l'idée que lorsqu'un locuteur est confronté pour la première fois aux idées d'un autre lors d'une discussion, il se crée non seulement une représentation de la conception de l'autre, mais il se construit également une structure cognitive gérant la différence entre cette conception et la sienne. Autrement dit, le dialogue est une occasion de complexification conceptuelle. Ceci engendre plusieurs effets, certains nettement favorables. En utilisant notre approche, nous distinguons les effets suivants :

- L'individu, en créant une structure descriptive entre sa conception et celle qu'il attribue à son interlocuteur, vient à reconnaître que ce dernier possède une conception qui n'est pas identifiable à la sienne, sans pour autant que cette différence implique que ce locuteur soit une boîte noire indéchiffrable. La pensée de l'autre devient autre, mais tout de même connaissable. En contrepartie, cette structure descriptive lui sert à avoir une conscience plus aiguë de sa propre position, de ses présupposés, de ses spécificités.
- Par la création d'une structure explicative, la position de l'interlocuteur devient la conséquence de causes connues ou supposées. La plausibilité de sa conception ayant été expliquée (il est victime d'une « illusion » conceptuelle, perceptuelle, méthodologique, idéologique, etc.), il devient quelqu'un de compréhensible (il est déjà un peu moins étranger) et le postulat de rationalité devient partiellement satisfait : sa conception n'est pas gratuite, même si pas parfaitement rationnelle. Par le fait même de créer une telle structure explicative, l'individu positionne sa propre conception à un niveau épistémique supérieur par rapport à celle de son interlocuteur.
- Par une structure évaluative, l'individu compare les forces et faiblesses de sa position et de celle qu'il attribue à son interlocuteur. En reconnaissant des forces à la position de ce dernier, le postulat de rationalité devient au moins partiellement satisfait. De plus, l'identification de certaines faiblesses dans sa propre conception lui donne l'occasion d'y apporter des modifications. Selon Douglas Walton, la discussion critique amène un interlocuteur à renforcer certains de ses propres arguments et à abandonner certains autres, ce qui approfondit sa compréhension des bases de sa position et clarifie son engagement personnel. De plus, en devenant sensible à la position de l'autre, un interlocuteur voit mieux les limites de ses arguments et devient moins dogmatique dans sa compréhension de la question (Walton, 1992, p. 36).

Comme le paragraphe précédent le laisse entendre, les dialogues ne se limitent pas à l'exposition et la confrontation de deux conceptions préétablies et fixes. Les positions peuvent être initialement plus ou moins élaborées et ont chacune la possibilité de se construire progressivement.¹⁰⁷ Cette remarque nous permet de poursuivre dans la présentation des effets de la complexification conceptuelle :

- En se créant récit où sont représentées les transformations qu'a subies sa position (et possiblement celle de son interlocuteur), l'individu peut mieux apprécier la dynamique du dialogue, sa fertilité, l'émergence de différences, de même que leur persistance ou leur résorption. Au niveau émotif, cette structure transformative aide notamment l'individu à s'identifier à sa position (et possiblement à apprécier la formation d'une identité différente chez son interlocuteur).
- Finalement, le dialogue avec un interlocuteur ayant une conception différente de la sienne peut amener l'individu à développer une structure décisionnelle mieux définie. D'abord, l'individu peut venir à mieux apprécier le domaine de validité de sa propre conception et avoir un contrôle plus conscient sur son utilisation. De plus, il lui est également possible de conclure que la conception de son interlocuteur constitue une option davantage utile que la sienne dans certains contextes.

En somme, le dialogue donne à chacun de ses participants l'occasion d'effectuer une complexification conceptuelle, i.e. d'élaborer une riche structure cognitive faisant le pont entre leur propre conception et leur représentation de la conception de leur interlocuteur.

Le dialogue avec autrui : un outil cognitif pouvant être internalisé

Puisqu'il donne lieu à l'élaboration d'une complexification conceptuelle favorisant à la fois la compréhension des particularités de sa conception, la connaissance de ses forces et faiblesses de même que son amélioration, le dialogue avec un interlocuteur constitue en quelque sorte un outil cognitif pour l'individu. Comme l'écrivent Perelman et Olbrechts-Tyceta (1970, p. 54, §9) : « Très souvent d'ailleurs, une discussion avec autrui n'est qu'un moyen que nous utilisons pour mieux nous éclairer. »

¹⁰⁷ Comme l'écrit Elisabeth Nonnon (1996, p. 168) : « [I] existe de multiples situations, ordinaires ou philosophiques, où l'argumentation n'est pas défense rhétorique d'un point de vue déjà complètement construit, mais plutôt exploration d'un champ mal connu ou partiellement connu, pour construire, affiner ou fonder un jugement, se faire une idée de comment penser les choses, trouver sa position à leur égard. » (Nonnon, 1996, p. 68) Walton (1992, p. 112) appelle « dialogue d'enquête » les dialogues où les locuteurs ne possèdent pas de thèse initiale et partagent le but d'en établir une à partir de la discussion de prémisses.

Il est alors intéressant d'adopter une perspective vygotkienne et concevoir cet outil cognitif comme pouvant être internalisé.¹⁰⁸ Autrement dit, l'individu a la possibilité de ne plus attendre l'interaction avec un locuteur pour qu'une conception alternative agisse comme révélateur et stimulateur à l'endroit de sa propre conception : il n'a qu'à se faire l'avocat du diable et prêter lui-même vie à une conception concurrente à la sienne.

Nous retrouvons des traces de dialogues internalisés dans certains textes classiques en philosophie et en science. Le style dialogique est bien connu pour son usage par Platon et était devenu très populaire à la Renaissance (Cox, 1992). Ce style d'écriture présente un échange de vue ou d'arguments entre différents personnages. Mais il ne faut pas oublier que ce dialogue se situe d'abord à l'intérieur de l'esprit de son auteur. Pour ce dernier, ce style d'écriture est alors une occasion favorable de mettre en oeuvre ou de développer une complexification conceptuelle.

Cependant, ce ne sont pas tous les textes dialogiques qui exposent une véritable complexification conceptuelle. Une situation peu propice est lorsque l'on retrouve une inégalité marquée entre les interlocuteurs (par exemple : un maître et un élève), de telle sorte qu'il ne s'y produit pas de réelle confrontation de conceptions opposées. C'est le cas par exemple des *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Fontenelle (1687/1998). Dans cet ouvrage destiné au grand public, Fontenelle vulgarise, en y ajoutant quelques spéculations, la conception copernicienne du monde et emploie pour ce faire un dialogue entre un savant et une marquise curieuse. Dans ce dialogue, le rôle de la marquise se limite essentiellement à donner la réplique au savant, le personnage en charge de présenter cette nouvelle conception de l'univers. Dans ce contexte, le dialogue n'a comme fonction que de rendre l'exposition de la conception copernicienne plus divertissante pour le lecteur.

¹⁰⁸ Selon Vygotsky :

« An interpersonal process is transformed into an intrapersonal one. Every function in the child's cultural development appears twice: first, on the social level, and later, on the individual level; first, between people (interpsychological), and then inside the child (intrapsychological). This applies equally to voluntary attention, to logical memory, and to the formation of concepts. All the higher functions originate as actual relations between human individuals. » (Vygotsky, 1978, p. 57)

Du point de vue de cette section, la même tâche d'exposition de la vision copernicienne de l'univers est accomplie de manière beaucoup plus intéressante par Galilée dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (Galilée, 1632/2000). Ce dialogue fait intervenir trois personnages, tous situés à un niveau intellectuel comparable. Chacun de ces personnages joue un rôle important pour Galilée. Il y a d'abord Salviati, le défenseur de la théorie héliocentrique, qui est le personnage principal menant la discussion et qui est évidemment celui délégué par Galilée pour le représenter. Puis il y a Simplicio, le représentant de la tradition géocentrique aristotélicienne. Galilée fait de Simplicio un personnage extrêmement compétent dans la doctrine d'Aristote car il doit être crédible pour que les arguments de Salviati portent.

« Celui qui joue le rôle du répondant doit donc être représenté de façon charitable afin que sa défaite n'apparaisse pas comme la défaite d'un pantin, ce qui aurait effet de nuire en retour à la crédibilité des thèses soutenues par le personnage principal. » (Spranzi, 2004, p. 50)

Enfin, le troisième personnage, Sagredo, neutre celui-ci, se veut le représentant du public universel et le juge du débat dialectique sous-jacent au dialogue. C'est du fait de son absence d'affiliation à une tradition qu'il peut être considéré comme une mesure fiable de la force réelle des arguments de Salviati (Spranzi, 2004, p. 49).

Le dialogue écrit par Galilée s'est assurément inspiré de maintes discussions qu'il a pu avoir avec différents personnages réels (coperniciens, aristotéliciens ou neutres). Il n'en demeure pas moins que ce dialogue se situe d'abord dans l'esprit de Galilée et que c'est lui qui fait vivre les personnages de Salviati, Sagredo et Simplicio. Le dialogue entre ces personnages fictifs constitue un moyen pour Galilée d'organiser et d'exposer la toile complexe de ses connaissances concernant ce sujet controversé.¹⁰⁹

L'écriture d'un tel dialogue fait appel à plusieurs capacités qu'il est intéressant de mentionner. D'abord, Galilée maîtrise de toute évidence chacun des deux systèmes du monde qu'il met en opposition. Bien qu'il privilégie la conception copernicienne,

¹⁰⁹ Cette perspective sur le dialogue fictif est analogue à celle que prend Freud lorsqu'il applique la psychanalyse à la littérature :

« Le roman psychologique doit en tout point sa particularité à la tendance de l'écrivain moderne à cliver son moi, par auto-observation, en mois partiels et à personnifier en conséquence les courants conflictuels de sa vie psychique en plusieurs héros. » (Freud, cité dans Assoun, 1996, p. 42)

Galilée s'efforce d'incarner la position adverse de manière charitable, en lui reconnaissant un maximum de rationalité. Mais il ne fait pas qu'exposer les deux conceptions : les deux personnages principaux avancent arguments et contre arguments. Par exemple, un des arguments que Salviati utilise pour tenter de réfuter la supposée incorruptibilité du monde céleste se base sur l'existence de taches solaires. Simplicio rétorque alors que ce ne sont là que de petites planètes vues en contre-jour et que le phénomène ne compromet donc pas la doctrine d'Aristote. À son tour, Salviati réplique qu'il ne peut en être ainsi, car les formes des taches solaires changent lorsqu'elles s'approchent de la périphérie du Soleil, ce qui implique qu'elles sont très près de la surface du Soleil. De plus, bien que Galilée soit lui-même de l'avis de Salviati, il est en mesure d'évaluer l'impact que peut avoir ces différents arguments et contre arguments sur les défenseurs de la position adverse (Simplicio) ou encore sur des personnages neutres (Sagredo) : il a bien conscience qu'un argument peut être décisif dans le cadre d'une conception, mais secondaire du point de vue de l'autre. Il est évident que la mise en oeuvre de toutes ces habiletés nécessite ou encore favorise l'élaboration de plusieurs structures responsables de la complexification conceptuelle.

Au niveau des stratégies d'enseignement, nous savons déjà que les textes réfutatifs, qui exposent les diverses alternatives de même que les arguments et contre arguments, sont appréciés par les étudiants situés à des niveaux d'éducation élevés, du fait qu'ils leur apparaissent plus crédibles et qu'ils les outillent pour des argumentations futures (Guzzetti, Williams, Skeels, & Wu, 1997, p. 711; Hynd, 2003, p. 303). Les idées que nous venons d'émettre au sujet des dialogues (réels ou internalisés) suggèrent qu'il y a d'importants bénéfices à espérer d'une participation encore plus active des élèves à la forme dialogique : les débats, les jeux de rôle et l'écriture de dialogues ou encore de textes réfutatifs sont des occasions importantes d'élaboration d'une complexification conceptuelle.

4.3.3.3 Enseignement et complexification conceptuelle

Les trames didactiques

Les protodialogues utilisés spontanément par U1 lors des tâches de vulgarisation nous ont montré que ce sujet employait une représentation de ce que pensait son

public lorsqu'il s'imaginait en train de lui enseigner une explication vulgarisée. Dans la section précédente, nous avons tenté d'explorer la pertinence de notre approche à la complexification conceptuelle pour mieux comprendre les implications des dialogues au niveau cognitif. Dans cette section, notre objectif sera similaire en ce qui concerne l'enseignement.

L'approche par changement conceptuel développée en didactique des sciences a des conséquences immédiates au niveau de la formation des maîtres : cette dernière devrait permettre aux futurs enseignants de se familiariser avec les conceptions des élèves de même qu'avec leurs origines (Thouin, 2002), ce qui leur est nécessaire pour employer efficacement les activités de classe favorisant les changements conceptuels visés. Mais la recherche didactique sur la formation des maîtres peut aller plus loin et s'interroger sur les représentations mentales que doivent posséder les enseignants pour qu'il leur soit possible de mettre en oeuvre les différentes stratégies d'enseignement qu'ils apprennent au cours de leur formation. La bonne utilisation de ces stratégies est dépendante de la possession par ceux-ci d'une certaine conception de l'apprentissage et de l'enseignement.

La conception spontanée probablement la plus fréquente est de considérer l'esprit de l'élève comme un réceptacle vide se remplissant par un flot de connaissances émanant de l'enseignant (ou d'une autre source de connaissances), et ce de manière essentiellement cumulative (Olson & Bruner, 1996). Cette conception de l'apprentissage et de l'enseignement est fondamentalement incompatible avec l'utilisation des stratégies se basant sur la notion de changement conceptuel prônées par les didacticiens. Une conception plus sophistiquée consiste à concevoir les élèves comme de petits penseurs capables de raisonner et d'avoir des modèles plus ou moins cohérents, le rôle de l'enseignant étant celui d'un collègue devant d'abord comprendre les modèles des élèves, puis d'un consultant chargé de les aider à en construire de meilleurs (Olson & Bruner, 1996). Bien que schématique, cette conception constitue le cadre minimal nécessaire aux les enseignants pour qu'ils soient capables d'employer des stratégies favorisant les changements conceptuels.

L'hypothèse que nous désirons avancer est que la représentation mentale de la situation d'enseignement exigée par cette deuxième conception requiert chez les

enseignants une importante complexification conceptuelle. En effet, l'enseignant a besoin de se représenter mentalement les diverses conceptions initiales des élèves. Ces conceptions, avec la version du modèle scientifique qu'il souhaite voir émerger de l'activité, forment alors une pluralité qui peut être pensée en termes de complexification conceptuelle.

D'abord, l'enseignant ne peut se contenter de prendre conscience des conceptions des élèves : il doit également en faire une analyse par laquelle il aura identifié les ressemblances et les différences, plus ou moins profondes, qui existent entre les conceptions des élèves et le modèle explicatif qu'il vise. En d'autres mots, il doit établir des relations descriptives comparant les conceptions des élèves au modèle visé.

Deuxièmement, les conceptions des élèves possèdent un certain pouvoir explicatif et, bien entendu, diverses lacunes. Il est important pour l'enseignant de bien connaître les forces et faiblesses de chaque conception en jeu, en particulier s'il désire recourir à des stratégies basées sur le conflit cognitif. Il est donc impératif qu'il se dote de structures évaluatives par lesquelles est comparé le pouvoir explicatif de chaque conception.

Puis, il doit s'interroger sur l'origine des conceptions des élèves. Ces conceptions peuvent prendre racines dans le langage courant, dans l'expérience quotidienne, ou être dues à des présuppositions, des intuitions, etc. Ces conceptions ne sont pas gratuites : elles ont des causes. L'enseignant doit émettre des hypothèses sur les causes de ces conceptions et ainsi expliquer leur présence chez les élèves. Ces hypothèses sont assimilables à ce que nous avons appelé les structures explicatives.

Quatrièmement, nous avançons que pour penser son enseignement, l'enseignant doit élaborer une structure transformative, ici d'ordre didactique. Comme nous le suggérons au chapitre 3, cette structure incarne un récit par lequel est raconté comment l'on passe d'une conception à l'autre. Nous aimerions suggérer ici que par une telle structure transformative constitue une trame didactique, où l'enseignant se représente les transformations qui sont opérées sur la conception de l'élève à l'occasion de la séquence d'enseignement qu'il envisage. Les principes à la base de cette trame sont les principes didactiques que l'enseignant aura intégrés lors de sa formation et qu'il tentera d'utiliser pour préparer sa séquence. Par exemple, s'il

emploie une stratégie d'enseignement magistral purement expositif et transmissif, un enseignant n'aura en fait besoin d'élaborer qu'une trame assez simple où les conceptions initiales des élèves ne sont pas prises en compte, alors qu'un enseignant planifiant d'employer une stratégie basée sur le conflit cognitif doit élaborer une trame didactique plus complexe où sont représentées les conceptions des élèves et où des contre-exemples servent à provoquer le dépassement d'obstacles conceptuels préalablement identifiés. De plus, la trame que se construit un enseignant peut mettre en valeur des émotions cognitives, qu'il tentera alors de faire vivre à ses élèves lors de l'activité en classe.

Finalement, lorsque l'enseignant se donne comme objectif l'atteinte d'un modèle explicatif, il fait nécessairement un choix : il sélectionne un niveau de formulation qui est approprié aux capacités des élèves et aux contraintes de la situation, par exemple en effectuant une évaluation coût-bénéfices, ou encore en se référant à ce que ses collègues font ou à ce que d'autres références lui suggèrent (i.e. en tirant la solution d'un répertoire déjà constitué). Ce choix du modèle visé, tout comme dans le cas des tâches de vulgarisation, est opéré par une structure décisionnelle.

Certains pourraient penser que la complexification conceptuelle constitue un aspect de l'apprentissage des sciences trop avancé pour qu'on puisse le retrouver au niveau primaire, voire même secondaire. Nous serions en désaccord avec une telle affirmation, mais sa réfutation exigerait de notre part une recherche empirique. Nous espérons cependant que les paragraphes précédents aient clairement montré que la notion de complexification conceptuelle est essentielle en didactique des sciences, ne serait-ce que par le biais de la formation des maîtres.¹¹⁰

¹¹⁰ D'ailleurs, la complexification conceptuelle touche la formation des maîtres à un autre niveau qu'il serait intéressant d'étudier : les enseignants peuvent posséder simultanément plusieurs conceptions de ce que sont l'apprentissage et l'enseignement. Par exemple, la conception du vase vide qu'il s'agit de remplir peut coexister avec celle plus sophistiquée selon laquelle les élèves construisent progressivement leurs connaissances par un dépassement plus ou moins difficile de leurs conceptions initiales. (D'autres conceptions de l'apprentissage et de l'enseignement pourraient également s'ajouter à celles-ci.) Chacune de ces conceptions pourraient alors posséder un contexte de pertinence qui justifierait leur préservation par les enseignants. Voilà un exemple supplémentaire montrant que notre modèle de complexification conceptuelle ne se limite pas qu'à l'apprentissage des sciences de la nature.

L'aspect bénéfique de l'enseignement et du tutorat

Cette application de la notion de complexification conceptuelle aux conditions de possibilité de l'utilisation de stratégies d'enseignement sophistiquées par les enseignants nous permet d'apprécier d'un nouvel oeil l'un des plus vieux dictons pédagogiques. Dans ses *Lettres à Lucilius*, Sénèque écrit que « les hommes, lorsqu'ils enseignent, s'instruisent » (« *homines, dum docent, discunt* » [lettre 7, §8], expression qui a été reprise sous la forme mieux connue « *docendo discimus* »). Comenius, le premier grand pédagogue moderne, a commenté ainsi ce proverbe au 17^e siècle :

« Le dicton qui affirme que celui qui enseigne aux autres s'instruit lui-même dit vrai, non seulement parce qu'une répétition constante inscrit le fait de manière indélébile dans la mémoire, mais aussi parce qu'en enseignant on acquiert une compréhension plus profonde de la matière enseignée. » (Comenius, 1632/1967, pp. 156-157)

Les quelques paragraphes qui précèdent peuvent nous donner une idée plus précise de la façon dont est obtenue cette compréhension accrue. L'acte d'enseigner, et surtout lorsqu'il s'efforce de prendre en compte la pensée des élèves, contraint l'enseignant à se constituer une trame didactique. Au sein de cette trame, le contraste entre la pensée des élèves et le modèle scientifique visé devient pleinement maîtrisé : il est pensé, soupesé, analysé, découpé, ordonné, délibérément gommé ou amplifié, etc. La trame est l'outil de gestion de ce contraste, et cette gestion est nécessaire puisque l'objectif de l'enseignant est justement de tracer un chemin optimal parmi ces différences conceptuelles. Cette trame n'a par ailleurs aucune garantie d'être entièrement détaillée, ni même efficace, lorsqu'elle est traduite pour la première fois dans un acte d'enseignement. L'expérience donne alors une rétroaction qui suggère à l'enseignant des améliorations à la trame et à ses constituants. Dans notre perspective, c'est en quoi l'enseignement aide à l'acquisition d'une compréhension profonde d'un sujet.¹¹¹

Au niveau des activités d'apprentissage, ces remarques sur la relation étroite entre enseignement et complexification conceptuelle nous aident également à mieux

¹¹¹ Cette exigeante contrainte qu'impose l'enseignement à la compréhension peut d'ailleurs s'avérer créatrice. Nous savons pas exemple que Mendeleïev a eu l'idée de classer les éléments chimiques à l'aide d'un tableau alors qu'il s'efforçait de trouver une façon efficace de les présenter dans le manuel de chimie qu'il était en train d'élaborer (Graham, 1993).

apprécier les activités de tutorat, où un élève doit lui-même jouer le rôle d'enseignant auprès d'autres élèves. Plusieurs chercheurs ont étudié ce type d'activité et ont suggéré que le tutorat était dans certains cas bénéfique pour le tuteur lui-même :

« Tutors use verbal explanations to communicate key ideas, principles, and relationships and to correct tutee mistakes and misconceptions. [...] Not surprisingly, the richness of explaining has led many to hypothesize that it contributes to tutor learning. » (Roscoe & Chi, à paraître)

Nous pensons que notre modèle de complexification conceptuelle pourrait constituer un cadre théorique intéressant pour étudier la base cognitive des phénomènes d'enseignement, que ce soit chez les enseignants ou les élèves.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION

5.1 RETOUR SUR LE MODÈLE

5.1.1 Résumé du volet théorique

Cette thèse a été consacrée à l'étude d'un phénomène d'apprentissage qui nous apparaît encore méconnu à l'heure actuelle : la possibilité d'acquérir plus d'une explication sur un même sujet. Nous nous sommes intéressé à ce phénomène suite à l'examen de deux volets plutôt indépendants au sein de la recherche didactique.

D'abord, la didactique de la mécanique quantique nous a semblé poser une série de questions sur un thème central : la relation existante entre mécanique classique et mécanique quantique. Au niveau de l'apprentissage, le fait que les étudiants confondent souvent les deux mécaniques doit être vu comme étant révélateur de la difficulté qu'il y a à s'approprier leur distinction. Se pose la question à savoir en quoi consiste cette distinction, ceci devenant par la suite un objectif d'apprentissage en soi. Seulement alors pourrions-nous espérer proposer des séquences d'enseignement adaptées à ce nouvel objectif.

Nous avons également retrouvé le phénomène des conceptions multiples dans la littérature sur le changement conceptuel. En effet, bien que les modèles de changement conceptuel aient souvent employé une terminologie qui faisait implicitement référence au remplacement des conceptions initiales des élèves par les conceptions scientifiques, plusieurs chercheurs ont remarqué que, bien souvent, ces conceptions initiales n'étaient pas éradiquées. Au contraire, elles resteraient l'une des possibilités conceptuelles à la disposition des élèves et garderaient leur pertinence dans certains contextes. Nous avons d'ailleurs présenté trois modèles portant spécifiquement sur ce phénomène (Solomon, Larochelle et Désautels, Mortimer). Nous pensons cependant que ces diverses contributions ne font pas justice à un aspect crucial de ce phénomène d'apprentissage.

En nous inspirant de diverses pistes identifiées dans la littérature didactique et épistémologique, nous avons développé l'idée que les conceptions alternatives pouvaient, sans que cela soit nécessaire, être reliées entre elles de diverses façons. En effet, le phénomène des conceptions multiples ne se limite pas à la possession d'une

pluralité de conceptions isolées dans la mémoire : l'apprenant a également la possibilité de se construire des structures cognitives servant d'intermédiaires entre ces conceptions. En ce sens, nous nous sommes fortement opposés aux modèles qui postulaient d'emblée une séparation de l'activité cognitive en différentes zones, chacune chapeautant une conception. Bien qu'attrayante, cette approche a le défaut d'isoler les conceptions au niveau de leur contenu (par exemple dans des mondes de signification autonomes auxquels on accède ou dont on sort par sauts) ou encore au niveau de leur valeur (par exemple dans des jeux de la connaissance ne pouvant être comparés).

Nous pensons que l'apprenant peut faire bien davantage : il peut se créer une structure cognitive intermédiaire riche à la fois en termes de signification, d'évaluation, de compréhension et d'utilisation. Lorsqu'une telle structure intermédiaire est élaborée, la pensée de l'apprenant n'est plus constituée d'îlots isolés et concurrents, mais forme plutôt une toile où les alternatives s'éclairent l'une l'autre et s'organisent asymétriquement de diverses façons. La pensée devient alors un complexe de compréhensions qui, même s'il n'a plus de centre unique, possède tout de même un relief.

Nous avons proposé que cette complexification conceptuelle s'élabore à l'aide de plusieurs types de structures intermédiaires. Les structures descriptives sont responsables de l'identification de ressemblances et de différences entre les conceptions alternatives. Sans de telles structures, ces alternatives sont tout simplement confondues ou encore confinées à des mondes de signification isolés. À l'aide des structures évaluatives, les performances épistémiques des conceptions alternatives sont systématiquement comparées, ce qui provoque une hiérarchisation entre les conceptions. Ces structures jouent un rôle élémentaire dans la complexification conceptuelle puisqu'elles sont à la base de la gestion de la différence entre les deux alternatives : grâce à elles, les alternatives deviennent réellement des alternatives, différentes tant au niveau de leur contenu que de leur efficacité. Mais en plus de gérer cette différence, ces structures ont un effet positif pour chacune des conceptions reliées : les structures descriptives favorisent l'appropriation consciente et la rétention du contenu de chacune des conceptions, et

les structures évaluatives aident à l'explicitation des forces et des faiblesses de ces conceptions.

Deux types de structures oeuvrant dans une perspective davantage métacognitives sont également possibles. Par ces structures, la multiplicité des conceptions est prise elle-même comme objet recevant explication. D'abord, l'apprenant peut élaborer des structures explicatives, par lesquelles la plausibilité ou l'attrait d'une conception jugée épistémiquement inférieure est expliqué par diverses causes : perceptuelles, conceptuelles, méthodologiques, présence de biais. Il peut de plus se construire une sorte de récit au sein duquel est représentée une série de transformations opérées sur une conception menant à l'atteinte de la conception jugée supérieure. Au sein de ce récit génétique, des obstacles peuvent être franchis, appuyés par des raisons, selon une dynamique qui possède une certaine rationalité et qui peut susciter diverses émotions cognitives. Il est important de souligner que l'asymétrie intrinsèque de ces explications causales et de ces récits contribue fortement à étayer la hiérarchisation des conceptions et constitue donc une ressource importante pour gérer l'existence d'une pluralité d'alternatives.

Enfin, toute référence à une pluralité de conceptions alternatives soulève immédiatement la question de leur utilisation. Certaines alternatives n'ont qu'une utilité psychologique et ne seront jamais employées pour résoudre des problèmes. Dans d'autres cas, chaque alternative est susceptible d'être utilisée, une structure décisionnelle devant alors être élaborée pour être responsable de la sélection de l'une ou l'autre des alternatives possibles. Idéalement, cette structure décisionnelle mettrait en oeuvre un processus complexe d'évaluation coûts-bénéfices. Mais en pratique, diverses heuristiques plus ou moins justifiées peuvent être employées (signaux terminologiques, sociologiques ou conceptuels) dans les situations qui leurs donnent prise.

Nous proposons donc qu'il est possible de faire appel à une gamme variée de structures cognitives intermédiaires afin de gérer la présence d'une pluralité de conceptions concurrentes au sein de la mémoire. L'élaboration de ces structures cognitives requiert certainement un important travail intellectuel et constitue à notre avis un des volets importants de la maîtrise d'un domaine. Nous pensons cependant

que ces structures sont acquises de manière progressive et qu'au moins certaines peuvent être partiellement développées assez tôt dans la formation aux sciences.

5.1.2 Résumé du volet empirique

Par une recherche empirique exploratoire, nous avons tenté d'approfondir notre compréhension des structures décisionnelles, l'aspect probablement le plus méconnu de la complexification conceptuelle. Pour ce faire, nous avons soumis deux types de tâches à un petit nombre de sujets collégiaux et universitaires. L'analyse des tâches de vulgarisation a révélé que les sujets ont choisi l'explication qu'ils ont offerte à leur public fictif en tenant compte des caractéristiques de ce public, celles de la situation et celles des explications elles-mêmes. Les sujets ont donc semblé employer une stratégie coûts-bénéfices. Lors de la tâche des doubles fentes avec les électrons, les sujets ont par contre employé un critère conceptuel pour décider de la pertinence des mécaniques quantique et classique. Pressés de dépasser le critère microscopique/macroscopique plutôt vague, les sujets ont formulé un critère plus précis (erroné dans le cas des sujets collégiaux, valide ou partiellement valide dans le cas des sujets universitaires en physique).

Il a été rassurant de voir que les résultats de cette recherche empirique ont été compatibles avec le modèle de complexification que nous avons proposé au chapitre 3. Mais cette recherche n'eut qu'un succès partiel en ce qui concerne sa fonction exploratoire : bien que les tâches employées furent pertinentes pour l'étude des structures décisionnelles, le matériel recueilli ne fut pas assez riche (du fait de l'envergure limitée de la recherche) pour développer de nouvelles hypothèses. Par contre, certains passages des entrevues nous ont fait entrevoir l'intérêt d'explorer d'autres aspects relatifs à la complexification conceptuelle : l'utilisation de la notion de vérité dans le contexte d'une multiplicité de conceptions, puis le rôle des dialogues et de l'enseignement dans le développement d'une complexification conceptuelle. Nous pouvons donc conclure que le volet empirique de notre recherche s'est avéré fertile, bien que les fruits ne soient pas apparus là où ils étaient attendus.

5.1.3 Statut du modèle proposé

Rappel de la position épistémologique adoptée

Afin de préciser le statut que nous accordons à notre modèle de complexification, il est utile de rappeler notre position épistémologique (section 2.1.4.4). Nous adhérons à une épistémologie rationaliste critique (plus précisément correctionniste), selon laquelle la raison, par son activité critique, a la capacité d'améliorer les connaissances en identifiant puis corrigeant ses lacunes. Il s'ensuit qu'il nous est possible par de telles corrections de produire de meilleures connaissances.

Sur la question du réalisme, nous adoptons au niveau épistémologique un réalisme minimal et un antiréalisme, mais toutefois un réalisme méthodologique fallibiliste au niveau de la pratique scientifique. Autrement dit, à niveau de la pratique, nous reconnaissons que la recherche en science a comme objectif de produire des connaissances qui correspondent avec la réalité, sans jamais cependant pouvoir prétendre à l'atteindre une vérité définitive. Un tel réalisme méthodologique couplé à un faillibilisme fait en sorte que l'activité scientifique ne sera jamais parfaitement satisfaite des connaissances qu'elle aura produites et envisagera toujours la poursuite de leur développement. Au niveau épistémologique, nous reconnaissons cependant que le réalisme peut être critiqué, et qu'il est suffisant, pour comprendre le progrès cognitif, d'adopter un réalisme minimal (il existe un monde extérieur) et un antiréalisme envers les énoncés explicatifs et justificatifs (ce sont des instruments dont nous nous dotons pour interagir efficacement avec le monde).

Relativement à notre modèle de complexification conceptuelle, notre réalisme méthodologique signifie que nous avons tenté par ce dernier de révéler une facette de la réalité de la cognition humaine. De plus, nous considérons notre modèle corrige certaines lacunes identifiées dans des modèles antérieurs et qu'il constitue ainsi un progrès par rapport à ceux-ci. Notre modèle n'est cependant pas définitif : des critiques pourront lui être faites et il nous apparaît certain qu'une alternative plus consistante lui sera éventuellement préférable.

Statut du modèle face aux contributions de la littérature

Nous avons abordé le phénomène des conceptions multiples à partir du programme de recherche sur le changement conceptuel, puisque c'est de ce domaine que proviennent le plus de contributions en didactique des sciences. Mais il n'y a qu'un recoupement partiel entre les deux problématiques. Les modèles de changement conceptuel s'efforcent de caractériser les conceptions des élèves et de comprendre leur difficile métamorphose vers des conceptions scientifiques. Les modèles et autres contributions au sujet des conceptions multiples visent plutôt à comprendre comment fonctionne cette multiplicité, et, si leur ambition est plus grande, comment celle-ci est acquise. Même s'ils sont proches parents, les deux projets sont différents. C'est pourquoi nous considérons que notre modèle n'est pas en opposition avec les modèles de changement conceptuel, mais plutôt qu'il entretient une relation de complémentarité avec ceux-ci.

La relation entre notre modèle et les autres contributions de la littérature portant sur les conceptions multiples est évidemment différente. Nous avons d'abord souligné notre rejet des approches isolationnistes, que ce soit au niveau sémantique (comme on retrouve par exemple dans le modèle de Solomon) ou au niveau épistémologique (par exemple dans le modèle de Larochelle et Désautels). En proposant diverses structures, nous avons tenté de montrer comment cet isolement pouvait être dépassé jusqu'à l'obtention d'un complexe de conceptions, riche tant au niveau cognitif que métacognitif. En revanche, de nombreux aspects des structures descriptives, évaluatives, explicatives, transformatives et décisionnelles nous ont été suggérés par la littérature en didactique des sciences et en épistémologie. Relativement à ces contributions, notre modèle doit donc être vu comme une tentative de synthèse.

Limite et portée du modèle

Dans sa forme actuelle, le modèle que nous proposons possède des limites qu'il est nécessaire de rendre explicites. Rappelons d'abord que nous avons adopté une approche fonctionnaliste pour catégoriser les structures cognitives pouvant gérer la multiplicité des conceptions. Nous ne prétendons pas exposer la nature ontologique de ces structures, seulement trouver un moyen fertile de représenter la richesse de ce

que notre appareil cognitif peut parvenir à faire pour jongler efficacement avec une multiplicité de conceptions alternatives. Il est toutefois fort possible que puissent être proposées des distinctions plus fondamentales sur la façon dont nous nous y prenons pour gérer cette multiplicité.

De plus, nous n'avons pas abordé systématiquement la question de l'acquisition des structures cognitives que nous avons proposées, question à laquelle que devrait pourtant répondre tout modèle prétendant expliquer l'apprentissage des sciences. Nous sommes en quelque sorte limité à des hypothèses existentielles, par surcroît potentielles : nous avons suggéré des façons dont il était *possible* de composer avec une pluralité de conceptions. Nous n'avons pas traité les deux questions suivantes : À quel niveau de formation la capacité de créer ces structures se concrétise-t-elle (si elle le fait) ? Comment se produit alors le développement de ces structures ? Il s'agit là non d'un oubli mais d'un choix : le traitement de ces questions aurait constitué un objectif trop ambitieux pour l'envergure que nous pouvions donner à cette thèse. Nous effectuons ainsi un constat d'incomplétude à l'endroit de notre modèle.

Une limite plus inhérente à notre approche réside dans le fait que notre modèle ne concerne que les conceptions auxquelles nous avons un accès conscient. Une conception strictement intuitive ne peut, par définition, participer aux structures descriptives, évaluatives, explicatives et transformatives. Sa coexistence avec une conception explicite ne peut alors engendrer une complexification conceptuelle que dans un sens faible : il y a une pluralité de conceptions, mais celles-ci ne font pas l'objet d'un effort d'intégration au sein d'un tout plus riche que la somme de ses parties. Cette limite mériterait certainement de recevoir davantage d'attention.

Finalement, sur une note positive, remarquons que le domaine d'applicabilité de notre modèle ne se limite pas à l'apprentissage des sciences naturelles. En effet, nous pensons qu'il possède au moins une aussi grande pertinence envers l'apprentissage des sciences humaines (dont les sciences de l'éducation) et de la philosophie.

5.2 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Dans cette recherche, nous avons approché la notion de complexification conceptuelle à partir du programme de recherche sur le changement conceptuel. Cette

notion, au sens où nous l'entendons, aurait pu être étudiée à partir de plusieurs autres secteurs importants de la didactique. Nous aimerions, pour conclure, rappeler quelques-uns de ces thèmes et proposer qu'il serait intéressant de voir ce que notre modèle de complexification conceptuelle nous permettrait d'y voir de neuf.

1. L'expertise conceptuelle. D'abord, comme nous l'avons mentionné déjà à quelques reprises, une complexification conceptuelle élaborée ne peut être le fruit que d'un important travail intellectuel, la maîtrise résultante pouvant alors être vue comme une des facettes de l'expertise. Dans cette optique, il serait intéressant d'essayer de déterminer comment la complexification conceptuelle se trouve reliée aux autres facettes de l'expertise identifiées dans la littérature.

2. La résolution de problèmes. Par les structures décisionnelles, nous avons abordé directement le sujet de la résolution des problèmes en science. Nous avons proposé diverses stratégies par lesquelles une conception pouvait être activée plutôt qu'une de ses alternatives. Nous avons repris la distinction entre problèmes fermés et ouverts et suggéré que ces deux contextes pouvaient solliciter différentes stratégies d'activation. Pour mieux comprendre les structures décisionnelles, il nous apparaît essentiel d'utiliser notre modèle pour jeter un regard neuf sur les processus de résolution de problèmes.

3. L'utilisation de représentations externes. Bien que cet aspect n'ait pas été mentionné dans notre recherche, il serait de toute évidence pertinent d'examiner comment le développement d'une complexification conceptuelle peut être favorisé, voire même permis, par l'utilisation de représentations externes (schémas, tableaux, etc.). Ces représentations permettent de pallier les limites de la mémoire de travail, grandement sollicitée lors de l'élaboration des différentes structures à la base de la complexification conceptuelle.

4. L'histoire des sciences. Nous n'avons pas abordé directement l'histoire des sciences dans cette recherche, mais il est évident que l'apprentissage d'une ancienne façon de voir le monde implique une complexification conceptuelle plus ou moins sophistiquée (notamment en ce qui concerne les structures transformatives). En suggérant l'existence de plusieurs effets bénéfiques à la complexification conceptuelle, nous avons donc offert un plaidoyer psychologique en faveur d'une plus

grande inclusion de l'histoire des sciences dans le curriculum. À ce sujet, il serait intéressant d'employer notre modèle comme cadre d'analyse dans l'élaboration et l'évaluation de séquences d'enseignement basées sur l'inclusion de l'histoire des sciences.

5. Les pseudosciences. De nombreuses théories à l'apparence scientifique mais rejetées par la communauté scientifique ont meublé et meublent encore notre culture. La présentation de ces pseudosciences en classe est justifiée dans la mesure où elles font partie intégrante d'une saine culture scientifique (prise au sens large). Comme dans le cas des théories scientifiques passées, la présentation de ces théories pseudoscientifiques représente une occasion de complexification conceptuelle porteuse de bénéfices. D'abord, par la formation de structures descriptives et évaluatives, la compréhension des présupposés à la base de l'activité scientifique se trouve améliorée. Mais cette présentation donne également l'occasion de pratiquer l'élaboration de structures explicatives pertinentes et sophistiquées, faisant appel à des connaissances métacognitives. Cette capacité à élaborer des structures explicatives constitue une composante essentielle de la pensée critique dont le développement doit être encouragé, notamment par la rencontre de cas concrets. La relation entre complexification conceptuelle, pensée critique et utilisation des pseudosciences mérite certainement d'être précisée.

6. La sophistication épistémologique. Nous avons suggéré que les structures transformatives pouvaient incarner une certaine rationalité, une certaine conception du progrès cognitif. Par exemple, une structure correctionniste (faisant intervenir une suite de corrections plus ou moins profondes) est plus continue qu'une structure poppérienne (où il n'y a qu'une série de renversements) mais moins qu'une structure cumulativiste (où on ne fait qu'ajouter de nouvelles connaissances). Il serait intéressant d'étudier empiriquement la façon dont l'élaboration de structures transformatives détaillées influence, et est influencée, par les conceptions épistémologiques des étudiants. Il s'agit là, selon nous, d'un important facteur dans le développement de ces conceptions. De plus, toujours sous le thème de l'épistémologie, nous avons vu que l'existence d'une pluralité d'explications dans les tâches de vulgarisation fournit un contexte intéressant pour l'étude de la notion de vérité employée par les étudiants.

7. Les émotions cognitives. Nous avons également avancé l'idée que les structures pouvaient incarner aussi certaines émotions cognitives. Puisqu'elle représente une dynamique d'idées, une structure transformative donnerait accès à la possibilité de ressentir et de conserver en mémoire des émotions telles la surprise, la joie, l'insécurité, la satisfaction, la déception, etc., et ce, dans un contexte d'apprentissage (par opposition à un contexte de découverte). Nous pouvons concevoir ces émotions complexes comme formant l'un des volets de l'expertise permise par la complexification conceptuelle. De manière générale, les émotions cognitives représentent un thème insuffisamment exploré par la recherche didactique, et la complexification conceptuelle semble représenter un contexte fort pertinent pour leur étude éventuelle.

8. Les dialogues et les argumentations. Les réflexions d'ordre sociocognitif avancées à la fin du dernier chapitre sont également à approfondir. Il serait en effet intéressant d'étudier à l'aide de notre modèle les nombreuses activités qui favorisent l'élaboration d'une représentation de la conception d'autrui. On retrouve parmi ces activités la lecture ou l'écriture de textes réfutatifs, les discussions de groupe, les jeux de rôles, etc.

9. L'enseignement. L'enseignement représente un type particulier d'activité sociocognitive. Les stratégies d'enseignement contemporaines sont souvent basées sur une connaissance, de la part de l'enseignant, des conceptions initialement possédées par les élèves. Nous avons suggéré que l'utilisation de ces stratégies exige que l'enseignant effectue lui-même une complexification conceptuelle, par laquelle est géré l'écart entre les conceptions initiales et la conception scientifique visée. Il serait intéressant d'employer notre modèle de complexification pour éclairer ce que les enseignants ont réellement en tête au moment d'appliquer les stratégies qui leur sont enseignées dans leur formation. De plus, puisque l'enseignement peut favoriser le développement d'une complexification conceptuelle bénéfique pour l'enseignant, notre modèle pourrait permettre de mieux comprendre les effets des activités de tutorat sur le tuteur.

10. La didactique des autres disciplines. Finalement, nous avons mentionné que le domaine d'application de notre modèle dépassait le cadre de l'apprentissage des sciences naturelles pour toucher avec autant de pertinence l'apprentissage des disciplines telles l'histoire, l'économie, la psychologie, la sociologie, la philosophie, etc. Les didactiques des mathématiques et des sciences naturelles ont été historiquement les premières à se constituer, et représentent à ce titre un réservoir d'idées susceptibles d'être transférées vers les didactiques des autres disciplines. Notre modèle de complexification nous apparaît en ce sens facilement transférable, mais devra évidemment être adapté aux particularités de ces autres didactiques.

De nos jours, toute personne éduquée et informée vit au sein d'un luxuriant marché d'idées, où à peu près n'importe quel phénomène se voit expliqué de plusieurs manières. Le fait qu'une de ces conceptions (celle dite scientifique) soit davantage valorisée peut amener plus d'un enseignant ou plus d'un didacticien à négliger l'intérêt de ses alternatives. Les paragraphes précédents suggèrent au contraire qu'il serait pertinent de revisiter de nombreux thèmes en didactique en se demandant chaque fois ce qu'exige et ce que permet la maîtrise d'une pluralité d'alternatives. Pour ce faire, nous croyons que le modèle de complexification conceptuelle que nous avons proposé dans cette thèse constitue un cadre théorique prometteur.

RÉFÉRENCES

- Alcock, J. (1985). Parapsychology as a "spiritual" science. In P. Kurtz (Ed.), *A skeptic's handbook of parapsychology* (pp. 537-565). Buffalo: Prometheus Books.
- Alcock, J. (1989). *Parapsychologie : science ou magie ?* Paris: Flammarion.
- Alcock, J. (2003). Give the null hypothesis a chance. In J. Alcock, J. Burns & A. Freeman (Eds.), *Psi wars* (pp. 29-50). Charlottesville: Imprint Academic.
- Alexander, P. A., Schallert, D. L., & Hare, V. C. (1991). Coming to terms: how researchers in learning and literacy talk about knowledge. *Review of Educational Research*, 61(3), 315-343.
- Ambrose, B. S., Shaffer, P. S., Steinberg, R. N., & McDermott, L. C. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), 146-155.
- Arcà, M., & Caravita, S. (1993). Le constructivisme ne résout pas tous les problèmes. *Aster*, 16(1), 78-101.
- Assoun, P.-L. (1996). *Littérature et psychanalyse : Freud et la création littéraire*. Paris: Ellipses.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y., & Toussaint, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Astolfi, J.-P., & Develay, M. (2002). *La didactique des sciences* (6e éd.). Paris: Presses Universitaires de France.
- Astolfi, J.-P., & Peterfalvi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, 16(1), 103-141.
- Astolfi, J.-P., & Peterfalvi, B. (1997). Stratégies de travail des obstacles : dispositifs et ressorts. *Aster*, 25, 193-216.
- Atran, S. (2002). *In God we trust*. Oxford: Oxford University Press.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Bachelard, G. (1934/1999). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bachelard, G. (1938/1999). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Bachelard, G. (1940/2002). *La philosophie du non* (5 éd.). Paris: Presses Universitaires de France.
- Bacon, F. (1620/2000). *The New Organon*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baillargeon, R. (2002). The acquisition of knowledge in infancy: a summuray in eight lessons. In U. Goswami (Ed.), *Blackwell handbook of childhood cognitive development* (pp. 47-83). Malden: Blackwell.
- Bao, L., & Redish, E. (2002). Understanding probabilistic interpretations of physical systems: a prerequisite to learning quantum physics. *American Journal of Physics*, 70(3), 210-216.

- Bélanger, M., Roussin, D., & Varin, C. (2006). Changements conceptuels et compétences transversales en sciences et en philosophie. In *Actes du 26e colloque de l'AQPC* (pp. 249-259). Montréal: AQPC.
- Bereiter, C., & Scardamalia, M. (1986). Cognitive coping strategies and the problem of "inert knowledge". In S. F. Chipman, J. W. Segal & R. Glaser (Eds.), *Thinking and learning skills* (Vol. 2, pp. 65-80). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Association.
- Bereiter, C., & Scardamalia, M. (1989). Intentional learning as a goal of instruction. In L. B. Resnick (Ed.), *Knowing, learning, and instruction: Essays in honor of Robert Glaser* (pp. 361-392). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bishop, B. A., & Anderson, C. W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(5), 415-427.
- Boyer, P. (2001). *Et l'homme créa les dieux*. Paris: Robert Laffont.
- Brewer, W. F., Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (1998). Explanation in scientists and children. *Minds and Machines*, 8, 119-136.
- Brown, J. R. (2001). *Who rules in science?* Cambridge: Harvard University Press.
- Brumby, M. (1984). Misconceptions about the concept of natural selection by medical biology students. *Science Education*, 68(4), 493-503.
- Bruner, J. (2002). *Making stories: law, literature, life*. Cambridge: Harvard University Press.
- Brush, S. G. (1974). Should the history of science be rated X? *Science*, 183, 1164-1172.
- Burbules, N. C. (2000). Moving beyond the impasse. In D. C. Phillips (Ed.), *Constructivism in education* (pp. 308-330). Chicago: NSSE.
- Campanario, J. M. (2002). The parallelism between scientists' and students' resistance to new scientific ideas. *International Journal of Science Education*, 24(10), 1095-1110.
- Caravita, S., & Halldén, O. (1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 89-111.
- Carey, S. (1999). Sources of conceptual change. In E. K. Scholnick, K. Nelson, S. A. Gelman & P. Miller (Eds.), *Conceptual development: Piaget's legacy* (pp. 293-326). Hillsdale: Erlbaum.
- Carey, S., & Spelke, E. (1994). Domain-specific knowledge and conceptual change. In L. A. Hirschfeld & S. A. Gelman (Eds.), *Mapping the mind* (pp. 169-200). Cambridge: Cambridge University Press.
- Carrier, M. (2001). Changing laws and shifting concepts. In P. Hoyningen-Huene & H. Sankey (Eds.), *Incommensurability and related matters* (pp. 65-90). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Case, R. (1996). Changing views of knowledge and their impact on education research and practice. In D. R. Olson & N. Torrance (Eds.), *Handbook of education and human development: new models of learning, teaching and schooling* (pp. 75-99). Cambridge: Blackwell.

- Caverni, J.-P. (1988). *Psychologie cognitive: modèles et méthodes*. Grenoble: Presse Universitaire de Grenoble.
- Chaiken, S. (1980). Heuristic versus systematic information processing and the use of source versus message cues in persuasion. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39, 752-766.
- Champagne, A. B., Klopfer, L. E., & Anderson, J. H. (1980). Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, 48, 1074-1079.
- Charlot, B. (1997). *Du rapport au savoir*. Paris: Anthropos.
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: examples from learning and discovery in science. In R. N. Giere (Ed.), *Cognitive models of science* (pp. 129-186). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Chi, M. T. H. (1997). Creativity: shifting across ontological categories flexibly. In T. B. Ward, S. M. Smith & J. Vaid (Eds.), *Creative thought: an investigation of conceptual structures and processes* (pp. 209-234). Washington, DC: American Psychological Association.
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences*, 14(2), 161-199.
- Chi, M. T. H. (2008). Three types of conceptual change: belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 61-82). New York: Routledge.
- Chi, M. T. H., & Ohlsson, S. (2005). Complex declarative learning. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Eds.), *Cambridge handbook of thinking and reasoning* (pp. 371-396). New York: Cambridge University Press.
- Chi, M. T. H., & Roscoe, R. D. (2002). The processes and challenges of conceptual change. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 3-27). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Chi, M. T. H., Slotta, J. D., & de Leeuw, N. (1994). From things to process: a theory of conceptual change for learning science content. *Learning and Instruction*, 4, 27-43.
- Chinn, C. A. (2006). The microgenetic method: current work and extensions to classroom research. In J. L. Green, G. Camilli & P. B. Elmore (Eds.), *Handbook of complementary methods in education research* (pp. 439-456). Mahwah: AERA.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition. A theoretical framework and implications for science instruction. *Review of Educational Research*, 61(1), 1-50.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1998a). An empirical test of a taxonomy of responses to anomalous data in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(6), 623-654.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1998b). Theories of knowledge acquisition. In B. J. Fraser & K. G. Tobin (Eds.), *International handbook of science education* (pp. 97-113). Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.

- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (2001). Models of data: a theory of how people evaluate data. *Cognition and Instruction, 19*(3), 323-393.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Children's responses to anomalous scientific data: how is conceptual change impeded? *Journal of Educational Psychology, 19*, 327-343.
- Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (2001). Distinguishing between understanding and belief. *Theory Into Practice, 40*(4), 235-241.
- Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (2008). Learning to use scientific models: multiple dimensions of conceptual change. In R. A. Duschl & R. E. Grandy (Eds.), *Teaching scientific inquiry* (pp. 191-225). Rotterdam: Sense Publishers.
- Claxton, G. (1993). Minitheories: a preliminary model for learning science. In P. J. Black & A. M. Lucas (Eds.), *Children's informal ideas in science* (pp. 45-61). London: Routledge.
- Clement, J. (1983). A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 325-339). Hillsdale: Lawrence Earlbaum Associates.
- Clement, J. (1989). Not all preconceptions are misconceptions: finding 'anchoring conceptions' for grounding instruction on students' intuition. *International Journal of Science Education, 11*, 554-565.
- Clément, P. (1994). Représentations, conceptions, connaissances. In A. Giordan, Y. Girault & P. Clément (Eds.), *Conceptions et connaissances* (pp. 15-45). Bernes: Peter Lang.
- Cobern, W. W. (1996). Worldview theory and conceptual change in science education. *Science Education, 80*(5), 579-610.
- Coll, R. K., France, B., & Taylor, I. (2005). The role of models/and analogies in science education: implications from research. *International Journal of Science Education, 27*(2), 183-198.
- Coll, R. K., & Treagust, D. F. (2003). Learners' mental models of metallic bonding: a cross-age study. *Science Education, 87*, 685-707.
- Comenius, J. A. (1632/1967). *The great didactic*. New York: Russell & Russell.
- Conant, J. B., & Haugeland, J. (Eds.). (2000). *The road since Structure*. Chicago: University of Chicago Press.
- Confrey, J. (1990). A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming. *Review of Research in Education, 16*, 3-53.
- Cox, V. (1992). *The Renaissance dialogue*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cuppari, A., Rinaudo, G., Robutti, O., & Violino, P. (1997). Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. *Physics Education, 32*(5), 302-308.
- Dawkins, R. (1976/2006). *The selfish gene* (30th anniversary éd.). Oxford: Oxford University Press.

- de Jong, T., Ainsworth, S., Dobson, M., et al. (1998). Acquiring knowledge in science and mathematics: the use of multiple representations in technology-based learning environments. In M. W. van Someren, P. Reimann, H. P. A. Boshuizen & T. de Jong (Eds.), *Learning with multiple representations* (pp. 9-40). Amsterdam: Pergamon.
- Dennett, D. C. (2006). *Breaking the spell*. New York: Viking.
- Désautels, J. (2001). Rapport aux savoirs technoscientifiques et citoyenneté : un point de vue. *Les Cahiers du CIRADE*.
- Desmastes, S. S., Good, R. N., & Peebles, P. (1995). Students' conceptual ecologies and the process of conceptual change in evolution. *Science Education*, 79(6), 637-666.
- Develay, M. (1995). En préambule. In M. Develay (Ed.), *Savoirs scolaires et didactiques des disciplines* (pp. 11-15). Paris: ESF.
- diSessa, A. A. (1982). Unlearning aristotelian physics. *Cognitive Science*, 6(1), 37-75.
- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman & P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (pp. 49-70). Hillsdale: Erlbaum.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2&3), 105-225.
- diSessa, A. A. (1996). What do "just plain folk" know about physics? In D. R. Olson & N. Torrance (Eds.), *The handbook of education and human development: New models² of learning, teaching and schooling* (pp. 709-730). Cambridge: Blackwell.
- diSessa, A. A. (2002). Why 'conceptual ecology' is good. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 29-60). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 265-282). New York: Cambridge University Press.
- diSessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "coherence" controversy (from the "pieces" side of the fence). In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 35-60). New York: Routledge.
- diSessa, A. A., Elby, A., & Hammer, D. (2003). J's epistemological stance and strategies. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 237-290). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- diSessa, A. A., Gillepsie, N. M., & Esterly, J. B. (2004). Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force. *Cognitive Science*, 28, 843-900.
- diSessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.
- Dole, J. A., & Sinatra, G. M. (1998). Reconceptualizing change in the cognitive construction of knowledge. *Educational Psychologist*, 33, 109-128.

- Dominowski, R. L. (1998). Verbalization and problem solving. In D. J. Hacker, J. Dunlosky & A. C. Graesser (Eds.), *Metacognition in educational theory and practice* (pp. 25-46). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Dreyfus, A., Jungwirth, E., & Eliovitch, R. (1990). Applying the "cognitive conflict" strategy for conceptual change - some implication, difficulties, and problems. *Science Education*, 74(555), 569.
- Driver, R. (1997). The application of science education theories: a reply to Stephen Norris and Tone Kvernbekk. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(10), 1007-1018.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Mortimer, E. F., & Scott, P. H. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Driver, R., & Bell, B. (1986). Students' thinking and the learning of science: a constructivist view. *School Science Review*, 67(240), 443-456.
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Driver, R., & Erickson, G. (1983). Theories-in-action: some theoretical and empirical issues in the study of students' conceptual frameworks in science. *Studies in Science Education*, 10, 37-60.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R., & Scott, P. H. (1996). *Young People's images of science*. Buckingham: Open University Press.
- Dugast, J.-M. (1999). Didactique des disciplines et pédagogie des gestes mentaux. In *Cahiers Alfred Binet n° 659-660, L'éducation est-elle une science ?* (pp. 11-15). Ramonville Saint-Agne: Éditions Eres.
- Duhem, P. (1914/1981). *La théorie physique : son objet, sa structure*. Paris: Vrin.
- Duit, R. (1999). Conceptual change approaches in science education. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 263-281). Amsterdam: Pergamon.
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 24(7), 753-769.
- Duit, R., Treagust, D. F., & Widodo, A. (2008). Teaching science for conceptual change: theory and practice. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 629-646). New York: Routledge.
- Duschl, R. A., & Gitomer, D. H. (1991). Epistemological perspective on conceptual change: implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 839-858.
- Duschl, R. A., & Hamilton, R. J. (1998). Conceptual change in science and in the learning of science. In B. J. Fraser & K. G. Tobin (Eds.), *International handbook of science education* (pp. 1047-1065). Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.
- Elby, A., & Hammer, D. (2001). On the substance of a sophisticated epistemology. *Science Education*, 85, 554-567.

- Erickson, G. (2001). Research programmes and the student science learning literature. In R. Millar, J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving science education* (pp. 271-292). Milton Keynes: Open University Press.
- Fabre, M. (2001). *Gaston Bachelard : la formation de l'homme moderne*. Paris: Hachette.
- Fensham, P. J. (2004). *Defining an identity*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford: Stanford University Press.
- Feyerabend, P. (1962). Explanation, reduction, and empiricism. In H. Feigl & G. Maxwell (Eds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Vol. 3, Scientific explanation, space, and time, pp. 28-97). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Feyerabend, P. (1979). *Contre la méthode*. Paris: Seuil.
- Fischler, H., & Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.
- Fishbein, E., Stavy, R., & Ma-Naim, H. (1989). The psychological structure of naive impetus conceptions. *International Journal of Science Education*, 11, 71-81.
- Flawell, J. H. (1963). *The developmental psychology of Jean Piaget*. Princeton: Van Nostrand Company.
- Flores-Camacho, F., Gallegos-Cazares, L., Garritz, A., & Garcia-Franco, A. (2007). Incommensurability and multiple models: representations of the structure of matter in undergraduate chemistry students. *Science & Education*, 16(7-8), 775-800.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge: The MIT Press.
- Fontenelle. (1687/1998). *Entretiens sur la pluralité des mondes*. Paris: Flammarion.
- Fourez, G. (2003). *Apprivoiser l'épistémologie*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Futuyama, D. J. (2005). *Evolution*. Sunderland: Sinauer Associates.
- Gagné, R. M. (1965/1985). *The conditions of learning* (4e éd.). Fort Worth: Holt, Rinehart and Winston.
- Galilée, G. (1632/2000). *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*. Paris: Seuil.
- Galili, I., & Bar, V. (1992). Motion implies force: where to expect vestiges of the misconceptions? *International Journal of Science Education*, 14, 63-81.
- Garrison, J. W., & Bentley, M. L. (1990). Science education: conceptual change and breaking with everyday experience. *Studies in Philosophy and Education*, 10, 19-35.
- Gauld, C. F. (1991). History of science, individual development and science teaching. *Research in Science Education*, 21, 133-140.
- Georgiades, P. (2000). Beyond conceptual change learning in science education: focusing on transfer, durability and metacognition. *Educational Research*, 42(2), 119-139.
- Giere, R. N. (1988). *Explaining science*. Chicago: University of Chicago Press.

- Giere, R. N. (1994). The cognitive structure of scientific theories. *Philosophy of Science*, 61, 276-296.
- Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 71, 742-752.
- Giere, R. N. (2006). *Scientific perspectivism*. Chicago: Chicago University Press.
- Gigerenzer, G., & Todd, P. M. (1999). Fast and frugal heuristics: the adaptive toolbox. In G. Gigerenzer, P. M. Todd & A. R. Group (Eds.), *Simple heuristics that make us smart* (pp. 1-35). Oxford: Oxford University Press.
- Gil-Pérez, D., & Carracosca, J. (1985). Science learning as a conceptual and methodological change. *European Journal of Science Education*, 7(3), 231-236.
- Gil-Pérez, D., & Carracosca, J. (1990). What to do about science 'misconceptions'. *Science Education*, 74(5), 531-540.
- Gil, D., & Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15(3), 261-272.
- Gilbert, G. N., & Mulkay, M. (1984). *Opening Pandora's box*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.
- Gilbert, J. K., Osborne, R. J., & Fensham, P. J. (1982). Children's science and its consequences for teaching. *Science Education*, 66(4), 623-633.
- Gilbert, J. K., & Zylbersztajn, A. (1985). A conceptual framework for science education: the case study of force and movement. *European Journal of Science Education*, 7, 107-120.
- Gilovich, T. (1991). *How we know what isn't so*. New York: The Free Press.
- Giordan, A., & de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir*. Neuchâtel: Delachaux.
- Gopnik, A. (1998). Explanation as orgasm. *Minds and Machines*, 8, 101-118.
- Gopnik, A., & Meltzoff, A. N. (1997). *Words, thoughts, and theories*. Cambridge: MIT Press.
- Gould, S. J. (1997). *Darwin et les grandes énigmes de la vie*. Paris: Seuil.
- Graham, L. R. (1993). *Science in Russia and the Soviet Union*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Grandy, R. E. (1997). Constructivism and objectivity: disentangling metaphysics from pedagogy. In M. R. Matthews (Ed.), *Constructivism and science education* (pp. 125-137). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Gregoire, M. (2003). Is it a challenge or a threat? A dual-process model of teachers' cognition and appraisal processus during conceptual change. *Educational Psychology Review*, 15(2), 147-179.

- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. (1991). Understanding models and their use in science: conceptions of model in high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 799-822.
- Grotzer, T. A. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifically accepted explanations. *Studies in Science Education*, 29, 1-74.
- Gruender, D. C. (1996). Constructivism and learning: a philosophical appraisal. *Educational Technology*(May-June), 24-29.
- Gunstone, R. F., & Watts, M. (1985). Children's understanding of force and motion. In R. Driver, E. Guesne & A. Tiberghien (Eds.), *Children's ideas in science* (pp. 85-104). Milton Keynes: Open University Press.
- Gutting, G. (2000). Scientific methodology. In W. H. Newton-Smith (Ed.), *A companion to the philosophy of science* (pp. 423-432). Malden: Blackwell.
- Guzzetti, B. J., Snyder, T. E., Glass, G. V., & Gamas, W. S. (1993). Promoting conceptual change in science: a comparative meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education. *Reading Research Quarterly*, 28(2), 116-159.
- Guzzetti, B. J., Williams, W. O., Skeels, S. A., & Wu, S. M. (1997). Influence of text structure on learning counterintuitive physics concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(7), 701-719.
- Halldén, O. (1997). Conceptual change and the learning of history. *International Journal of Science Education*, 27(3), 201-210.
- Halldén, O. (1998). Personalization in historical descriptions and explanations. *Learning and Instruction*, 9(2), 131-139.
- Halldén, O., Petersson, G., Scheja, M., et al. (2002). Situating the question of conceptual change. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 137-148). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Halloun, I. A. (1996). Schematic modeling for meaningful learning in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 1019-1041.
- Halloun, I. A. (2004). *Modeling theory in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53, 1056-1065.
- Hammer, D., & Elby, A. (2002). On the form of a personal epistemology. In B. K. Hofer & P. R. Pintrich (Eds.), *Personal epistemology: the psychology of beliefs about knowledge and knowing* (pp. 169-190). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Hanson, N. R. (1958). *Patterns of discovery*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2000). Learning about atoms, molecules and chemical bonds: a case-study of multiple model use in grade-11 chemistry. *Science Education*, 84, 352-381.

- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2001). Conceptual change using multiple interpretive perspectives: two cases in secondary school chemistry. *Instructional Science*, 29, 45-85.
- Hasweh, M. Z. (1988). Descriptive studies of students' conceptions in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(2), 121-134.
- Hawkins, J., & Pea, R. D. (1987). Tools for bridging the cultures of everyday and scientific thinking. *Journal of Research in Science Teaching*, 24(4), 291-307.
- Hempel, C. G., & Oppenheim, P. (1948). Studies in the logic of explanation. *Philosophy of Science*, 15(2), 135-175.
- Hewson, P. W. (1981). A conceptual change approach to learning science. *European Journal of Science Education*, 3(4), 161-199.
- Hewson, P. W. (1982). A case study of conceptual change in special relativity: the influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, 4, 61-78.
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G. (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13, 1-13.
- Hewson, P. W., & Thorley, N. R. (1989). The conditions of conceptual change in the classroom. *International Journal of Science Education*, 11, 541-553.
- Hilton, D. (2002). Thinking about causality: pragmatic, social and scientific rationality. In P. Carruthers, S. Stich & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of science* (pp. 211-231). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hobson, A. (1996). Teaching quantum theory in the introductory course. *The Physics Teacher*, 34, 202-210.
- Hofer, B. K., & Pintrich, P. R. (1997). The development of epistemological theories: beliefs about knowledge and knowing and their relation to learning. *Review of Educational Research*, 67(1), 88-140.
- Hofer, B. K., & Pintrich, P. R. (Eds.). (2002). *Personal epistemology: the psychology of beliefs about knowledge and knowing*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Howe, K. R., & Berv, J. (2000). Constructing constructivism, epistemological and pedagogical. In D. C. Phillips (Ed.), *Constructivism in education* (pp. 19-40). Chicago: NSSE.
- Hoyningen-Huene, P. (1993). *Reconstructing scientific revolutions*. Chicago: Chicago University Press.
- Humphrey, N. (1996). *Leaps of faith*. New York: Basic Books.
- Hyman, R. (1985). A critical historical overview of parapsychology. In P. Kurtz (Ed.), *A skeptic's handbook of parapsychology* (pp. 3-96). Buffalo: Prometheus Books.
- Hynd, C. R. (2003). Conceptual change in response to persuasive messages. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 291-315). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

- Ioannides, C., & Vosniadou, S. (2002). The changing meanings of force. *Cognitive Science Quarterly*, 2(1), 5-61.
- Ireson, G. (1999). A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. *European Journal of Physics*, 20(3), 193-199.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35(1), 15-21.
- Ireson, G. (2001). On the quantum thinking of physics undergraduate. In H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross & P. Reiska (Eds.), *Research in science education - past, present, and future* (pp. 83-94). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Jacob, P. (1980). *L'empirisme logique*. Paris: Minuit.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87(2), 257-280.
- Keil, F. C. (1989). *Concepts, kinds, and cognitive development*. Cambridge: MIT Press.
- Kelly, G. A. (1955). *A theory of personality: the psychology of personal constructs*. New York: W.W. Norton & Company.
- Kelly, G. J., & Green, J. (1998). The social nature of knowing: toward a sociocultural perspective on conceptual change and knowledge construction. In B. J. Guzzetti & C. Hynd (Eds.), *Perspectives on conceptual change* (pp. 145-181). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Keuth, H. (2005). *The philosophy of Karl Popper*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kitchener, R. F. (1986). *Piaget's theory of knowledge*. New Haven: Yale University Press.
- Kuhn, D. (1991). *The skills of argument*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kuhn, D., Amsel, E., & O'Loughlin, M. (1988). *The development of scientific thinking skills*. San Diego: Academic Press.
- Kuhn, T. S. (1957). *The Copernican revolution*. Cambridge: Harvard University Press.
- Kuhn, T. S. (1970). Reflections on my critics. In I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (pp. 231-278). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kuhn, T. S. (1972/1983). *La structure des révolutions scientifiques* (2e éd.). Paris: Flammarion.
- Kuhn, T. S. (1977/1990). *La tension essentielle*. Paris: Gallimard.
- Kuhn, T. S. (1982/2000). Commensurability, comparability, communicability. In J. B. Conant & J. Haugeland (Eds.), *The road since Structure* (pp. 33-57). Chicago: University of Chicago Press.
- Kuhn, T. S. (1991/2000). The trouble with historical philosophy of science. In J. B. Conant & J. Haugeland (Eds.), *The road since Structure* (pp. 105-120). Chicago: University of Chicago Press.

- Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (pp. 91-196). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lakatos, I. (1978). History of science and its rational reconstructions. In I. Lakatos (Ed.), *Philosophical papers* (Vol. 1, pp. 102-138). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago: University of Chicago Press.
- Larochelle, M., & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Québec: Presses de l'Université Laval.
- Larochelle, M., & Désautels, J. (2003). Descriptions estudiantines de la nature et de la fabrication des savoirs scientifiques. In L. Lafortune, C. Deaudelin, P.-A. Doudin & D. Martin (Eds.), *Conceptions, croyances et représentations en maths, sciences et technos* (pp. 150-174). Sainte-Foy: Presses de l'Université du Québec.
- Laudan, L. (1977). *Progress and its problems*. Berkeley: University of California Press.
- Laudan, L. (1984). *Science and values*. Berkeley: University of California Press.
- Laudan, L. (1996). *Beyond positivism and relativism*. Boulder: Westview Press.
- Lecourt, D. (1976). *Lyssenko, histoire réelle d'une "science prolétarienne"*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Legendre-Bergeron, M.-F. (1980). *Lexique de la psychologie du développement de Jean Piaget*. Chicoutimi: Gaëtan Morin.
- Legendre, M.-F. (2002). Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement et la formation des enseignants. In R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences* (pp. 13-29). Outremont: Éditions Logiques.
- Legendre, M.-F. (2007). Enseigner les sciences dans une double perspective de continuité et de rupture. In P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (Eds.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (pp. 293-307). Québec: MultiMondes.
- Lehrer, R., & Shauble, L. (2006). Cultivating model-based reasoning in science education. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 371-388). New York: Cambridge University Press.
- Limón, M. (2001). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: a critical appraisal. *Learning and Instruction*, 11, 357-380.
- Limón, M. (2002). Conceptual change in history. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 259-289). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Linder, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, 77(3), 293-300.
- Linnenbrink, E. A., & Pintrich, P. R. (2003). Achievement goals and intentional conceptual change. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 347-374). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

- Loving, C. C., & Cobern, W. W. (2000). Invoking Thomas Kuhn: what citation analysis reveals about science education. *Science & Education*, 9(1&2), 187-206.
- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. F. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of Science*, 67, 1-25.
- Maloney, D. P., & Siegler, R. S. (1993). Conceptual competition in physics learning. *International Journal of Science Education*, 15(3), 283-295.
- Mannila, K., Koponen, I. T., & Niskanen, J. (2002). Building a picture of students' conceptions of wave and particle-like properties of quantum entities. *European Journal of Physics*, 23, 45-53.
- Mashhadi, A. (1996). Students' conceptions of quantum mechanics. In G. Welford, J. Osborne & P. Scott (Eds.), *Research in science education in Europe: current issues and themes* (pp. 254-265). London: Falmer Press.
- Mason, L. (2002). Developing epistemological thinking to foster conceptual change in different domains. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 301-335). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Mason, L. (2003). Personal epistemologies and intentional conceptual change. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 199-236). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Matthews, M. R. (1994). *Science teaching, the role of history and philosophy of science*. London: Routledge.
- Matthews, M. R. (2002). Constructivism and science education: a further appraisal. *Journal of Science Education and Technology*, 11(2), 121-134.
- Matthews, M. R. (2003). Thomas Kuhn's impact of science education: what lessons can be learned? *Science Education*, 87(1), 91-118.
- Matthews, M. R. (2004). Editorial. *Science & Education*, 13(1), 1-5.
- Mayr, E. (1982). *The growth of biological thought*. Cambridge, Ma.: Belknap Press.
- McCloskey, M. (1983). Naïve theories of motion. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 299-324). Hillsdale: Lawrence Earlbaum Associates.
- McDermott, L. C. (1984). Research in conceptual understanding of mechanics. *Physics Today*, 37(7), 23-32.
- Merton, R. K. (1965). *On the shoulders of giants*. New York: The Free Press.
- Migne, J. (1994). Les obstacles épistémologiques et la formation des concepts. *Éducation Permanente*, 119(2), 39-65.
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 22(1), 587-896.
- Monk, M., & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: a model for the development of pedagogy. *Science Education*, 81(4), 405-424.

- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 3, 267-285.
- Moser, P. K., Mulder, D. H., & Trout, J. D. (1998). *The theory of knowledge, a thematic introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- Murphy, P. K. (2001). Teaching as persuasion: a new metaphor for a new decade. *Theory Into Practice*, 40(4), 224-227.
- Murphy, P. K., & Mason, L. (2006). Changing knowledge and beliefs. In P. A. Alexander & P. H. Winne (Eds.), *Handbook of educational psychology* (pp. 305-324). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Nadeau, R. (1999). *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Nadeau, R., & Désautels, J. (1984). *Épistémologie et didactique des sciences*. Ottawa: Conseil des Sciences du Canada.
- Nersessian, N. J. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. In P. Carruthers, S. Stich & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of science* (pp. 133-153). Cambridge: Cambridge University Press.
- Nickles, T. (1973). Two concepts of intertheoretic reduction. *The Journal of Philosophy*, 70(7), 181-201.
- Niedderer, H., Bethge, T., & Cassens, H. (1990). A simplified quantum model: a teaching approach and evaluation of understanding. In P. L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A. J. Waarlo (Eds.), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles - A central problem in secondary science education* (pp. 67-80). Utrecht: CD-β Press.
- Nola, R. (1997). Constructivism in science and in science education: a philosophical critique. In M. R. Matthews (Ed.), *Constructivism and science education* (pp. 31-59). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Nola, R. (2003). *Rescuing reason*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Nonnon, E. (1996). Activités argumentatives et élaboration de connaissances nouvelles : le dialogue comme espace d'exploration. *Langue Française*, 112(1), 67-87.
- Norris, S. P., & Kvernbekk, T. (1997). The application of science education theories. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(10), 977-1005.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11, 183-200.
- Olsen, R. V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24(6), 565-574.
- Olson, D. R., & Bruner, J. (1996). Folk psychology and folk pedagogy. In D. R. Olson & N. Torrance (Eds.), *Handbook of education and human development: new models of learning, teaching and schooling* (pp. 9-27). Cambridge: Blackwell.

- Osborne, J. (1996). Beyond constructivism. *Science Education*, 80(1), 53-82.
- Palmer, D. H. (1999). Exploring the link between students' scientific and nonscientific conceptions. *Science Education*, 83, 639-653.
- Palmer, S. (1997). The effect of context on students' reasoning about forces. *International Journal of Science Education*, 19, 681-196.
- Perelman, C., & Olbrechts-Tyceta, L. (1970). *La nouvelle rhétorique, traité sur l'argumentation* (3e éd.). Bruxelles: Éditions de l'Université de Bruxelles.
- Perkins, D. N. (1988). Patterns of misunderstanding: an integrative model for science, math and programming. *Review of Educational Research*, 58(3), 303-326.
- Perkins, D. N., & Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of causal understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science. *Studies in Science Education*, 41, 117-166.
- Petri, J., & Niedderer, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1075-1088.
- Petri, J., & Niedderer, H. (2003). Atomic physics in upper secondary school: layers of conceptions in individual cognitive structure. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, E. Hatzikraniotis, G. Fassoulopoulos & M. Kallery (Eds.), *Science education research in the knowledge-based society* (pp. 137-144). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Petty, R. E., & Cacioppo, J. T. (1986). *Communication and persuasion: central and peripheral routes to attitude change*. New York: Springer-Verlag.
- Petty, R. E., Wheeler, C., & Tormala, Z. L. (2003). Persuasion and attitude change. In I. B. Weiner (Ed.), *Handbook of psychology* (Vol. 5, pp. 535-381). New York: Wiley.
- Phillips, D. C. (1995). The good, the bad and the ugly: the many faces of constructivism. *Educational Researcher*, 24(7), 5-12.
- Phillips, D. C. (1997). How, why, what, when, and where. *Issues in Education*, 3(2), 151-194.
- Piaget, J. (1982). La psychogenèse des connaissances et sa signification épistémologique. In M. Piattelli-Palmarini (Ed.), *Théories du langage, théories de l'apprentissage* (pp. 53-62). Paris: Seuil.
- Piattelli-Palmarini, M. (1994). *Inevitable illusions*. New York: John Wiley & Sons.
- Pines, A. L., & West, L. H. T. (1986). Conceptual understanding and science learning: an interpretation of research within a sources of knowledge framework. *Science Education*, 70(5), 583-604.
- Pinker, S. (2007). *The stuff of thought*. New York: Viking.
- Pintrich, P. R. (1999). Motivational beliefs as resources for and constraints on conceptual change. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 33-50). Amsterdam: Pergamon.

- Pintrich, P. R., Marx, R. W., & Boyle, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: the role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63, 167-199.
- Pintrich, P. R., & Sinatra, G. M. (2003). Future directions for theory and research on intentional conceptual change. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 429-441). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Popper, K. R. (1934/1973). *La logique de la découverte scientifique*. Paris: Payot.
- Popper, K. R. (1963/2002). *Conjectures and refutations*. London: Routledge.
- Popper, K. R. (1979/1991). *La connaissance objective*. Paris: Flammarion.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Pospiech, G. (1999). Teaching the EPR paradox at high school? *Physics Education*, 34(5), 311-331.
- Pospiech, G. (2000). Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics. *Physics Education*, 35(6), 393-399.
- Potvin, P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*. Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- Pozo, J. I., & Gómez-Crespo, M. A. (2005). The embodied nature of implicit theories: the consistency of ideas about the nature of matter. *Cognition and Instruction*, 23(3), 351-387.
- Pozo, J. I., Gómez, M. A., & Sanz, A. (1999). When change does not mean replacement: different representations for different contexts. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 161-174). Amsterdam: Pergamon.
- Premack, D. G., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 1(4), 515-526.
- Ramirez, M., & Clement, J. (1998). *In search of dissonance: The evolution of dissonance in conceptual change theory*. Article présenté à la conférence 'Annual meeting of National Association of Research in Science Teaching', San Diego.
- Reif, F., & Larkin, J. H. (1991). Cognition in scientific and everyday domains: comparison and learning implications. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 733-760.
- Reiner, M., Slotta, J. D., Chi, M. T. H., & Resnick, L. B. (2000). Naive physics reasoning: a commitment to substance-based conceptions. *Cognition and Instruction*, 18(1), 1-34.
- Resnick, M. (1996). Beyond the centralized mindset. *The Journal of the Learning Sciences*, 5(1), 1-22.
- Robert, S. (1993). *Les mécanismes de la découverte scientifique*. Ottawa: Presses de l'Université d'Ottawa.

- Rohr, M., & Reimann, P. (1998). Reasoning with multiple representations when acquiring the particulate model of matter. In M. W. van Someren, P. Reimann, H. P. A. Boshuizen & T. de Jong (Eds.), *Learning with multiple representations* (pp. 41-66). Amsterdam: Pergamon.
- Roscoe, R. D., & Chi, M. T. H. (à paraître). Understanding tutor learning: knowledge building and knowledge telling in peer tutors' explanations and questions. *Review of Educational Research*.
- Roth, W.-M., & Roychoudhury, A. (1994). Physics students' epistemologies and views about knowing and learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 31, 5-30.
- Säljö, R. (1999). Concepts, cognition and discourse: from mental structures to discursive tools. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 81-90). Amsterdam: Pergamon.
- Saltiel, E., & Viennot, L. (1985). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students? In P. L. Lijnse (Ed.), *The Many faces of teaching and learning mechanics in secondary and early tertiary education : proceedings of a conference on physics education, Utrecht, The Netherlands, 20-25 August 1984* (pp. 199-214). Utrecht: W.C.C.-Utrecht.
- Samarapungavan, A. (1992). Children's judgments in theory choice tasks: scientific rationality in childhood. *Cognition*, 14(1), 1-32.
- Schauble, L. (1990). Belief revision in children: the role of prior knowledge and strategies for generating evidence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 31-57.
- Scheffler, I. (1991). In praise of the cognitive emotions. In *In praise of the cognitive emotions, and other essays in the philosophy of education* (pp. 3-17). New York: Routledge.
- Schraw, G. (2006). Knowledge: structures and processes. In P. A. Alexander & P. H. Winne (Eds.), *Handbook of educational psychology* (pp. 245-263). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Schutz, A., & Luckmann, T. (1973). *The structures of the life-world*. London: Heinemann.
- Scott, P. H., Asoko, H. M., & Driver, R. (1992). Teaching for conceptual change: a review of strategies. In R. Duit, F. Goldberg & F. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an international workshop held at the University of Bremen* (pp. 310-329). Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- Scott, P. H., Asoko, H. M., & Leach, J. (2007). Student conceptions and conceptual learning in science. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 31-55). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Sequeira, M., & Leite, L. (1991). Alternative conceptions and history of science in physics teacher education. *Science Education*, 75(1), 45-56.
- Sheffler, I. (1991). In praise of the cognitive emotions. In *In praise of the cognitive emotions, and other essays in the philosophy of education* (pp. 3-17). New York: Routledge.

- Shipman, H. L., Brickhouse, N. W., Dagher, Z., & Letts, W. J. (2002). Changes in student views of religion and science in a college astronomy course. *Science Education*, 86(4), 526-547.
- Shuell, T. J. (1987). Cognitive psychology and conceptual change: implications for teaching science. *Science Education*, 71(2), 239-250.
- Siegel, H. (1988). *Educating reason, rationality, critical thinking, and education*. London: Routledge.
- Siegel, H. (2001). Incommensurability, rationality and relativism: in science, culture and science education. In P. Hoyningen-Huene & H. Sankey (Eds.), *Incommensurability and related matters* (pp. 207-224). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sinatra, G. M. (2002). Motivational, social, and contextual aspects of conceptual change: a commentary. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 187-197). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Slotta, J. D., & Chi, M. T. H. (2006). Helping students understand challenging topics in science through ontology training. *Cognition and Instruction*, 24(2), 261-289.
- Smith, E. L. (1987). What besides conceptions needs to change in conceptual change learning? In J. D. Novak (Ed.), *Proceedings of the second international seminar on misconceptions and educational strategies in science and mathematics* (pp. 424-433). Ithaca: Cornell University.
- Smith, M. U., & Siegel, H. (2004). Knowing, believing, and understanding: what goals for science education? *Science & Education*, 13, 553-582.
- Soler, L. (2000). *Introduction à l'épistémologie*. Paris: Ellipses.
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: how pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49-59.
- Solomon, J. (1984). Prompts, cues and discrimination: the utilization of two separate knowledge systems. *European Journal of Science Education*, 6(1), 63-82.
- Solomon, J. (1994). The rise and fall of constructivism. *Studies in Science Education*, 23, 1-19.
- Solsona, N., Izquierdo-Aymerich, M., & de Jong, O. (2003). Exploring the development of students' conceptual profiles of chemical change. *International Journal of Science Education*, 25(1), 3-12.
- Southerland, S. A., Abrams, E., Cummins, C. L., & Anzelmo, J. (2001). Understanding students' explanations of biological phenomena: conceptual frameworks or p-prims? *Science Education*, 85(4), 328-348.
- Southerland, S. A., & Sinatra, G. M. (2003). Learning about biological evolution: a special case of intentional conceptual change. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 317-345). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Southerland, S. A., Sinatra, G. M., & Matthews, M. R. (2001). Belief, knowledge, and science education. *Educational Psychology Review*, 13(4), 325-351.

- Spada, H. (1994). Conceptual change or multiple representations? *Learning and Instruction*, 4, 113-116.
- Spelke, E. (1998). Nativism, empiricism, and the origins of knowledge. *Infant Behavior & Development*, 21(2), 181-200.
- Sperber, D., & Wilson, D. (1986). *Relevance: communication and cognition*. Cambridge: Harvard.
- Spranzi, M. (2004). *Galilée : le "Dialogue sur les deux grands systèmes du monde"*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Stavy, R., Tsamir, P., & Tirosh, D. (2002). Intuitive rules : the case of "more A - more B". In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 217-231). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Steinberg, M. S., Brown, D. E., & Clement, J. (1990). Genius is not immune to misconceptions: conceptual difficulties impending Isaac Newton and contemporary physics students. *International Journal of Science Education*, 12, 265-273.
- Steinberg, R. N., Wittmann, M. C., Bao, L., & Redish, E. F. (1999). *The influence of student understanding of classical physics when learning quantum mechanics*. Article présenté à la conférence 'NARST 99'.
- Strauss, S. (1998). Cognitive development and science education: toward a middle level model. In R. M. Lerner, K. A. Renninger & I. E. Sigel (Eds.), *Handbook of child psychology* (Vol. 4, pp. 357-399). New York: Wiley.
- Strike, K. A. (1987). Toward a coherent constructivism. In J. D. Novak (Ed.), *Proceedings of the second international seminar on misconceptions and educational strategies in science and mathematics* (pp. 481-489). Ithaca: Cornell University.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1982). Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*, 4(3), 231-240.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. In L. H. T. West & A. L. Pines (Eds.), *Cognitive structures and conceptual change* (pp. 211-231). Orlando: Academic Press.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Eds.), *Philosophy of science, cognitive science and educational theory and practice* (pp. 147-176). Albany: State University of New York Press.
- Suppe, F. (Ed.). (1977). *The structure of scientific theories* (2e éd.). Urbana: University of Illinois Press.
- Taber, K. S. (2000). Multiple frameworks?: evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Science Education*, 22(4), 399-417.
- Taber, K. S. (2002). Conceptualizing quanta - illuminating the ground state of student understanding of atomic orbitals. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 3, 145-158.

- Taber, K. S. (2004). Learning quanta: barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas. *Science Education*, 89, 94-116.
- Taber, K. S. (2008). Conceptual resources for learning science: issues of transience and grain-size in cognition and cognitive structure. *International Journal of Science Education*, 30(8), 1027-1053.
- Tamir, P., & Zohar, A. (1991). Anthropomorphism and teleology in reasoning about biological phenomena. *Science Education*, 75(1), 57-67.
- Tardif, J. (1992). *Pour un enseignement stratégique*. Montréal: Éditions Logiques.
- Thacker, B. A. (2003). A study of the nature of students' models of microscopic processes in the context of modern physics experiments. *American Journal of Physics*, 71, 599-606.
- Thagard, P. (1992). *Conceptual revolutions*. Princeton: Princeton University Press.
- Thagard, P. (2002). The passionate scientist: emotion in scientific cognition. In P. Carruthers, S. Stich & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of science* (pp. 235-250). Cambridge: Cambridge University Press.
- Thouin, M. (2002). Didactique des sciences, changement conceptuel et formation des maîtres. In R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences* (pp. 157-176). Outremont: Éditions Logiques.
- Tiberghien, A. (2003). Des connaissances naïves au savoir scientifique. In M. Kail & M. Fayol (Eds.), *Les sciences cognitives et l'école* (pp. 353-413). Paris: Presses Universitaires de France.
- Tobin, K. G. (2000). Constructivism in science education: moving on In D. C. Phillips (Ed.), *Constructivism in education* (pp. 227-253). Chicago: NSSE.
- Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., & Kawasaki, T. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics*, 57, 117-120.
- Toulmin, S. (1961). *Foresight and understanding*. New York: Harper & Row.
- Toulmin, S. (1972). *Human understanding*. Princeton: Princeton University Press.
- Tsai, C.-C. (2000). Enhancing science instruction: the use of 'conflict maps'. *International Journal of Science Education*, 22(3), 285-302.
- Tsui, C.-Y., & Treagust, D. F. (2004). Conceptual change in learning genetics: an ontological perspective. *Research in Science & Technological Education*, 22(2), 185-202.
- Tyson, L. M., Venville, G. Y., Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (1997). A multidimensional framework for interpreting conceptual change events in the classroom. *Science Education*, 81, 387-404.
- Vamvakoussi, X. (2007). Extending the conceptual change approach to mathematics learning: an introduction. In S. Vosniadou, A. Baltas & X. Vamvakoussi (Eds.), *Re-framing the conceptual change approach in learning and instruction* (pp. 239-246). Oxford: Elsevier.
- Vamvakoussi, X., & Vosniadou, S. (2004). Understanding the structure of the set of rational numbers: a conceptual change approach. *Learning and Instruction*, 14(5), 453-467.

- van der Maren, J.-M. (1996). *Méthodes de recherche pour l'éducation*. Bruxelles: De Boek Université.
- van Someren, M. W., Boshuizen, H. P. A., De Jong, T., & Reimann, P. (1998). Introduction. In M. W. van Someren, P. Reimann, H. P. A. Boshuizen & T. de Jong (Eds.), *Learning with multiple representations* (pp. 1-5). Amsterdam: Pergamon.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205-221.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique, la part du sens commun*. Paris: De Boeck Université.
- Villani, A. (1992). Conceptual change in science and science education. *Science Education*, 76(2), 223-237.
- Vokos, S., Ambrose, B. S., Shaffer, P. S., & McDermott, L. C. (2000). Student understanding of the wave nature of matter: diffraction and interference of particles. *American Journal of Physics*, 68(S1), S42.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Vosniadou, S. (1999). Conceptual change research: state of the art and future directions. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 3-13). Amsterdam: Pergamon.
- Vosniadou, S. (2001). What can persuasion research tell us about conceptual change that we did not already know? *International Journal of Educational Research*, 35, 731-737.
- Vosniadou, S. (2002). On the nature of naïve physics. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 61-76). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Vosniadou, S. (2003). Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 377-406). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: a study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1994). Mental models of the day/night cycle. *Cognitive Science*, 18, 123-183.
- Vosniadou, S., & Ioannides, C. (1998). From conceptual development to science education: a psychological point of view. *International Journal of Science Education*, 20(10), 1213-1230.
- Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulos, A., & Papademetriou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, 11, 381-419.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society*. Cambridge: Harvard University Press.
- Walton, D. N. (1992). *Plausible argument in everyday conversation*. Albany: State University of New York Press.

- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 177-210). New York: Maxwell Macmillan International.
- Watson, J. (1968). *The double helix*. New York: Touchstone.
- Wellman, H. M., & Gelman, S. A. (1998). Knowledge acquisition in foundational domains. In D. Kuhn & R. Siegler (Eds.), *Handbook of child psychology* (Vol. 2, pp. 523-573). New York: Wiley.
- White, R. T. (1989). Metalearning and conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, 577-586.
- White, R. T. (2005). *Research of the Special Interest Group for cognitive structure and conceptual change: perceptions, questions, and suggestions*. Article présenté à la conférence 'AERA', Montréal.
- Whitehead, A. N. (1929). *The aims of education and other essays*. New York: The Free Press.
- Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: a dynamic systems approach to making sense of the world. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 3-19.
- Wiser, M., & Amin, T. (2001). "Is heat hot?" Inducing conceptual change by integrating everyday and scientific perspectives on thermal phenomena. *Learning and Instruction*, 11, 331-355.
- Wittmann, M. C. (2002). The object coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning in wave physics. *International Journal of Science Education*, 24(1), 97-118.
- Wolpert, L. (1992). *The unnatural nature of science*. Cambridge: Harvard University Press.
- Wolpert, L. (2006). *Six impossible things before breakfast*. London: Faber and Faber.

ANNEXE 2 – FORMULAIRE DE CONSENTEMENT**FORMULAIRE DE CONSENTEMENT**

Titre de la recherche : La compréhension de théories alternatives en science.

Chercheur : Michel Bélanger, étudiant au doctorat, Département de didactique, Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal

Directeur de recherche : Marcel Thouin, professeur titulaire, Département de didactique, Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal

A) RENSEIGNEMENTS AUX PARTICIPANTS**1. Objectifs de la recherche**

L'objectif de ce projet est d'étudier la compréhension de la physique classique et de la physique moderne chez des étudiants collégiaux, et ce afin d'améliorer les modèles psychologiques actuel sur l'apprentissage des sciences.

2. Participation à la recherche

La participation à cette recherche consiste à rencontrer l'agent de recherche pour une entrevue de 45 minutes à un moment que vous choisirez dans un local de laboratoire spécifié. Cette entrevue portera sur votre compréhension de la physique moderne. L'entrevue sera enregistrée (audio), puis transcrite.

3. Confidentialité

Les renseignements que vous nous donnerez demeureront confidentiels. Les entrevues seront transcrites et les enregistrements effacés. Chaque participant à la recherche se verra attribuer un numéro et seul le chercheur aura la liste des participants et des numéros qui leur auront été attribués. De plus, les renseignements seront conservés dans un classeur sous clé situé dans un bureau fermé. Aucune information permettant de vous identifier d'une façon ou d'une autre ne sera publiée. Ces renseignements personnels seront détruits 7 ans après la fin du projet. Seules les données ne permettant pas de vous identifier seront conservées après cette date, le temps nécessaire à leur utilisation.

4. Avantages et inconvénients

En participant à cette recherche, ne courez pas de risques ou d'inconvénients particuliers et vous pourrez contribuer à l'avancement des connaissances en psychologie de l'apprentissage des sciences.

5. Droit de retrait

Votre participation est entièrement volontaire. Vous êtes libre de vous retirer en tout temps sur simple avis verbal, sans préjudice et sans devoir justifier votre décision. Si vous décidez de vous retirer de la recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur, au numéro de téléphone indiqué ci-dessous. Si vous vous retirez de la recherche, les renseignements qui auront été recueillis au moment de votre retrait seront détruits.

6. Indemnité

Afin de couvrir vos frais de déplacement, une compensation financière de vingt dollars (20 \$) vous sera versée après l'entrevue à laquelle vous participerez.

IV

B) CONSENTEMENT

Je déclare avoir pris connaissance des informations ci-dessus, avoir obtenu les réponses à mes questions sur ma participation à la recherche et comprendre le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de cette recherche.

Après réflexion et un délai raisonnable, je consens à participer à cette étude. Je sais que je peux me retirer en tout temps, sur simple avis verbal, sans aucun préjudice.

Je consens à ce que les données anonymisées recueillies dans le cadre de cette étude soient utilisées pour des projets de recherche subséquents, conditionnellement à leur approbation éthique et dans le respect des mêmes principes de confidentialité et de protection des informations

	Oui	Non
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Signature : _____ Date : _____
Nom : _____ Prénom : _____

Je déclare avoir expliqué le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de l'étude et avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature du chercheur
(ou de son représentant) : _____ Date : _____
Nom : _____ Prénom : _____

Pour toute question relative à l'étude, ou pour vous retirer de la recherche, vous pouvez communiquer avec Michel Bélanger, au numéro de téléphone suivant : [REDACTED] ou à l'adresse courriel [REDACTED]

Toute plainte relative à votre participation à cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal, au numéro de téléphone (514) 343-2100 ou à l'adresse courriel suivante: ombudsman@umontreal.ca (**l'ombudsman accepte les appels à frais virés**).

Un exemplaire du formulaire d'information et de consentement signé doit être remis au participant

ANNEXE 3 – ENTREVUE AVEC U1

Tâches de vulgarisation

Adaptation_des.animaux.:le.cou.des.girafes

Début : 0m 15s

- U1 En premier lieu, ce que je vais faire, c'est arrêter les jeunes et leur retourner la question :
- Qu'est-ce que les girafes mangent selon vous ?
 - Et puis là ils vont tous lever leur main : Moi je pense qu'ils mangent des [?]. Non moi, je pense que c'est des feuilles !
 - Alors là je vais dire : C'est les feuilles ! Puis je vais dire : Les feuilles, c'est où dans les arbres ?
 - Donc [ils répondent] : Ah, c'est haut dans les arbres.
- U1 Ok, finalement, ce qu'il faut faire, c'est établir un principe de correspondance, associer à quelque chose dans leur vie à eux. Je leur donnerais un exemple dans leur vie où il faut qu'ils essaient de s'étirer le bras pour manger quelque chose.
- Je leur dirais : Ah, vous n'êtes pas capables. Bien la girafe, elle, au fur et à mesure des générations, au début début, il y a des millions d'années, la girafe avait un petit cou. Au fil des générations, les girafes qui avaient des plus grands cous étaient plus fortes que les girafes avec des petits cous, parce qu'elles étaient capables de manger plus de feuilles. C'est les girafes avec des grands cous qui ont survécues. Alors le cou des girafes a augmenté au cours des années.
 - [Réponse :] Ahhhh....
- U1 C'est tout !
- I Qu'est-ce qui aurait pu être changé à ton explication si tu avais eu affaire avec des adolescents. Est-ce que tu aurais changé quelque chose à ton explication ?
- U1 Bien j'aurais changé l'exemple ... Au lieu de dire, que tu dois aller chercher un biscuit, j'aurais dit : tu vas aller voler un bonbon à ton petit frère. Y aller de façon un peu plus mature dans ton explication. Au lieu de lui expliquer finalement que les girafes ayant un plus long cou gagnent, j'aurais apporté un élément plus complexe, un petit peu la théorie de l'évolution de Darwin, que les adolescents ont commencé à voir un peu. J'aurais dit, les girafes avec des plus grands cous avaient un avantage génétique sur les girafes avec des plus petits cous, et ça a monté comme ça.
- I Mais avec les plus jeunes, tu ne l'as pas fait un peu ça ?
- U1 Je l'ai fait un peu, mais je n'ai pas dit Darwin, et je n'ai pas dit la théorie de l'évolution.
- I Si disons au lieu d'avoir 10-11 ans, les jeunes avaient été au début primaire, 6-7 ans, est-ce que tu aurais changé quelque chose ?
- U1 Je n'aurais pas parlé que les girafes avaient un petit cou avant.
- I Qu'est-ce que t'aurais dit ?
- U1 J'aurais juste dit que les girafes ont un grand cou pour manger les feuilles qui sont très très hautes. J'aurais, comment dire ...coupé l'évolution, ça aurait été un petit peu plus complexe pour eux.

VI

- I Pour quelle raison penses-tu que ça aurait été plus complexe pour les plus jeunes ?
- UI En fait, ça dépend quel âge, mais il y a un stade dans la jeunesse, où les jeunes ont plus de misère à s'imaginer l'avant et l'après. Leur grand-père a toujours été vieux et sera toujours vieux. Ça c'est avant 7 ans mettons. Donc avant 7 ans, ça ne se peut pas, dans leur tête, que la girafe qu'ils voient là était un bébé avant.
- I La girafe, tu veux dire ...
- UI La girafe qu'ils ont vue. Dans leur tête, la girafe n'a jamais été bébé.
- I Ils ne comprendraient même pas le concept développement au niveau de l'individu.
- UI Ben peut-être oui, mais c'est plus difficile à entrer.
- I Pour le développement de l'espèce, c'est encore plus complexe que pour le développement de l'individu ?
- UI Ouais, c'est ça. Ça aurait été quelque chose de peut-être un peu trop loin. Il aurait fallu leur expliquer, finalement, que les vaches ont toujours vécu, mais qu'elles n'auraient pas été toujours de la même façon, ce qui aurait été un peu plus ardu. C'est pour ça que je pense que l'évolution, pour les 7 ans ou moins ... [c'est trop complexe].
- I Mais pour 10-11 ans tu penses que ...
- UI Oui-oui-oui.
- I Est-ce que tu as déjà interagis avec des jeunes de cet âge-là ?
- UI Oui.
- I Quel genre d'expérience que as-tu ?
- UI J'ai passé 3 ans en tant qu'animateur de camp de vacances.
- I Ça explique bien des choses. Il me semblait bien que tu répondais avec pas mal de confiance. ... En termes de vérité, est-ce que tu considères que l'explication que tu as fournie au départ, pour les 10-11 ans, est vraie ...
- UI Ouais.
- I Par rapport à celle que tu as proposée aux adolescents de 15-16 ans. Plus vrai, moins vrai ?
- UI C'est tout tout tout vrai.
- I Mais qu'est-ce qui change alors ?
- UI Ce qui change, c'est le ... Tu sais, on dit souvent : je te dit la vérité, mais je te dit pas toute la vérité. Alors à chaque fois que je vais leur expliquer quelque chose, ça va être vrai. C'est juste que je ne vais pas leur avoir tout expliqué finalement. Puis s'ils en veulent plus, je vais leur en donner plus.
- I Tu ne leur mentiras pas...
- UI Je ne leur mentirai pas, je ne leur dirai pas que les taches des girafes, ça a ... mais peut-être qu'il y a une raison pour les taches des girafes ...
- I Mais quand tu dis que pour les jeunes de 6-7 ans, tu leur dirais en fait que les girafes ont un long cou pour atteindre les feuilles qui sont plus haut. Mais est-ce que les girafes ont un long cou pour atteindre les feuilles plus hautes ? Ça c'est plus un concept téléologique, dans le sens où c'est comme si les girafes avaient voulu atteindre les feuilles plus hautes, et puis elles auraient développé un long cou. Ce serait une conception non darwinienne ... Si les girafes ont un long cou pour

atteindre les feuilles parce qu'elles veulent atteindre les feuilles ... C'est une mauvaise conception de l'évolution. [...] Alors que, comme tu l'as dit pour les plus vieux, c'est parce que celles qui avaient un plus long cou ont survécues que graduellement la moyenne des cous a augmenté dans la population. Tu comprends.

U1 Ouais ouais.

I La première, ce n'est pas totalement vrai au niveau du mécanisme causal. Est-ce que tu considères cela comme une fausseté ?

U1 Non. Mais tu l'as dit toi-même, c'est quelque chose qui n'est pas totalement vrai, mais qui est quand même vrai. La girafe elle a un grand cou pour manger les feuilles ... je veux dire, la girafe a un grand cou, car ça lui permet de bien manger les feuilles. C'est une vérité, j'ai juste omis de dire comment elle a acquis son grand cou. Donc je crois encore que ce ne sont pas des faussetés que je leur dit.

I Parfait [...]

Échange de chaleur : la soupe sur le feu

Début : 8m 30s

I Alors, vas-y.

U1 Le petit gars veut toucher la louche,

- Puis je dis : Non non non non, pour ta petite sécurité on ne va pas y toucher.

- Puis là il dit : Non je veux ...

- Et là tu lui dis : Non, le métal c'est chaud, c'est comme si en touchant le métal tu touchais directement à la soupe. Le plastique, c'est comme une barrière entre toi et la soupe.

- [Il dit] Hein, comment ça ?

- Tu dis : Parce que la chaleur, ça bouge, ça circule, un petit peu comme de l'eau. Et là le métal c'est comme un gros tuyau d'eau : la chaleur peut passer beaucoup dans le métal. Tandis que dans le plastique, il n'y en a pas beaucoup qui passe [?]. Si tu veux, petit gars, on peut y toucher à la louche. Fais attention.

- Là il y touche : Ouch, ça fait mal !

- Je te l'avais dit mon petit gars.

U1 C'est ça, tu lui dis que c'est chaud, et que ça ne conduit pas. C'est tout.

I Avec une bonne petite démonstration pour que ça reste dans la mémoire !

U1 C'est important ... À 10-12 ans, faut bien qu'il se brûle au moins un fois dans sa vie !

I Même question, supposons que tu doives expliquer cela à quelqu'un de 14-15 ans. Je ne sais pas d'où ils viendraient, mais bon. Est-ce que tu changerais quelque chose à l'explication ?

U1 Ouais, je ne parlerais pas de tuyau de chaleur.

I [Explicitation de l'analogie entre la transmission de chaleur et l'eau dans un tuyau.]

U1 À 14-15 ans tu ne parles plus de ça. C'est quoi, secondaire 3-4 ... Ils connaissent un peu finalement c'est quoi les atomes. Là tu leur dis que dans les métaux, ce qui arrive, c'est que tu dois savoir que ça conduit bien l'électricité. Puis là ils disent : « oui oui oui ». ... En fait, c'est ne pas à cause de l'électricité que les métaux sont de bons conducteurs ... Un peu oui entre autres ... Non en fait... Les métaux sont de bons

VIII

conducteurs parce que les atomes sont bien liés entre eux ... Ce n'est pas la chaleur des électrons qui bougent.

I Ça a rapport sûrement au nombre de degrés de liberté disponibles ...

U1 Je pense qu'à 14-15 ans, on peut faire le parallèle entre la conductivité électrique et la conduction de chaleur. Là tu leur dis que le métal ça conduit bien l'électricité, puis le plastique non. C'est pour cela qu'on prend un gant pour toucher les fils électriques. C'est la même chose pour la chaleur finalement : la chaleur circule bien ... Là tu rentres un peu plus loin dans l'explication. Tu dis : la chaleur c'est l'agitation des molécules. C'est que les molécules dans un métal sont très liées, comme avec des crochets. Ce qui fait que quand il y en a une qui bouge beaucoup, l'autre bouge beaucoup, très vite. Un peu comme quand tu décides de bouger une corde. Tandis que dans le plastique, elles sont moins bien liées finalement. Elles ne sont plus avec des crochets, elles sont comme [ça ?]. Quand une bouge, l'autre elle ne suit pas automatiquement l'autre à côté, parce qu'elle n'est pas accrochée comme ça en fait. Alors là elle bouge, l'autre ne bouge pas. Alors là en fait la chaleur circule mal dans le plastique. C'est comme ça que je leur expliquerais à peu près.

I Et pour des enfants encore plus jeunes, au début primaire, 6-7 ans.

U1 Bien j'aurais ... insisté sur le tuyau. Sur la façon de fluide, que la chaleur c'est comme un fluide, et que ça circule mieux dans le métal, parce que le métal c'est comme si c'était un gros tuyau de chaleur finalement. C'est pour ça que tantôt je n'étais pas trop sûr de parler de tuyau avec l'enfant de 10-12 ans, c'est comme un entre-deux.

I Qu'est-ce qui fait que ce que tu modifierais à travers les âges ce soit d'utiliser ou non l'analogie avec les conduits d'eau ?

U1 Le degré d'abstraction de l'enfant. Si l'enfant est capable de s'imaginer des atomes qui s'échangent de la chaleur ou pas. Un enfant de 10-12 ans n'a peut-être pas encore la capacité de faire abstraction du métal et puis de dire : il y a des atomes là, qui sont accrochés. C'est plus facile pour eux de faire une abstraction avec un objet courant, qu'ils ont touché souvent, comme un tuyau justement. Tandis qu'un atome, ils n'ont pas souvent vu ça.

I Je ne pense pas qu'ils aient vu ça tout court.

U1 À 14-15 ans, ils sont rendus à un âge où ils sont capables de faire des abstractions plus complexes. Tu es capable de leur dire : des atomes liés [... ?].

I Puis en termes de vérité, comme tantôt, en allant vers une explication simplifiée ou analogique, est-ce que tu as l'impression de quitter le domaine de la vérité pour dire quelque chose ...

U1 Qui est un peu faux ?

I Oui.

U1 Là c'est un peu plus subtil, parce que là je parlais de tuyau puis de métal. Là c'est un peu moins vrai ... En fait, dans ce que je disais à l'enfant, l'enfant va voir cela comme un tuyau, puis il n'y aura pas quelque chose de faux dans lui. En fait ce qu'il va retenir c'est la conduction de chaleur ou la non conduction de chaleur. Il va voir la chaleur comme un fluide, mais la chaleur, c'est un fluide. Bien, pas « c'est un fluide », mais « ça se comporte comme un fluide ».

I Ça se comporte comme un fluide.

- UI Non, je ne pense pas qu'il y aurait quelque chose de faux nécessairement dans ce que je dis. Comme je disais tantôt, dans une explication, tu dis quelque chose de vrai, mais tu ne dis pas tout dans l'explication. Ce que je dis, c'est toujours relativement vrai.
- I Par ce que dans l'histoire des sciences, il y a une conception substantialiste de la chaleur justement ... le calorique. [...] Il y a des gens qui ont déjà pensé comme cela, de manière intelligente.
- UI Mais en même temps, le calorique, c'est quelque chose de faux. Là je dis que le calorique ça l'existe finalement.
- I Alors ... ?
- UI Alors ... En même temps, il n'y a rien de faux dans dire que la chaleur ça se comporte comme le calorique. Ça se comporte comme le calorique.
- I Si tu dis que ça se comporte *comme* le calorique, c'est davantage une analogie. Tu dis que ce n'est pas vraiment ça, mais que ça se comporte comme. Ce n'est pas faux de dire ça. Mais en même temps ce n'est pas ça.
- UI Mais quand tu es avec un enfant de 10-12 ans, tu es toujours en analogie, parce que quand tu commences à lire et à enseigner les sciences, c'est moins ... En fait c'est encore dans les analogies.
- I Mais étant donné que nous sommes sur ce sujet-là ... Tu disais avant l'entrevue à quel point c'était important de croire ce qu'on disait aux enfants... Ici, tu parles de calorique, puis tu sais que ce n'est pas l'explication vraie ... c'est substantialiste alors que la chaleur ce n'est pas vraiment ça. Est-ce que c'est moralement permis de parler de calorique, de leur fournir une explication qui est quand même assez différente de ce que tu sais être la vérité ?
- UI Non je ne pense pas que c'est moralement mauvais comme tu dis. De toutes façons, si tu ne leur dis pas ça, si tu leur donnes la vraie explication, ils ne comprendront rien. Donc, je crois que c'est correct finalement de donner une explication ... pas fausse, mais incomplète ... C'est ça le mot : ce sont des explications pas fausses, mais incomplètes qui n'englobent pas toute la définition de ce qu'est la chaleur. Mais tu sais, un enfant de 12 ans, si tu expliques tout ce qui est la chaleur, il ne va rien comprendre. Alors ça va par étape finalement. Tu lui expliques le calorique, deux ans après tu ... en fait pas le calorique, tu lui expliques la fluidité de la chaleur, puis ensuite tu lui expliques que c'est de l'agitation des molécules, alors il fait le lien avec ce qu'il a vu deux ans avant, que c'était comme de l'agitation des molécules. Tu sais, l'apprentissage, c'est la science de la répétition ... Tu répètes le même concept, mais en englobant de plus en plus tous les domaines. Donc chaque fois que tu expliques quelque chose, ce n'est pas nécessairement faux, c'est juste incomplet.
- I Tu complètes progressivement ton explication ...
- UI C'est ça. Tu dis à ton jeune : « Dans deux ans, je vais t'expliquer c'est quoi ... »

Évaporation : le linge sur la corde

Début : 19m 53s

- U1 Là tu as une jeune cousine qui pense que l'eau ça tombe du linge, et qu'en fait tu t'arranges pour lui faire comprendre par elle-même la fausseté de son raisonnement, en lui demandant :
- Oui mais, quand le linge est humide, ça sèche quand même.
 - Elle dit : Bien oui.
 - Je lui dis : Vois-tu l'eau qui tombe du linge humide.
 - Elle me dit : Bien non.
 - Puis là je lui dis : Si on s'assoie là, et qu'on reste à côté, tu ne verras jamais une goutte qui tombe.
 - [Elle dit :] Bien non.
 - Et je dis : Tu sais, en fait la piscine qui est juste là, ta maman il faut qu'elle la remplisse souvent.
 - Elle dit : Bien oui.
 - Puis là je dis : Mais là, l'eau elle ne va pas partout quand vous sautez dans la piscine.
 - [Elle dit :] Oui, et l'eau descend quand même.
 - Tu dis : C'est parce que l'eau s'évapore en gaz.
 - Elle est là : Hein !
 - [Je dis :] Eh oui eh oui, comme dans ta bouilloire ! Quand ta bouilloire bout, ça fait du gaz. L'eau en fait s'est transformée en gaz. En fait, c'est que quand l'eau est agitée, qu'elle a beaucoup beaucoup de chaleur (on revient à l'explication de tantôt en fait), elle se trouve tellement agitée qu'elle n'est plus capable de rester en liquide et elle se transforme en gaz. Et en fait c'est ce qui arrive quand tu étends ton linge sur la corde à linge : c'est le soleil qui chauffe l'eau qui est dans ton linge, et l'eau se transforme en gaz. Comme ça, elle s'envole par le soleil !
 - Puis là elle dit : Ah oui ? mais quand il ne fait pas chaud ça sèche quand même.
 - Puis je dis : Ça sèche n'importe quand l'eau en fait, et surtout le vent ça aide beaucoup, parce que ça chasse l'eau qui s'est transformée en gaz à côté. Et là quand l'eau a été chassée, l'eau qui est restée dans le linge est capable encore plus de s'évaporer.
- U1 C'est à peu près comme ça que je lui expliquerais, sans trop rentrer dans le pourquoi que l'eau s'évapore. Tu dis que l'eau, quand elle devient agitée, la chaleur ... elle devient gazéifiée.
- I Il y aurait plusieurs contre exemples ou questions, comme : pourtant la serviette est pas chaude ...
- U1 Ouais, c'est un peu plus subtil.
- I Prenons ça comme âge de référence. Si tu prenais des élèves un peu plus vieux, en supposant qu'ils ne connaissent pas le phénomène, qu'est-ce que tu modifierais à ton explication ? Secondaire 3-4.
- U1 Bien je ne changerais pas trop mon explication en fait, mais j'ajouterais la composante concentration en eau de l'air. Je lui parlerais de l'humidité, et en fait quand il n'y a aucune humidité, l'eau a beaucoup plus tendance à s'évaporer, un peu comme quand tu es dans une salle avec 100 000 personnes, et qu'il y a une salle à côté avec 3-4 personnes, les gens ont tendance à s'en aller, même si ils ne se font pas

pousser. C'est un peu comme finalement ce qui arrive avec l'eau, quand il n'y a aucune eau dans l'air, l'eau a tendance à s'en aller dans l'air pour équilibrer ...

I Une diffusion ...

UI Une diffusion oui. J'ajouterais le terme concentration de l'eau dans l'air, qui réglerait toutes les questions du genre : la serviette n'est pas chaude.

I Mais si les personnes avaient été plus jeunes encore, 6-7 ans, début primaire ?

UI Là ça aurait été plus délicat, je dois t'avouer.

I Qu'est-ce que tu ferais de différent ?

UI Je dois t'avouer que l'explication que je donnais était pas mal déjà très simplifiée ... Hmm ... Je pense que j'insisterais sur l'analogie avec la bouilloire qui bouille et que l'eau s'évapore. Et que en fait dehors quand tu l'étends, c'est le soleil qui fait une bouilloire sur les vêtements. C'est juste que là ça risque de le mélanger, puis quand il ne fait pas chaud, ils vont l'étendre quand même.

I Parce que pour bien comprendre ça, il faut comprendre au niveau microscopique ce qui se passe : les distributions d'agitation thermique, où seulement les dernières particules les plus agitées qui finissent par s'envoler ...

UI Oui, il faudrait expliquer le vent en fait ...

I Est-ce que tu penses qu'à cet âge-là, ils sont capables d'imaginer la façon atomique d'expliquer le passage de l'état liquide à l'état gazeux.

UI Oui oui, très bien. En fait ça dépend desquels 10-11 ans.

I En moyenne ...

UI Oui, je suis d'accord avec toi, en moyenne ils seraient capables de recevoir la concentration, le terme d'agitation moléculaire et tout. Mais ça dépend du jeune en fait.

I Il y a des gens qui ont essayé, et c'est faisable en fait [...]

UI Mais oui, je me souviens, en 6^e année on voyait le cycle de l'eau.

I Le cycle de l'eau, ça commence déjà à parler de gaz, puis de liquide. Mais est-ce qu'on comprend ça en termes d'interactions entre les atomes ?

UI Non.

I Mais est-ce qu'on a besoin de comprendre ça en termes d'interactions entre les atomes ?

UI Non plus.

I Même pour les plus vieux ?

UI En fait les plus vieux s'ils ne comprennent pas que l'évaporation, ça ne marche pas en s'égouttant, c'est sûr que tu ne vas pas leur expliquer la façon atomique de l'expliquer. Tu sais, il y a comme plusieurs étapes à l'apprentissage. Il faut que tu comprennes que l'évaporation ça existe avant de comprendre comment que l'évaporation ça marche.

I Ce n'est pas vraiment une question d'âge, c'est plus une question de prérequis notionnels.

UI Oui.

I Même chose en termes de vérité. Qu'est-ce que tu as à dire à propos de tes différentes façons d'expliquer le phénomène aux différentes personnes.

XII

- U1 Je pense que je me répète ! Comme je te dis, c'est toujours vrai ... Ben non en fait ce n'est pas toujours vrai, ça arrive souvent qu'on se trompe et qu'on se rétracte, et quand l'enfant te dit : « Oui mais ça ne marche pas », tu dis : « C'est vrai je m'étais trompé. » Pas « Je m'étais trompé. » en fait : « C'est vrai, j'avais mal expliqué. » Mais tu sais il n'y a pas de mal à oublier d'enseigner les effets moléculaires de l'évaporation à un jeune de 10-12 ans qui croit ça. Tu sais, il y a des étapes aux apprentissages, et à chaque étape ce n'est pas nécessairement faux, mais c'est incomplet. Et à l'étape d'après, tu corriges l'incomplétude finalement. Ou, encore plus drôle, tu peux raconter des mensonges au jeune, et puis le lendemain il t'arrive :
- Oui mais c'est pas vrai !
 - C'est bon, tu l'as trouvé ! C'est vrai que ce n'est pas vrai.
- U1 Il n'y a pas de mal à enseigner des choses fausses à un enfant en autant que tu lui dises après que c'était faux. Je m'étais déjà fait faire ça en fait au secondaire. Notre prof nous avait passé le reportage de la chaîne Fox sur le fait que les hommes n'ont jamais marché sur la Lune. [...] Ah, ça a passé à la TV ! [...] En secondaire 5. Il y a en avait qui était vraiment partis [convaincus].

Tâches des double fentes

Double fentes en optique

Début : 31m 40s

- U1 En fait, ce qui arrive avec les fentes de Young, c'est que premièrement tu crées une source ponctuelle, et ce qui arrive finalement c'est avec les deux fentes, tu crées une deuxième source ponctuelle, mais en phase : ils partent avec la même position sur leur longueur d'onde. Exemple : ils partent à 0 et commencent à onduler comme ça, comme une onde sur l'eau. Et ce qui arrive finalement, tout dépendant du point sur le détecteur ici, et en fait les ondes, la distance qu'ils ont passé, elle n'est pas égale à cause de la distance entre les deux [fentes], et ce qui arrive c'est que soit une onde a parcouru plus longtemps qu'une autre, et ce qui arrive c'est que les ondes entrent en phase ou en anti-phase. Et ce qui arrive c'est qu'on voit un patron, ou est-ce qu'ici que c'est très maximal, disons c'est comme à zéro lorsqu'ils ont passé la même distance. En fait ça a l'air d'un sinus carré. On voit finalement la nature ondulatoire. Si c'était particulière, mettons on verrait pas Alors c'est ça !
- I Est-ce que tu peux me dire dans quelles conditions expérimentales ce phénomène-là se produit ? Ce phénomène de superposition des ondes ? Dans quelles conditions on n'observe pas le patron, et qu'on observe plutôt deux taches [comme en optique géométrique ...]. Dans quelles conditions on peut utiliser l'optique géométrique classique, et dans quelles conditions il faut utiliser l'optique ondulatoire ?
- U1 Bien c'est quand tes sources sont de même fréquence et de même phase. Ici on a créé une source ponctuelle. Comme tu disais, une lampe de poche c'est une source aléatoire en fréquence, c'est toutes les fréquences possibles. [?] des fréquences différentes, tu ne peux pas interférer. Tu peux interférer quand c'est des fréquences quantifiées. Des multiples. Quand c'est n'importe quelles fréquences, ça ne va pas interférer, parce que c'est trop aléatoire. Ça te prend une source à une seule fréquence. Quand je te disais que c'était en phase, les sources auraient pu être déphasées, mais c'est qu'elles auraient toujours eu le même delta de phase

finalement. Finalement, il faut que tu envoies un laser. Si t'as une lampe de poche ça ne marche pas. C'est la différence entre la géométrie classique et géométrie ondulatoire comme tu dis. La géométrie classique c'est lorsque tu ne donnes pas de spécifications sur la lumière incidente, donc quand c'est toutes les fréquences possibles, toutes les phases possibles. Quand tu parles de diffraction ...

I Mais pour un laser, est ce que c'est automatiquement un patron d'interférence ?

U1 Non. Bien ... Il faut que tu divises le laser en deux pour qu'il y ait patron d'interférence.

I Mais si tu le prends assez large mettons.

U1 Je ne te suis pas ... Tu me dis avec un laser seul ... ?

I Avec un laser qui passe par la première fente, et tu mets la double fente un peu plus loin [description]. Est-ce que ça produit automatiquement un patron d'interférence sur l'écran qui est là ?

U1 Non, il faut que t'aies des largeurs de fentes assez petites.

I Ok, ça dépend de la largeur des fentes ?

U1 Oui. Ça prend des largeurs de fentes pour quoi ... hmmm.

I Ça fait longtemps ?

U1 Oui. ... Bien, c'est pour recréer des sources ponctuelles. Si les largeurs de fentes sont trop petites, ça fait de la diffraction ... Pas de la diffraction ... ça fait de [dessin]. Il faut que ta largeur de fente soit assez petite pour recréer une source ponctuelle. Donc il faut que ta largeur de fente soit de l'ordre de ta longueur d'onde de ta lumière incidente pour recréer des sources qui sera ponctuelles, pour justement avoir une différence entre des rayons qui partent de là et là. Ouais. Ou sinon ça va avoir l'air de sources trop éloignées. Faque il y a plusieurs conditions finalement, il y en a plus que je m'en souvenais. C'est ça !

Double fentes avec des électrons

Début : 38m 40s

I [Description] Qu'est-ce que ça veut dire ?

U1 Ça nous dit que l'électron est de nature ondulatoire aussi.

I Pourquoi peux-tu dire ça ?

U1 Car on voit que l'électron en fait interfère avec lui-même. En fait ici on ne le voit pas beaucoup quand il y a juste un électron, mais quand il y en a des milliards, on voit que l'électron passe jamais par là. Mais pourtant, classiquement, l'électron pourrait faire ça [geste] s'il voudrait. Mais il ne le fait pas. Donc on voit que finalement il y a comme interférence ici, dû à une certaine longueur d'onde, qui est connue. La longueur d'onde de de Broglie. Et pourquoi ça fait ça ? Bien, je vais te dire que ... pourquoi e le commutateur de X et P n'est pas nul ... on le sait pas. C'est la mécanique quantique : faut prendre ça pour de l'argent comptant !

I Même question que tantôt. Si tu prends un faisceau d'électrons, tu fais deux trous au hasard, sous certaines conditions, tu vas recevoir deux taches. Qu'est-ce qui fait que des fois on a deux taches d'électrons, et qu'est-ce qui fait que des fois on observe un patron d'interférence qui se construit progressivement ? C'est quoi la limite ?

XIV

- UI C'est la limite où la dualité onde-particule apparaît en fait. Quand tu commences à faire des expériences où l'ordre des grandeurs que tu utilises est très très très petit, du même ordre finalement que la longueur d'onde intrinsèque de la particule, qui est à peu près de la grosseur de la particule en tant que telle. Quand on regarde la lumière ici, en fait c'est souvent classique, presque tout le temps c'est classique, c'est comme si la lumière était comme de l'eau, comme des petites boules, comme des particules. On a toujours cru que c'étaient des petites particules qui venaient nous frapper les yeux. Quand on a fait ça, on a vu aussi que c'était une onde, pis qu'il y avait différentes longueurs d'onde. C'est arrivé la même chose avec la matière : d'habitude on voit toujours toujours ça comme des ... classiquement, des particules qui foncent partout. Mais là quand on utilise un schéma expérimental qui est très petit finalement, il y a des effets autres que la particule qui finissent par apparaître. Exactement comme on l'a fait avec la lumière. Quand on utilise un schéma expérimental qui est très très très petit, qui est de l'ordre de la grosseur de l'électron ... non plutôt de l'énergie ... hmmm ... mais bref, peu importe, il faudrait que je réétudies la question.
- I Peux-tu creuser un peu plus quand même, même si tu ne te sens pas tellement en confiance, sur ce que tu penses ?
- UI Sur le schéma expérimental ...
- I Mais qu'est-ce qui fait que le schéma expérimental fait en sorte que maintenant on observe un patron d'interférence ? Qu'est-ce qu'on pourrait modifier à partir d'un schéma expérimental initial pour l'amener à produire un patron d'interférence ?
- UI Bien c'est le même montage que dans les fentes de Young ...
- I Mais qu'est-ce qu'il faut changer dans le schéma expérimental ?
- UI Bien il faut rendre les grandeurs microscopiques au lieu de macroscopiques. Ça j'avoue que je ne dirais pas ça à des jeunes de 10-12 ans ! Il faut en fait que tu fasses apparaître la nature ondulatoire de la matière, puis ça c'est de l'ordre très très petit.
- I Et c'est quoi cet ordre très très très petit-là ? C'est de l'ordre microscopique, mais c'est quoi ... la taille de l'atome ? Comment tu fais pour définir ce qui est microscopique dans un schéma comme ça ?
- UI Bien là c'est la taille de l'électron. Oui. Mais non en fait il y a l'énergie qui rentre en ligne de compte. Parce que l'énergie d'une particule est reliée à sa longueur d'onde. Alors l'énergie de la lumière est reliée à sa longueur d'onde. L'énergie de la particule est-elle reliée à sa longueur d'onde ? ... Non, je pense que non. Euh ... Hmm. C'est une bonne question. Je pense que oui, que son énergie est reliée à sa longueur d'onde. Puis plus elle a de l'énergie, plus on est capable de travailler sur un schéma plus grand. Je ne sais pas ... Mais bref.
- I Puis, au lieu de prendre des électrons, qu'est-ce qui arriverait si on prenait des particules plus grosses, un proton, est-ce qu'on pourrait produire un patron d'interférence aussi ?
- UI Oui. T'es capable de produire un patron avec moi si je voulais, ce que serait peut-être trop difficile comme schéma expérimental !
- I Donc proton, hélium, tu serais capable.
- UI Carbone 60.

- I Carbone 60 même. Ce sont des molécules assez grosses. Donc il n'y a pas de limites finalement. Mais avec moi, si voulais me faire interférer avec moi-même, qu'est-ce qui faudrait faire mettons ?
- U1 Il faudrait te faire passer par une fente d'une grandeur, je ne sais pas, de 10^{-5} m. Et il faudrait que tous tes atomes soient envoyés dans la même direction, et que tout soit bien calculé. Tout comme moi je pourrais passer à travers du mur présentement si je voulais.
- I Est-ce que tu veux faire une démonstration ?
- U1 Non ça va aller ! Il n'y a pas assez de chances que je réussisse !
- I Dans le fond ce que tu me dis c'est que même pour les corps macroscopiques comme les nôtres, la mécanique quantique s'applique aussi.
- U1 Oui. Au pis aller oui.
- I Qu'est-ce que tu veux dire par là ?
- U1 Parce que c'est une relation asymptotique. Parce ce que en fait, ce qui arrive, c'est que lorsqu'on utilise des grandeurs très grandes, la mécanique quantique devient la mécanique classique. En fait ce que c'est, c'est comme je te disais tantôt, c'est que la mécanique classique explique, mais de façon incomplète : elle dit la vérité, mais pas toute la vérité. Tandis que la mécanique quantique, elle, elle va te dire toute la vérité. Puis que la mécanique classique va être une solution ... euh... asymptotique, une solution aux extrêmes finalement, à l'échelle macroscopique. Mais si j'applique la mécanique quantique sur toi, ça va donner des équations qui sont très correctes, qui vont donner de très bonnes valeurs, c'est juste que ça va être exactement pareil à la mécanique classique.
- I Mais pourquoi est-ce qu'on utilise la mécanique classique dans ce cas-là ? Pourquoi est-ce qu'on se réfère pas toujours à la mécanique quantique ?
- U1 Parce que la mécanique quantique, c'est impossible à appliquer à ... En fait, c'est possible à appliquer à quelque chose de macroscopique, mais c'est extrêmement complexe, en fait c'est impossible parce que ça prendrait 14 milliards de milliards d'ordinateurs sur la Terre pour calculer un pas que t'aurais fait. C'est pour ça qu'on utilise la mécanique quantique pour un électron seulement, et non pour 14 milliards d'électrons. Et puis déjà, résoudre l'équation pour un électron, ce n'est pas facile ! [...] J'ai fait ça justement ce matin ! [...]