

Université de Montréal

**Conception et évaluation d'une
intervention didactique
à propos des phases de la Lune
dans un planétarium numérique**

par

Pierre Chastenay

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 Doctorat (Ph. D.)
en sciences de l'éducation
option didactique

Mai 2013

© Pierre Chastenay, 2013

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Conception et évaluation
d'une intervention didactique
à propos des phases de la Lune
dans un planétarium numérique

présentée par :
Pierre Chastenay

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Jesús Vázquez-Abad, président-rapporteur
Marcel Thouin, directeur de recherche
Louise Poirier, membre du jury
Patrice Potvin, examinateur externe
Louise Poirier, représentante du doyen de la FES

Résumé

Depuis l'entrée en vigueur du Programme de formation de l'école québécoise en 2001, l'astronomie est à nouveau enseignée dans les classes du Québec. Malheureusement, l'école est mal outillée pour enseigner des concepts astronomiques complexes se déroulant pour la plupart en dehors des heures de classe et sur de longues périodes de temps. Sans compter que bien des phénomènes astronomiques mettent en jeu des astres se déplaçant dans un espace tridimensionnel auquel nous n'avons pas accès depuis notre point de vue géocentrique. Les phases de la Lune, concept prescrit au premier cycle du secondaire, sont de ceux-là. Heureusement, l'école peut compter sur l'appui du planétarium, musée de sciences dédié à la présentation, en accéléré et à toute heure du jour, de simulations ultra réalistes de divers phénomènes astronomiques.

Mais quel type de planétarium secondera l'école ? Récemment, les planétariums ont eux aussi subi leur propre révolution : ces institutions sont passées de l'analogique au numérique, remplaçant les projecteurs optomécaniques géocentriques par des projecteurs vidéo qui offrent la possibilité de se déplacer virtuellement dans une simulation de l'Univers tridimensionnel complètement immersive. Bien que la recherche en éducation dans les planétariums se soit peu penchée sur ce nouveau paradigme, certaines de ses conclusions basées sur l'étude des planétariums analogiques peuvent nous aider à concevoir une intervention didactique fructueuse dans ces nouveaux simulateurs numériques. Mais d'autres sources d'inspiration seront invoquées, au premier chef la didactique des sciences, qui conçoit l'apprentissage non plus comme la transmission de connaissances, mais plutôt comme la construction de savoirs par les apprenants eux-mêmes, avec et contre leurs conceptions premières. La conception d'environnements d'apprentissages constructivistes, dont le planétarium numérique est un digne représentant, et l'utilisation des simulations en astronomie, compléteront notre cadre théorique et mèneront à la conception d'une intervention didactique à propos des phases de la Lune dans un planétarium numérique s'adressant à des élèves âgés de 12 à 14 ans.

Cette intervention didactique a été mise à l'essai une première fois dans le cadre d'une recherche de développement (ingénierie didactique) visant à l'améliorer, à la fois sur son versant théorique et sur son versant pratique, par le biais de multiples itérations dans le milieu « naturel » où elle se déploie, ici un planétarium numérique gonflable de six mètres de diamètre. Nous présentons les résultats de notre première itération, réalisée en compagnie de six jeunes de 12 à 14 ans (quatre garçons et deux filles) dont nous avons recueilli les conceptions à propos des phases de la Lune avant, pendant et après l'intervention par le biais d'entrevues de groupe, questionnaires, mises en situation et enregistrement des interventions tout au long de l'activité. L'évaluation a été essentiellement qualitative, basée sur les traces obtenues tout au long de la séance, en particulier sous la voûte du planétarium. Ce matériel a ensuite été analysé pour valider les concepts théoriques qui ont mené à la conception de l'intervention didactique, d'une part, mais aussi pour faire émerger des améliorations possibles visant à bonifier l'intervention. Nous avons ainsi constaté que l'intervention provoque effectivement l'évolution des conceptions de la majorité des participants à propos des phases de la Lune, mais nous avons également identifié des façons de rendre l'intervention encore plus efficace à l'avenir.

Mots-clés : didactique des sciences, astronomie, planétarium numérique, enseignement au secondaire, phases de la Lune, recherche développement, ingénierie didactique

Abstract

Since the Quebec Education Program came into effect in 2001, Quebec classrooms have again been teaching astronomy. Unfortunately, schools are ill-equipped to teach complex astronomical concepts, most of which occur outside school hours and over long periods of time. Furthermore, many astronomical phenomena involve celestial objects travelling through three-dimensional space, which we cannot access from our geocentric point of view. The lunar phases, a concept prescribed in secondary cycle one, fall into that category. Fortunately, schools can count on support from the planetarium, a science museum dedicated to presenting ultra-realistic simulations of astronomical phenomena in fast time and at any hour of the day.

But what type of planetarium will support schools? Recently, planetariums also underwent their own revolution: they switched from analogue to digital, replacing geocentric opto-mechanical projectors with video projectors that offer the possibility of travelling virtually through a completely immersive simulation of the three-dimensional Universe. Although research into planetarium education has focused little on this new paradigm, certain of its conclusions, based on the study of analogue planetariums, can help us develop a rewarding teaching intervention in these new digital simulators. But other sources of inspiration will be cited, primarily the teaching of science, which views learning no longer as the transfer of knowledge, but rather as the construction of knowledge by the learners themselves, with and against their initial conceptions. The conception and use of constructivist learning environments, of which the digital planetarium is a fine example, and the use of simulations in astronomy will complete our theoretical framework and lead to the conception of a teaching intervention focusing on the lunar phases in a digital planetarium and targeting students aged 12 to 14.

This teaching intervention was initially tested as part of development research (didactic engineering) aimed at improving it, both theoretically and practically, through multiple iterations in its “natural” environment, in this case an inflatable digital planetarium

six metres in diameter. We are presenting the results of our first iteration, completed with help from six children aged 12 to 14 (four boys and two girls) whose conceptions about the lunar phases were noted before, during and after the intervention through group interviews, questionnaires, group exercises and recordings of the interventions throughout the activity. The evaluation was essentially qualitative, based on the traces obtained throughout the session, in particular within the planetarium itself. This material was then analyzed to validate the theoretical concepts that led to the conception of the teaching intervention and also to reveal possible ways to improve the intervention. We noted that the intervention indeed changed most participants' conceptions about the lunar phases, but also identified ways to boost its effectiveness in the future.

Keywords : science teaching, astronomy, digital planetarium, secondary school teaching, lunar phases, development research, didactic engineering

Table des matières

Introduction.....	1
1.0 Problématique.....	3
1.1 L’enseignement de l’astronomie et les défis de l’école québécoise	4
1.2 Le planétarium, lieu de diffusion de la culture scientifique et technique	9
1.3 De l’analogique au numérique : la révolution des planétariums.....	12
1.4 Modèle d’intervention didactique dans un planétarium numérique.....	16
1.4.1 La recherche en éducation dans les planétariums analogiques : bilan et critiques 17	
1.4.2 Initier le changement conceptuel au planétarium	20
1.4.3 Convergence du planétarium numérique et des environnements virtuels en éducation	25
1.4.4 Le planétarium et les environnements de réalité virtuelle comme environnements d’apprentissage constructivistes	27
1.4.5 Les simulations, des outils pour apprendre.....	29
1.5 Les phases de la Lune.....	32
1.6 Méthodologie et questions de recherche	36
1.7 Pertinence de la recherche	39
1.8 Retombées de la recherche.....	42
2.0 Cadre conceptuel	45
2.1 La recherche en éducation dans les planétariums	47
2.1.1 Introduction.....	47
2.1.2 L’éducation dans les planétariums : résultats de la recherche.....	50
2.1.2.1 L’impact affectif et comportemental du planétarium	50
2.1.2.2 Importance de la présence physique de l’animateur du planétarium.....	52
2.1.2.3 Importance du mot de bienvenue et de la « démystification » du planétarium.....	52
2.1.2.4 Le rôle unique du planétarium comme simulateur astronomique	53
2.1.2.5 Le planétarium et les capacités de projection et d’orientation spatiales	54
2.1.2.6 Importance de mener des activités concrètes sous la voûte du planétarium	58

2.1.2.7	L'impact visuel du planétarium.....	60
2.1.2.8	Évaluation des apprentissages sous la voûte du planétarium.....	61
2.1.2.9	Le planétarium et les conceptions des élèves.....	62
2.1.3	Conclusion : Les meilleures pratiques éducatives dans un planétarium	62
2.2	Conceptions d'élèves et changement conceptuel	67
2.2.1	Origine et caractéristiques des conceptions d'élèves.....	67
2.2.1.1	Comment les enfants apprennent les sciences ?.....	68
2.2.1.2	Une vision constructiviste de l'apprentissage	69
2.2.2	Prise en compte didactique et évolution des conceptions des apprenants	71
2.2.2.1	Le modèle « classique » de Posner, Strike, Hewson & Gertzog (1982).....	73
2.2.2.1.1	Description du modèle (fondements théoriques)	74
2.2.2.1.2	Quatre conditions pour le franchissement des conceptions.....	76
2.2.2.1.3	Application en situations d'apprentissage.....	80
2.2.2.1.4	Quelques critiques concernant le modèle de changement conceptuel de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982)	82
2.2.2.2	Les « modèles mentaux » de Vosniadou (1994)	83
2.2.2.2.1	Description du modèle (fondements théoriques)	84
2.2.2.2.2	Enrichissement vs révision : le changement conceptuel selon Vosniadou.....	88
2.2.2.2.3	Application en situations d'apprentissage.....	89
2.2.2.3	Le « savoir-en-pièces » de diSessa (1993).....	91
2.2.2.3.1	Description du modèle (fondements théoriques)	92
2.2.2.3.2	Le passage du sens physique naïf à expert selon diSessa	94
2.2.2.3.3	Application en situations d'apprentissage.....	96
2.2.2.3.4	Le débat diSessa vs Vosniadou	98
2.2.2.4	Le modèle d'apprentissage allostérique de Giordan (1989).....	101
2.2.2.4.1	Description du modèle (fondements théoriques)	101
2.2.2.4.2	Le changement conceptuel selon Giordan	103
2.2.2.4.3	Application en situations d'apprentissage.....	106
2.2.3	Conclusion	108
2.3	Environnements d'apprentissage constructivistes, réalité virtuelle et planétarium	113
2.3.1	Les environnement d'apprentissage constructivistes : conception et défis	114
2.3.2	La réalité virtuelle comme environnement d'apprentissage constructiviste	118

2.3.2.1	Qu'est-ce que la réalité virtuelle ?	119
2.3.2.1.1	Définition	119
2.3.2.1.2	Immersion et présence en réalité virtuelle immersive	120
2.3.2.1.3	L'importance d'une interface humain-technologie intuitive en réalité virtuelle immersive	124
2.3.2.2	Les environnements virtuels immersifs, des environnements d'apprentissage constructivistes ?.....	126
2.3.3	Le planétarium numérique, un environnement d'apprentissage constructiviste	130
2.3.4	Conclusion	131
2.4	Les simulations en astronomie, des outils pour apprendre.....	133
2.4.1	Les simulations en éducation.....	133
2.4.2	Simulations en astronomie dans des environnements de réalité virtuelle : exemples récents.....	136
2.4.2.1	La sphéricité de la Terre	136
2.4.2.2	Prise en compte des conceptions d'élèves pour favoriser la compréhension de phénomènes planétaires.....	139
2.4.2.3	Voyage imaginaire dans le système solaire.....	140
2.4.2.4	Un modèle tridimensionnel du trio Terre-Lune-Soleil pour l'enseignement de des phases de la Lune au primaire.....	142
2.4.3	Réalité virtuelle, environnements d'apprentissage constructivistes et échafaudage.....	144
2.4.4	Conclusion	148
2.5	Conclusion et questions de recherche	151
3.0	Méthodologie	153
3.1	La recherche de développement.....	154
3.1.1	Définition	155
3.1.2	Avantages et inconvénients de la recherche de développement.....	161
3.1.3	Recherche de développement et triangulation des données	163
3.1.3.1	Triangulation des données, des chercheurs et des méthodes.....	164
3.1.3.2	Objectivité, fiabilité et validité de la recherche de développement.....	166

3.1.3.3	Opérationnalisation des questions de recherche.....	168
3.2	Approche déductive de la recherche de développement	169
3.2.1	Constitution du corpus.....	170
3.2.2	Analyse de contenu.....	172
3.3	Approche inductive de la recherche de développement	174
3.4	Conclusion.....	177
4.0	Analyse et discussion.....	179
4.1	Introduction	179
4.2	Première partie : rencontre prétraitement.....	182
4.2.1	Présentation du chercheur et but de la recherche.....	182
4.2.2	Distribution des questionnaires prétraitements	183
4.2.3	Analyse des réponses aux questionnaires prétraitements	184
4.2.4	Mise en ordre des phases de la Lune.....	196
4.2.5	Modélisation du système Soleil-Terre-Lune.....	201
4.2.6	Utilisation de la fiche d'observation des phases de la Lune (le calendrier lunaire)	202
4.3	Deuxième partie : Séance dans le planétarium numérique.....	203
4.3.1	Entrée sous le dôme et présentation des équipements	203
4.3.2	Observation des phases de la Lune.....	204
4.3.3	Analyse des fiches d'observation des phases de la Lune (calendrier lunaire)	210
4.3.4	Observation des phases de la Lune : améliorations à apporter	211
4.3.5	Le mécanisme des phases de la Lune « démonté »	218
4.3.6	Décollage et vers la Lune.....	218
4.3.7	L'orbite lunaire	221
4.3.8	Vue polaire.....	225
4.3.9	Récapitulation.....	229
4.3.10	Les éclipses.....	230
4.3.11	Retour sur Terre.....	231
4.3.12	Modélisation des phases de la Lune	232
4.3.13	Les phases de Vénus	233
4.3.14	En route vers l'objet mystère... les phases de la Terre.....	236

4.3.15	Retour sur Terre (bis).....	239
4.4	Troisième partie : rencontre post-traitement.....	239
4.4.1	Questionnaires post-traitement.....	239
4.4.2	Les phases de la Lune dans les mots des participants.....	248
4.4.3	Appréciation de la séance par les participants.....	254
4.5	Conclusion	256
	Conclusion	259
	Bibliographie.....	271
	Annexe 1 : Principales conceptions d'élèves à propos du système Terre-Lune- Soleil et des phases de la Lune.....	I
	Annexe 2 : La recherche en éducation dans les planétariums : bibliographie commentée.....	VII
1.0	Aspects méthodologiques de la recherche en éducation dans les planétariums VIII	
1.1	La recherche en éducation dans les planétariums : aspects non scolaires	XIII
1.2	La recherche en éducation dans les planétariums : aspects scolaires.....	XV
1.2.1	Travaux préliminaires.....	XVI
1.2.1.1	Conclusion.....	XX
1.2.2	L'apprentissage : en classe ou au planétarium ?.....	XXI
1.2.2.1	Conclusion.....	XXXIII
1.2.3	L'apprentissage : en classe et au planétarium ?.....	XXXV
1.2.3.1	Conclusion.....	XL
1.2.4	Le planétarium : lieu d'apprentissage autonome.....	XLII
1.2.4.1	Conclusion.....	LXIII
1.2.5	Le planétarium, un médium audiovisuel.....	LXIV
1.2.5.1	Conclusion.....	LXVI
1.2.6	Le planétarium et les concepts de projection et d'orientation spatiales.....	LXVI
1.2.6.1	Conclusion.....	LXXV
1.2.7	Le planétarium comme outil d'évaluation.....	LXXV

1.2.7.1 Conclusion	LXXX
1.3 Conclusion.....	LXXX
Annexe 3 : Questionnaires pré- et post-tests utilisés.....	LXXXI
Annexe 4 : Fiche d'observation des phases de la Lune (le calendrier lunaire) ..	XCI
Annexe 5 : Réponses aux questionnaires post-tests ne montrant pas de différence significative par rapport aux réponses aux questionnaires pré-tests	CI

Liste des tableaux

<i>Tableau I : Principales conceptions d'élèves à propos du système Terre-Lune-Soleil et des phases de la Lune.....</i>	<i>I</i>
---	----------

Liste des figures

<i>Figure 1. Vue polaire d'un dôme de planétarium (le zénith est au centre de l'image) montrant les zones de projection de six projecteurs vidéo, cinq à l'horizon (numérotées de 1 à 5) et une au zénith (numéro 6). Des masques aux bords atténués (soft-edge) superposés aux tranches d'images issues de chacun des projecteurs permettent de réduire le chevauchement et estompent les frontières entre les zones, ce qui donne au final une image continue couvrant tout le dôme (voir figure 2). (Source : Loch Ness Productions)</i>	<i>13</i>
<i>Figure 2. Vue polaire (à gauche) et vue extérieure (à droite) d'une image pleine voûte projetée sur un dôme de planétarium par six projecteurs vidéo disposés selon le patron de la figure 1. Le chevauchement des images et les « coutures » d'un projecteur à l'autre sont imperceptibles. (Source : Loch Ness Productions).....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 3 : Processus type de la recherche de développement (d'après Brown (1992), Van der Maren (1996), Bannan-Ritland (2003), Gorard, Roberts & Taylor (2004) et Harvey & Loiselle (2009)).....</i>	<i>158</i>
<i>Figure 4. Vue extérieure du dôme gonflable à l'intérieur duquel a eu lieu l'intervention didactique. (Photo : Pierre Chastenay)</i>	<i>181</i>
<i>Figure 5. Dessins des participants en réponse à la question 3 du questionnaire prétest no 2.</i>	<i>186</i>
<i>Figure 6. Dessins des participants en réponse à la question 2 du questionnaire prétest no 3.</i>	<i>188</i>
<i>Figure 7. Dessins des participants en réponse à la question 4 du questionnaire prétest no 4.</i>	<i>193</i>
<i>Figure 8. Photographies plastifiées des principales phases de la Lune. (Photo : Pierre Chastenay)</i>	<i>196</i>
<i>Figure 9. Résultat du classement des photographies plastifiées des phases de la Lune par les participants. (Photos : Pierre Chastenay).....</i>	<i>200</i>
<i>Figure 10. Première scène de l'intervention didactique montrant un mince croissant de Lune au coucher du Soleil. Comme pour les images suivantes, le sud est au bas de l'image et l'ouest est à droite. Pour des raisons purement techniques, le système de projection tronque une partie de l'image, au nord. (Source : Sky-Skan Inc.).....</i>	<i>205</i>
<i>Figure 11. Positions successives de la Lune à la même heure d'un soir à l'autre marquées par des cercles rouges et illustrant le déplacement quotidien de la Lune vers l'ouest. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	<i>206</i>
<i>Figure 12. Le truc du « p » pour reconnaître le premier quartier et le distinguer du dernier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.).....</i>	<i>207</i>
<i>Figure 13. Le télescope et l'image agrandie de la Lune près de l'horizon ouest. (Source : Sky-Skan Inc.)..</i>	<i>208</i>
<i>Figure 14. La Lune et la Terre vues de l'espace et éclairées par le Soleil, à gauche. (Source : Sky-Skan Inc.).....</i>	<i>220</i>

<i>Figure 15. L'orbite de la Lune autour de la Terre, avec l'incrustation de l'image de la Lune telle que vue de la Terre. La Lune est au premier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	223
<i>Figure 16. Au dernier quartier, selon le point de vue choisi, la Lune vue de l'espace ressemble à un premier quartier, tandis que son aspect vu de la Terre est bien celui du dernier quartier. Cette situation a semblé confondre les participants. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	225
<i>Figure 17. Vue polaire de l'orbite de la Lune autour de la Terre avec la Lune au premier quartier. La lettre N sur la Terre indique la position du pôle nord terrestre et le télescope pointe en direction de la Lune au premier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	226
<i>Figure 18. Vue polaire de l'orbite de la Lune autour de la Terre avec la Lune au dernier quartier. On remarque que, vue de l'espace, la Lune ressemble encore à un premier quartier, tandis que, vue de la Terre (image encadrée en vert au bas de l'écran), il s'agit bien du dernier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	228
<i>Figure 19. Lors d'une éclipse totale de Soleil, la Lune projette son ombre sur la Terre, qui apparaît comme un petit point noir à gauche du centre du disque terrestre. Le Soleil est derrière nous, hors de l'image. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	231
<i>Figure 20. Vue polaire des orbites des planètes inférieures et de la Terre pour l'observation des phases de Vénus et de Mercure. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	234
<i>Figure 21. Les phases de la Terre vues de la surface de la Lune. (Source : Sky-Skan Inc.)</i>	236
<i>Figure 22. Dessins des participants en réponse à la question 3 du questionnaire post-test no 2.</i>	241
<i>Figure 23. Dessins des participants en réponse à la question 2 du questionnaire post-test no 3.</i>	243
<i>Figure 24. Dessins des participants en réponse à la question 4 du questionnaire post-test no 4.</i>	CIII

À Kim Lan, Mây, Charlie et Julie

Remerciements

Le présent travail n'aurait pas été possible sans le soutien indéfectible et la patience du Professeur Marcel Thouin, qui a guidé mes premiers pas dans le monde fascinant – mais souvent déroutant, pour le physicien que je suis – de la didactique des sciences. C'est lui qui m'a encouragé à poursuivre mes études au-delà de la maîtrise que j'avais entreprise sous sa tutelle, et qui m'a montré le chemin vers l'achèvement de la présente thèse. Il y eût bien des moments de découragement, mais Marcel a toujours su trouver les mots et prodiguer les conseils pour m'inciter à poursuivre, et je l'en remercie.

Mes remerciements vont également à mon employeur, la Ville de Montréal et plus spécifiquement le Planétarium de Montréal (devenu depuis le Planétarium Rio Tinto Alcan) et son Directeur, Monsieur Pierre Lacombe, qui m'ont encouragé dès le départ à entreprendre ces études, que ce soit par le biais d'horaires flexibles ou en me permettant de profiter du Programme de développement du capital humain de la Ville de Montréal. Je ne crois pas que j'aurais pu mener ce travail à bien sans cela.

Un merci tout spécial à quelques mentors qui m'ont accompagné de près ou de loin tout au long de mes études et avec qui j'ai eu des discussions fructueuses au-delà de ce qu'eux mêmes ont pu imaginer : les Professeurs Louise Poirier et Jesús Vázquez-Abad, du Département de didactique de l'Université de Montréal, pour leurs questions plus que pertinentes à l'examen de synthèse qui m'ont tant fait progresser dans ma réflexion et m'ont ouvert les yeux sur des avenues de recherche inédites; le Professeur Patrice Potvin, du Département de didactique de l'Université du Québec à Montréal, pour nos nombreuses discussions et pour le modèle de professeur-chercheur qu'il incarne à mes yeux; et le Professeur Jean-Guy Blais, du Département d'administration et fondements de l'éducation de l'Université de Montréal, pour sa rigueur et le grand art avec lequel il sait enseigner des concepts difficiles. Remerciements également aux autres professeurs et étudiants que j'ai côtoyé tout au long de mes études et qui sont trop nombreux pour qu'il soit possible de les nommer tous ici. Un merci tout spécial, enfin, à Mme Nicole Gaboury, Technicienne en

gestion des dossiers étudiants au Département de didactique, qui a toujours su me guider dans les dédales administratifs de l'Université de Montréal.

Un dernier mot pour remercier mes filles, Mây et Kim Lan, et ma petite-fille Charlie, qui ont su faire preuve de patience en voyant leur papa – et papy – travailler souvent les soirs et les fins de semaine. J'espère avoir tout de même été à la hauteur de leurs attentes dans mon rôle de père et de (nouveau !) grand-père et leur avoir inculqué cette vérité essentielle : quand on veut, on peut !

À Julie, enfin, merci pour ta patience et tes encouragements, tout est toujours plus facile avec toi !

Introduction

« Research is what I'm doing when I don't know what I'm doing. »
Wernher Von Braun (1912-1977)

La présente thèse est le fruit de dix années de travail, d'abord sous la forme d'un projet de maîtrise avec mémoire, maîtrise qui s'est muée en doctorat lorsqu'il est devenu clair que l'ampleur du programme de recherche envisagé par l'auteur dépassait de loin les exigences du programme de maîtrise.

Dix années ont été nécessaires pour mener ce projet à bien, d'abord et avant tout parce que l'auteur ne pouvait s'y consacrer à plein temps, œuvrant déjà comme Agent de programmation d'activités au Planétarium Rio Tinto Alcan de Montréal et poursuivant une carrière d'animateur à la télévision – sans compter l'accompagnement de deux charmantes filles à travers les années parfois tumultueuses de l'adolescence et de l'âge adulte. Ensuite, comme c'est souvent le cas dans le cadre de projets à si long terme, les objectifs de la recherche ont évolué au gré des lectures et de la réflexion du chercheur et de discussions avec de nombreux mentors, au premier chef le Professeur Marcel Thouin, qui a dirigé nos travaux.

Enfin, il faut également tenir compte du fait qu'au cours de cette décennie, le milieu des planétariums a subi une véritable révolution technologique, passant de systèmes de projections analogiques (projecteurs d'étoiles optomécaniques et projecteurs à diapositives) à des systèmes vidéo numériques qui ont permis pour la première fois de représenter les phénomènes astronomiques sous un autre angle que le seul point de vue géocentrique. Plus que tout autre facteur, cette évolution vers les planétariums numériques a eu un impact profond sur la direction de nos travaux et constitue le principal moteur du travail que nous présentons ici.

1.0 Problématique

« D'une part, beaucoup de musées et d'expositions scientifiques et techniques cherchent de plus en plus à retirer de leurs activités éducatives un supplément de légitimité; d'autre part, le système éducatif éprouve le besoin de s'ouvrir vers l'extérieur et en particulier d'utiliser les expositions comme ressources pédagogiques. Entre ces deux institutions, les démarches peuvent-elles se rejoindre dans la mesure où les objectifs, les pratiques, les systèmes d'analyse sont différents? »
Jack Guichard (1995, p. 95)

Il sera question dans le présent chapitre de la situation de l'enseignement de l'astronomie dans les écoles primaires et secondaires du Québec suite à l'introduction du Programme de formation de l'école québécoise par le Ministère de l'éducation du Québec en 2001. Nous proposerons que, face aux défis importants que l'enseignement de notions en astronomie pose aux écoles, le planétarium soit vu comme l'outil idéal pour faciliter l'apprentissage de ces notions par les apprenants. Cela soulèvera toutefois la question de savoir quelles sont les approches éducatives les plus efficaces et les plus fécondes à mener sous la voûte d'un planétarium, à l'heure où ces institutions vivent une véritable révolution numérique qui promet de bouleverser de façon durable les façons de faire issues d'un demi-siècle de pratique et de recherche.

Nous proposerons que ces façons de faire — elles-mêmes le sujet de nombreuses recherches savantes en éducation dont nous ferons plus loin une vaste recension — soient analysées à la lumière de trois autres champs de recherche autonomes et distincts de la recherche en éducation dans les planétariums, mais qui jettent un éclairage révélateur sur ces questions : la didactique des sciences, en particulier les courants constructiviste et socioconstructiviste qui s'intéressent aux conceptions des apprenants et aux conditions de leur évolution ou de leur franchissement; la création d'environnements d'apprentissage constructivistes et l'utilisation des environnements virtuels en éducation, dont bon nombre ont justement été développés pour promouvoir des apprentissages de notions astronomiques par les élèves; et enfin l'utilisation de simulations informatiques dans l'enseignement de notions astronomiques.

Nous proposerons en particulier que le planétarium numérique, vu comme un environnement d'apprentissage constructiviste et un environnement virtuel éducatif, soit le lieu d'une simulation tridimensionnelle réaliste des systèmes astronomiques qui sont à l'origine des phénomènes dont l'interprétation est difficile et source de nombreuses conceptions erronées chez les apprenants. Ultimement, tous les apports théoriques que nous venons d'invoquer nous conduiront à concevoir un scénario d'intervention didactique profitant des capacités accrues de simulation d'un planétarium numérique pour faciliter l'apprentissage de notions astronomiques par des élèves du premier cycle du secondaire, en particulier à propos du mécanisme des phases de la Lune.

Enfin, nous concluons le présent chapitre, qui se veut une mise en perspective de notre thèse, en présentant les éléments de méthodologie et les questions de recherche qui découleront de notre réflexion et de l'approche proposée, puis défendrons la pertinence et les retombées de la présente recherche.

1.1 L'enseignement de l'astronomie et les défis de l'école québécoise

Il existe peu de sujets aussi passionnants pour les élèves, peu importe leur âge, que l'astronomie et l'espace : leurs yeux brillent lorsqu'on leur parle de la Lune ou des planètes et leur imagination s'envole lorsqu'ils songent aux voyages en fusée, à l'exploration des galaxies ou aux trous noirs. Dans les mots de Jarman & McAleese (1996), « *there seems to be something inherent in the subject of astronomy itself which appeals to many of our young people* » (p. 225). Cet intérêt est également partagé par des élèves de différents groupes d'âge (Osborne, Simon & Collins, 2003), de même que par bien des adultes (Beare, 2007).

Ce n'est certainement pas la facilité des concepts astronomiques qui explique cet engouement, bien au contraire : l'astronomie est une science difficile et exigeante, tant par la somme colossale (certains diront astronomique) de connaissances à maîtriser, le caractère

abstrait de plusieurs de ses concepts théoriques, de même que la nécessité, pour bien saisir les mécanismes à l'œuvre, de coordonner plusieurs points de vue à la fois (Barnett, Yamagata-Lynch, Keating, Barab & Hay, 2005), ce que d'autres auteurs nomment *spatial awareness* (Parker & Heywood, 1998). Difficile, en effet, de comprendre le mécanisme des saisons, des phases de la Lune ou des éclipses si l'on ne peut se représenter le phénomène à la fois depuis la surface de la Terre (point de vue géocentrique) et depuis un autre point dans l'espace (point de vue allocentrique¹, voir Gazit, Yair & Chen, 2005). De telles habiletés spatiales sont complexes, mais essentielles pour la compréhension de phénomènes astronomiques variés, comme le souligne Sadler (1992) :

« Learning about the phases of the Moon, the light curves of binaries, the apparent motion of the Sun at different latitudes, or the appearance of galaxies all requires some agility with spatial thinking. Without the ability to imagine what objects look like from different perspectives, students will find many astronomical concepts virtually impossible to learn. » (Sadler, 1992, p. 103)

Une difficulté supplémentaire de l'enseignement de l'astronomie découle du fait que les échelles de dimension, de distance et de temps qui sont communes aux objets, aux phénomènes et aux systèmes astronomiques, nous sont totalement étrangères (Trumper, 2001; Bakas & Mikropoulos, 2003; Agan, 2004; Miller & Brewer, 2010). Engeström (1991) et Sadler (1998) signalent, par exemple, que la réalisation par l'apprenant que la Lune est très petite par rapport à la distance qui la sépare de la Terre est essentielle pour assimiler le fait que ce ne peut pas être l'ombre de la Terre projetée sur la Lune — une conception fréquente chez les élèves et bon nombre d'adultes — qui est responsable des phases, mais bien l'ombre que la Lune projette sur elle-même (sa moitié sombre, en quelque sorte).

Enfin, notre expérience quotidienne exclusivement géocentrique du ciel fait naître en chacun de nous une foule de conceptions qui sont très souvent loin de la vision

¹ Allocentrique : de allo-, préfixe qui signifie autre, différent, et -centrique, du centre.

scientifique soutenue par les astronomes professionnels (Nussbaum, 1985; Thouin, 1997). L'histoire de l'astronomie nous enseigne qu'il en a été de même pour l'humanité entière et qu'il aura par exemple fallu des siècles aux savants et aux philosophes pour se débarrasser de l'idée que nous étions situés au centre du cosmos (Crowe, 2001).

Malgré ces difficultés, mais sans doute en reconnaissant que l'astronomie est une science fondamentale dont les notions de bases sont utiles pour comprendre le monde qui nous entoure, le nouveau Programme de formation de l'école québécoise en vigueur depuis un peu plus d'une décennie demande aux enseignants d'aborder en classe de nombreux concepts astronomiques, qu'il s'agisse de savoirs essentiels au primaire ou de concepts prescrits au secondaire (Ministère de l'éducation du Québec (MEQ), 2001, p. 149 et 158-159). Il s'agit d'une nouveauté, puisque les anciens programmes scolaires québécois ne contenaient peu ou pas de référence à l'astronomie; l'étude de la place de la Terre dans l'espace, ses mouvements et leurs conséquences (mouvement diurne et saisons) dans le cadre du cours de géographie de la première année du secondaire constituait l'exception à la règle. Le retour de l'astronomie dans les programmes scolaires est également une tendance forte en occident depuis la fin des années 1980 (Lelliott & Rollnick, 2010).

L'école québécoise fait toutefois face à un défi de taille si elle désire enseigner l'astronomie en ses murs de façon efficace. Au vu des difficultés identifiées plus haut à propos de la compréhension des concepts astronomiques par les apprenants, l'enseignement de l'astronomie en classe pose en effet plusieurs problèmes particuliers et mène rarement à des apprentissages durables (Kavanagh, Agan & Sneider, 2005). L'astronomie y est le plus souvent livresque (Allard & Boucher, 1991), c'est-à-dire que son enseignement s'appuie sur des représentations bidimensionnelles des phénomènes astronomiques (photographies, dessins, diagrammes, etc.) qui ne reflètent pas la complexité tridimensionnelle de la situation réelle (Parker & Heywood, 1998; Whitehorne, 2003; Fluke & Barnes, 2008). Même lorsque les représentations bidimensionnelles sont remplacées par des images et des animations 3D, la compréhension n'est pas toujours au rendez-vous (Cid & Lopez, 2010). Certaines représentations qui tronquent l'échelle du système représenté, n'offrent qu'une

seule perspective, ou dont l'interprétation est difficile pour l'apprenant peuvent même être à l'origine de nouvelles conceptions chez les élèves (Engeström, 1991; Mathewson, 1999; Dunlop, 2000; Diakidoy & Kendeou, 2001; Martinez Pena & Gil Quilez, 2001; Kikas, 2006; Trundle, Troland & Pritchard, 2008, plus particulièrement pour les phases de la Lune; Taylor & Grundstrom, 2011). Un exemple parmi d'autres est la représentation du ciel étoilé comme une distribution de points noirs sur un fond blanc, un ciel en « négatif », en quelque sorte (Ankney, 1981). Une mauvaise compréhension et une utilisation erronée du vocabulaire astronomique (par exemple, la confusion fréquente entre rotation et révolution) est également à blâmer dans de nombreux cas (Parker & Heywood, 1998; Dove, 2002).

De plus, de nombreuses recherches menées dans les planétariums depuis plus de cinq décennies ont constaté que les connaissances acquises en classe ne sont pas facilement transposées dans un contexte d'observation du vrai ciel ou de celui, simulé, du planétarium (Dean & Lauck, 1972; Bondurant, 1975; Hayward, 1975; Bishop, 1980a; Ankney, 1981). Par exemple, la reconnaissance des constellations dans un planétarium ou à l'extérieur, une activité fondamentale pour qui veut apprivoiser le ciel étoilé et y trouver des repères, pose une difficulté majeure aux élèves ayant étudié des représentations bidimensionnelles de ces mêmes constellations en classe (Smith, 1974a; 1974b; 1974c; 1976; 1977; 1978).

L'observation directe de phénomènes astronomiques durant les heures normales de classe pose elle aussi problème. D'abord, la grande majorité des objets et phénomènes astronomiques ne sont visibles que la nuit, ce qui pose des problèmes de sécurité et de logistique si l'on veut faire réaliser de telles observations par de jeunes enfants. Seules exceptions, l'observation du Soleil, son mouvement apparent diurne, les éclipses solaires et certaines phases de la Lune peuvent faire l'objet d'observations de jour, mais de telles observations sont nécessairement limitées. D'autre part, beaucoup de phénomènes astronomiques se déroulent sur de longs intervalles de temps, de quelques semaines (les phases de la Lune) à quelques mois (les saisons). Si on ajoute à ces facteurs les périodes de météo inclementes où le ciel est voilé par d'épais nuages, on comprend à quel point

l'observation en continu de ces phénomènes astronomiques pose d'insurmontables problèmes en contexte scolaire.

Que dire des logiciels qui permettent de reproduire le ciel étoilé à l'écran de l'ordinateur, instrument d'apprentissage aujourd'hui présent dans la majorité des salles de classes du Québec ? Ils ont un certain mérite, entre autres celui de simuler de façon précise les mouvements du ciel et les phénomènes qui s'y déroulent, en plus d'offrir, pour certains logiciels plus avancés, de multiples points de vue (géocentrique et allocentrique) à l'utilisateur. Par exemple, Bell & Trundle (2008), Hobson, Trundle & Saçkes (2010), Trundle & Bell (2010) et Trundle et Hobson (2011) ont démontré l'efficacité d'une approche didactique visant l'évolution des conceptions d'étudiants de divers groupes d'âge à propos des phases de la Lune en utilisant un logiciel d'astronomie (géocentrique uniquement) pour faciliter et accélérer l'observation de la séquence des phases de la Lune pendant quelques mois.

Mais les ordinateurs sont des « fenêtres-sur-le-monde » bidimensionnelles qui, contrairement à l'environnement immersif du planétarium, partitionnent une toute petite fraction du champ visuel de l'utilisateur (Psocka, 1995) et ne permettent pas de reproduire l'expérience « d'être là » (Jelfs & Whitelock, 2000) qui est si particulière sous la voûte du planétarium ou sous le vrai ciel étoilé. Contrairement à l'expérience du ciel ou de celui simulé par un planétarium, qui constitue une interaction naturelle menant à des savoirs directs et non symboliques, l'expérience médiatisée par l'ordinateur et ses interfaces (écran, clavier, souris et autres) demeure plutôt artificielle, conduisant à des apprentissages moins profonds et moins durables (Winn, 1993).

Le planétarium peut heureusement remédier aux lacunes de l'enseignement de l'astronomie en classe et ce, de plusieurs façons. D'abord, les équipements de projection regroupés au sein d'un théâtre de planétarium — au premier chef le projecteur d'étoiles, ou projecteur optomécanique, généralement situé au centre de la salle — permettent au spectateur d'observer en détail le mécanisme de divers phénomènes astronomiques (Hagar, 1973; 1974; 1980). De plus, les projections dans un théâtre de planétarium respectent

généralement l'échelle des objets astronomiques représentés, par exemple lors de la simulation du ciel étoilé. Le planétarium permet également de simuler en plein jour des phénomènes qui ne sont visibles que la nuit. Ajoutons que, à cause de la pollution lumineuse² qui illumine de plus en plus le ciel des villes et nous voile les étoiles, le planétarium est souvent le seul endroit où les jeunes citadins ont encore accès à un ciel étoilé de qualité.

Le planétarium permet en outre d'accélérer le passage du temps et de simuler en quelques secondes des phénomènes qui durent des semaines ou des mois, parfois même plus. Enfin, le planétarium offre une expérience d'immersion globale en remplissant complètement le champ de vision du spectateur avec un écran surdimensionné (Lowry, 1984; Tan, Gergle, Scupelli, & Pausch, 2003; 2004), mieux encore que les simulateurs de réalité virtuelle les plus sophistiqués de type *CAVE* (*Cave Automatic Virtual Environment* (Youngblut, 1998)). Le geste naturel de tourner la tête pour apercevoir différentes sections du ciel, couplé aux signaux envoyés au cerveau par l'oreille interne lors du déplacement de la tête et de tout le corps, consolident l'illusion que le spectateur se trouve sous le vrai ciel étoilé (Psootka, 1995).

1.2 Le planétarium, lieu de diffusion de la culture scientifique et technique

En plus de remédier aux lacunes de l'école en ce qui concerne la présentation de phénomènes astronomiques, une collaboration accrue entre le planétarium et l'école fait également écho à un aspect important du nouveau Programme de formation de l'école québécoise, qui est justement la présentation de repères culturels, vus comme « des ressources de l'environnement social et culturel pouvant contribuer au développement des

² Voir à ce sujet http://www.astrolab-parc-national-mont-megantic.org/fr/pollution_lumineuse.htm

compétences [des élèves] » (MEQ, 2001, p. 9). Le planétarium est un musée³ de science et, à ce titre, il constitue un important lieu de diffusion de connaissances scientifiques et techniques liées à l'astronomie, aux sciences de l'espace et à l'exploration spatiale. De ce fait, il s'inscrit dans le domaine de la culture scientifique et technique, elle-même partie intégrante de la culture au sens large, définie comme « l'ensemble des traits distinctifs, spirituels et matériels, intellectuels et affectifs, qui caractérisent une société ou un groupe social » (UNESCO, 1982, p. 1).

Dans un mémoire publié en 1995, la Société pour la promotion de la science et de la technologie (SPST) insistait déjà sur la complémentarité de l'école et des musées de science — dont les planétariums — en écrivant que « les activités [dans les musées de science] ne se substituent pas à l'école, elles lui sont complémentaires » (SPST, 1995, p. 8). La SPST poursuivait en ajoutant que « l'action de l'école est renforcée par un ensemble d'activités parascolaires ou extrascolaires qui permettent un approfondissement personnel et un élargissement des expériences, ainsi qu'une prise de conscience des domaines d'application des sciences et des technologies » (p. 8). La SPST souligne ainsi l'importance des musées de science pour contextualiser les savoirs et les connaissances enseignés à l'école.

Dans son rapport de 2002 sur la culture scientifique et technique des Québécoises et des Québécois, le Conseil de la science et de la technologie du Québec (CST) signale également qu'une « action plus efficace à l'égard des groupes cibles [dont les groupes scolaires] suppose aussi qu'on investisse de nouveaux domaines et de nouveaux réseaux de diffusion ou qu'on ouvre de nouveaux espaces de découverte et d'expérimentation » (CST, 2002, p. 174). Le Conseil conclut en écrivant que la place que les sciences et la technologie

³ « Un musée est une institution permanente sans but lucratif au service de la société et de son développement ouverte au public, qui acquiert, conserve, étudie, expose et transmet le patrimoine matériel et immatériel de l'humanité et de son environnement à des fins d'études, d'éducation et de délectation. » (ICOM, 1989).

trouveront dans la formation des jeunes « dépendra de l'ouverture que démontre l'école à l'égard du rôle complémentaire des intervenants en culture scientifique et technique [...] » (p. 175), intervenants dont le planétarium fait bien entendu partie. C'est dans le contexte d'une sortie scolaire au planétarium que cette complémentarité prend tout son sens :

« [Bien que] l'école ne soit pas considérée comme l'unique référent pour l'éducation, ou que le musée ne puisse pas être défini comme l'égal de l'école, ces deux institutions sont liées l'une à l'autre par une certaine forme de complémentarité. [...] Ces deux institutions doivent devenir, durant [la sortie scolaire au musée], de véritables partenaires, malgré l'existence de nombreuses différences entre ces deux mondes. » (Cohen, 2001, p. 17)

On retrouve une préoccupation similaire sous la plume d'Allard, Larouche, Lefebvre, Meunier & Vadeboncoeur (1995) :

« Certes, il ne faut pas confondre le musée et l'école, car ces institutions possèdent respectivement leur propre dynamisme. Loin de s'opposer, elles abordent la réalité sous des angles différents. Les recherches ont prouvé qu'il faut assurer, sinon la symbiose du moins la collaboration entre le musée et l'école. Toutefois, le musée peut devenir un partenaire important de l'école, capable d'offrir une approche pédagogique différente, tout en étant complémentaire. » (Allard, Larouche, Lefebvre, Meunier & Vadeboncoeur, 1995)

Ainsi, parce que le planétarium constitue le lieu idéal pour simuler un grand nombre de phénomènes astronomiques courants impossibles à observer durant les heures normales de classe et que, en sa qualité de musée de science et haut lieu de diffusion de la culture scientifique et technique, il complète, enrichit et contextualise l'expérience scolaire, nous proposons que l'école, pour réussir sa mission éducative en astronomie, aurait avantage à forger une alliance stratégique avec le milieu des planétariums. La question est cependant de savoir avec quel type de planétarium cette alliance doit être établie, car une véritable révolution bouleverse en ce moment le monde des planétariums, au Québec et à travers le monde.

1.3 De l'analogique au numérique : la révolution des planétariums

Le planétarium moderne est à un tournant de son histoire. Depuis près d'un siècle, les projecteurs optomécaniques qui sont au cœur de ces institutions, machines complexes dotées de moteurs, d'engrenages et de projecteurs analogiques, ont présenté une vision essentiellement géocentrique de l'Univers, reproduisant fidèlement ce qu'un observateur à la surface de la Terre était à même de voir sous le vrai ciel étoilé. Mais depuis une quinzaine d'années, une nouvelle technologie de projection vidéo numérique prend le pas sur ces instruments analogiques et promet de libérer l'observateur du géocentrisme pour lui permettre de voyager — virtuellement — dans l'ensemble de l'Univers observable (Ruiz & Acker, 2006).

Cette nouvelle technologie numérique fait appel aux performances accrues de projecteurs vidéos haute définition (d'abord développés pour remplacer les projecteurs à pellicule dans les salles de cinéma) ainsi qu'aux capacités de calcul décuplées des cartes graphiques des ordinateurs modernes. À l'aide d'une batterie de projecteurs vidéos et de logiciels de traitement d'images sophistiqués, n'importe quelle image vidéo circulaire (une « pastille », selon la terminologie utilisée dans l'industrie) peut ainsi être projetée sur la voûte d'un planétarium comme une seule image qui remplit complètement le champ de vision du spectateur, sans que les chevauchements entre les sections d'images issues des différents projecteurs vidéo ne soient visibles (Butterfield, 2001; Dickenson, Leverton & McLennan, 2002; Lantz, 2002; 2007) (voir figures 1 et 2).

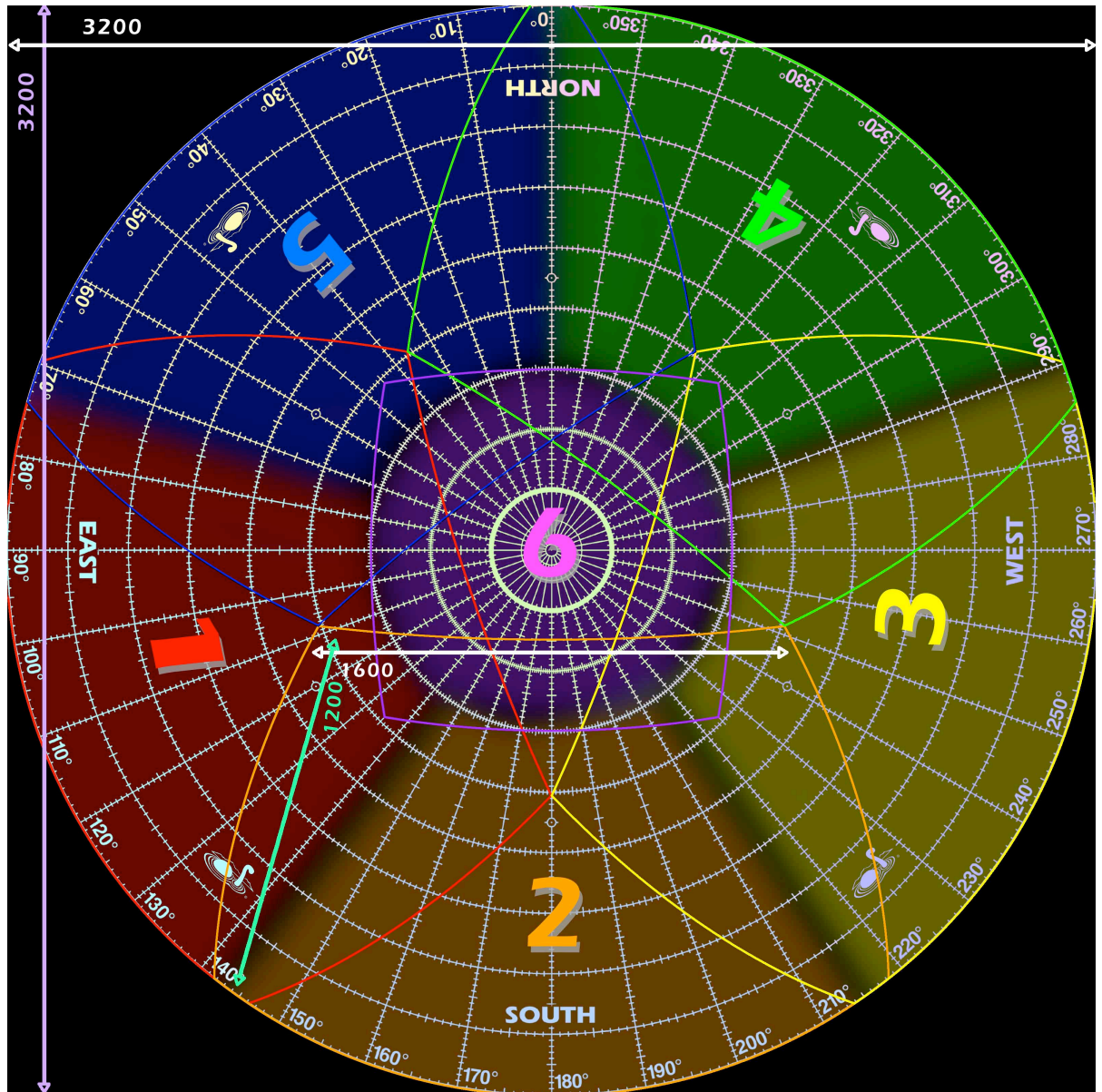


Figure 1. Vue polaire d'un dôme de planétarium (le zénith est au centre de l'image) montrant les zones de projection de six projecteurs vidéo, cinq à l'horizon (numérotées de 1 à 5) et une au zénith (numéro 6). Des masques aux bords atténués (*soft-edge*) superposés aux tranches d'images issues de chacun des projecteurs permettent de réduire le chevauchement et estompent les frontières entre les zones, ce qui donne au final une image continue couvrant tout le dôme (voir figure 2). (Source : Loch Ness Productions)

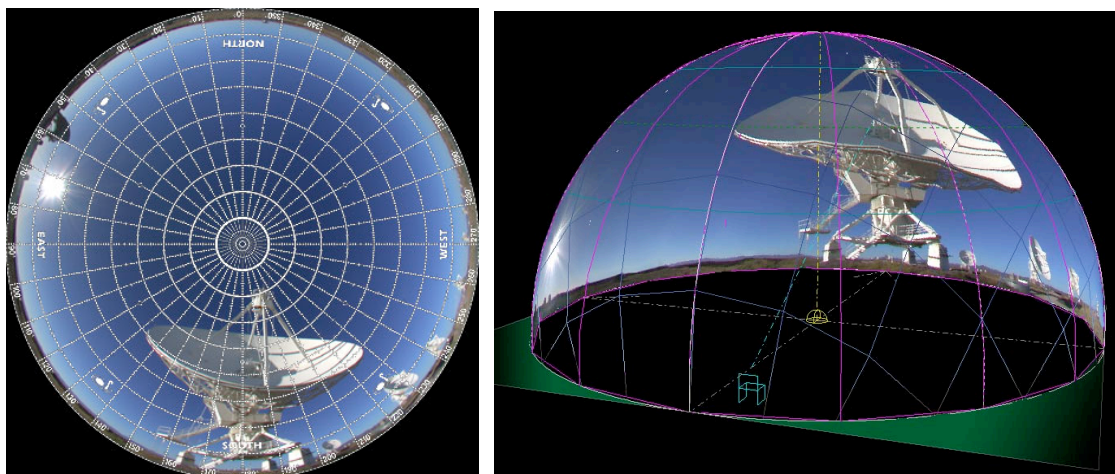


Figure 2. Vue polaire (à gauche) et vue extérieure (à droite) d'une image pleine voûte projetée sur un dôme de planétarium par six projecteurs vidéo disposés selon le patron de la figure 1. Le chevauchement des images et les « coutures » d'un projecteur à l'autre sont imperceptibles. (Source : Loch Ness Productions)

En naviguant dans des bases de données astronomiques de plus en plus imposantes contenant les coordonnées exactes de millions d'étoiles et de galaxies, et grâce aux puissantes cartes graphiques qui transposent en temps réel ces données en images tridimensionnelles hautement réalistes, le spectateur peut entreprendre un voyage continu depuis la Terre jusqu'aux confins de l'Univers, un voyage à la fois riche sur le plan intellectuel et bouleversant sur le plan émotif.

Plus important encore, le spectateur n'est désormais plus confiné à l'observation de l'Univers depuis la surface de la Terre, mais peut s'en affranchir pour observer des phénomènes astronomiques depuis le point de vue qui lui plaira. On passe ainsi du géocentrisme à ce que nous avons déjà désigné sous le terme d'allocentrisme. Cette capacité de montrer un phénomène astronomique sous différents angles et à des échelles différentes constitue peut-être la plus grande révolution, d'un point de vue didactique et pédagogique, puisqu'elle permet enfin à l'apprenant de réconcilier visuellement les diverses facettes d'un même phénomène, une étape critique vers la compréhension des

mécanismes parfois subtils qui sont à l'œuvre derrière les manifestations astronomiques (Gazit, Yair & Chen, 2005).

La multiplicité des points de vue permet également d'éviter l'ornière de la vision exclusivement géocentrique du ciel qui est, nous l'avons déjà souligné, à l'origine de bon nombre de conceptions chez les apprenants de tous âges. En effet, une séance sous la voûte d'un planétarium géocentrique ne peut vraisemblablement que renforcer la vision naïve d'un ciel en forme de bol renversé au-dessus d'une Terre plate. Les mouvements simulés des corps célestes qui y sont démontrés donnent également aux spectateurs l'impression que le ciel tourne autour d'eux, renforçant encore davantage les conceptions géocentriques. Thouin (1997) a d'ailleurs recensé plusieurs mécanismes d'élaboration à l'origine des conceptions géocentristes, des inférences basées « [...] sur le fait que tous les astres semblent tourner autour de la Terre » (p. 369), « [...] sur l'impression que les étoiles sont fixées à une voûte céleste immobile » (p. 374) et « [...] sur le fait que l'on ne sent pas la Terre tourner » (p. 376). De manière plus générale, ces conceptions s'élaborent de manière naturelle par « [...] l'observation de la Terre et de l'atmosphère dans la vie de tous les jours » (p. 376). Les mêmes causes ayant généralement les mêmes effets, il nous apparaît évident qu'une séance sous la voûte d'un planétarium reproduisant de manière fidèle l'apparence et les mouvements de la voûte céleste tels qu'on peut les observer tous les jours ne pourra que renforcer ces mêmes conceptions. La situation devrait bien sûr être différente dans un planétarium numérique affranchi de ces limites géocentriques, mais l'évaluation du potentiel éducatif des planétariums numériques reste à faire (Yu & Sahami, 2007).

Qu'en est-il du Planétarium de Montréal, où l'auteur de la présente thèse est Agent de programme éducatif ? Depuis 2009, l'équipe du Planétarium de Montréal travaille de concert avec une firme d'architectes et d'ingénieurs, de même qu'avec divers consultants, à la construction d'une nouvelle institution, le Planétarium Rio Tinto Alcan, qui a été érigé sur le site du Parc olympique de Montréal, au pied de la tour du Stade olympique et en face du Biodôme de Montréal. Ce nouveau planétarium abrite non pas un, mais deux théâtres

des étoiles, tous deux équipés de systèmes de projection numériques pleine voûte permettant l'observation de phénomènes astronomiques depuis différents points de vue. Cette nouvelle institution a été inaugurée le 6 avril 2013.

Les théâtres du nouveau Planétarium n'étaient malheureusement pas encore disponibles en 2012, au moment de tester les nouvelles approches éducatives de notre modèle d'intervention didactique dans un planétarium numérique pour l'enseignement du mécanisme des phases de la Lune. Nous avons donc mis à profit un planétarium portable, muni d'un projecteur vidéo numérique doté d'une lentille de type grand-angle (*fish-eye*) et projetant sur un dôme gonflable de six mètres de diamètre. C'est dans cet environnement, similaire à un théâtre de planétarium de plus grand format, que nous avons évalué notre intervention didactique auprès d'un petit groupe d'élèves de 10 à 12 ans (début du secondaire). Nous décrirons plus en détail notre approche et les technologies utilisées dans le chapitre consacré à la méthodologie.

1.4 Modèle d'intervention didactique dans un planétarium numérique

Sur quoi nous appuierons-nous pour concevoir et développer un modèle d'intervention didactique dans un planétarium numérique? Notre première source d'inspiration sera constituée d'une somme importante de recherches menées depuis 1970 dans le milieu des planétariums et cherchant à comprendre les phénomènes éducatifs sous la voûte d'un théâtre des étoiles. On pourrait penser que l'essor des planétariums numériques rend caduques ces nombreuses recherches, mais nous sommes d'avis qu'au contraire, les travaux réalisés dans le milieu des planétariums traditionnels ont encore beaucoup à nous apprendre à propos de l'apprentissage de notions de base en astronomie dans un planétarium. Ce sera donc un matériau précieux qui fera l'objet d'une vaste recension dans le cadre de la présente thèse, comme nous le développerons au point suivant (1.4.1).

D'autre part, nous trouverons aussi l'inspiration du côté de trois domaines de recherche qui, à notre connaissance, n'ont jamais été invoqués à l'appui de l'enseignement dans un planétarium, mais qui ont, à notre avis, beaucoup à nous apporter : les approches constructivistes et socioconstructivistes de l'apprentissage, en particulier les théories du changement conceptuel développées par les didacticiens des sciences; les environnements d'apprentissage constructivistes, en particulier les environnements virtuels immersifs en éducation dont le planétarium numérique fait partie; et finalement, l'utilisation de simulations astronomiques tridimensionnelles réalistes dans un contexte éducatif. Nous aborderons ces nombreuses sources d'inspiration, qui seront autant de points d'ancrage théoriques au service de notre modèle d'intervention didactique, aux points 1.4.2 à 1.4.5.

1.4.1 La recherche en éducation dans les planétariums analogiques : bilan et critiques

On a longtemps cru que le planétarium, parce qu'il était un outil de simulation scientifique réaliste et flexible, était également un moyen d'enseignement sûr et efficace (Fowler, 1960). Armand N. Spitz, fondateur d'une compagnie étasunienne qui allait devenir un chef de file mondial dans la fabrication de projecteurs optomécaniques pour les planétariums, a même déjà décrit le planétarium comme « *the greatest teaching instrument ever invented* » (Abbatantuono, 1994).

Des chercheurs ont tenté à plusieurs reprises depuis le début des années soixante-dix de mettre en évidence les avantages éducatifs des planétariums de manière scientifique. Nous avons ainsi recensé un peu plus d'une centaine de thèses, mémoires, articles de revues ou chapitres d'ouvrages savants qui, chacun à sa manière, abordaient cette importante question. L'annexe 2 présente une recension critique complète de ces textes, tandis que la section 2.1 du chapitre consacré à notre cadre conceptuel en résume les points saillants. Conclut-on, à la lecture de ces recherches, que le planétarium est à la hauteur des attentes exprimées par Armand N. Spitz et bien d'autres promoteurs des planétariums ? Oui et non :

tout dépend de la façon dont la séance sous le dôme du planétarium est menée, de la personne qui l'anime, des notions astronomiques abordées, de l'âge des élèves et de la manière dont leurs apprentissages ont été évalués. Et il n'est ici bien sûr question que des planétariums analogiques dotés de systèmes de projection géocentriques, puisque peu ou pas de recherches de ce type ont été menées jusqu'à présent sous la voûte des nouveaux planétariums numériques (Yu & Sahami, 2007).

Par exemple, selon les résultats des nombreuses recherches consultées dans le cadre de notre propre étude, le planétarium demeure l'endroit idéal pour aborder des notions astronomiques qui font appel à ses capacités de simulation de phénomènes astronomiques (Heyde, 1972; Reed, 1973; Hayward, 1975; Mergler, 1975; Bishop, 1976; Friedman, Schatz & Sneider, 1976; Sunal & Sunal, 1977; Nevius, 1980; Urke, 1993; Rusk, 2003; Palmer, 2007; Brazell & Espinoza, 2009), mais une séance de planétarium devrait idéalement s'inscrire à l'intérieur d'une séquence entreprise et conclue en classe (Reed, 1970; Yee, Baer & Holt, 1971; Reed & Campbell, 1972; Sunal, 1973; Urke, 1993). Les élèves plus jeunes (Ridky, 1973; Twiest, 1989; Brazell & Espinoza, 2009), ceux dont les résultats scolaires sont plus faibles que la moyenne (Urke, 1993) ou qui proviennent de milieux socioéconomiques plus défavorisés (Rusk, 2003) semblent profiter davantage d'une visite au Planétarium, à cause de son caractère plus « concret » et des images mentales qu'il permet de créer chez eux et celles qui ont moins facilement accès au ciel étoilé. Le planétarium permet en outre le développement d'une attitude positive par rapport à l'astronomie et aux sciences et il possède un pouvoir attractif et motivationnel important (Reed, 1970; Jamison, 1972; Reed & Campbell, 1972; Ridky, 1973; Mergler, 1975; Reed, 1975; Burnette, 1976; Ortell, 1977a; 1977b; Bishop, 1980a; Mallon, 1980; Mallon & Bruce, 1982; Sumners, 2001).

Il ressort également des résultats obtenus par plusieurs chercheurs que les capacités de projection et d'orientation spatiales des élèves (leur capacité à se représenter une situation de plusieurs points de vue à la fois) constituent un facteur important qui facilite leurs apprentissages sous la voûte d'un planétarium (Etheridge, 1976; Bishop, 1980a;

Sonntag, 1981; 1987). Une séance de planétarium peut heureusement améliorer les capacités de projection et d'orientation spatiales des spectateurs, en particulier celles des élèves dont les résultats scolaires sont plus faibles (Battaglini, 1971; Bondurant, 1975; Hayward, 1975; Bishop, 1978; 1980a; Sonntag 1982; 1987; 1988a; 1988b; 1989; Friedman, Lowry, Pulos, Schatz & Sneider, 1993; Baxter & Preece, 2000) et des jeunes filles⁴ (dont les capacités de projection et d'orientation spatiales sont généralement plus faibles que celles des garçons du même âge, selon, entre autres, Linn & Petersen (1985) et Hacker (1986)).

Plusieurs auteurs arrivent à la conclusion que les séances interactives menées sous la voûte d'un planétarium impliquant le travail d'équipe, le mentorat, la manipulation de modèles tridimensionnels, le jeu de rôle, l'approche kinesthésique, la prise de notes, la réalisation de croquis et d'autres activités concrètes, favorisent l'apprentissage de notions astronomiques (Mergler, 1975; Schafer, 1977; Friedman, Schatz & Sneider, 1976; Beetle, 1978; Mallon, 1980; Mallon & Bruce, 1982; Edoff, 1982; Bishop, 1988; Reynolds, 1990; Baxter & Preece, 2000; Rusk, 2003; Plummer, 2009). Ceci semble particulièrement vrai chez les plus jeunes élèves (Bishop, 1977a; 1977b; 1980a). De plus, la présence physique d'un animateur sous la voûte du planétarium est un important facteur facilitant les apprentissages (Mallon, 1974; Fletcher, 1977).

Finalement, comme on l'a déjà mentionné, il semble que l'évaluation des connaissances acquises dans l'environnement virtuel du planétarium devrait idéalement se faire sous la voûte d'un planétarium ou sous le vrai ciel, plutôt que par le biais de questionnaires bidimensionnels (papier et crayon) qui ne mesurent apparemment pas le

⁴ Notons que Wilhelm (2009) obtient elle aussi des résultats encourageants concernant l'amélioration des capacités de projection et d'orientation spatiales des jeunes filles dans un contexte d'apprentissage du mécanisme des phases de la Lune en classe à l'aide de modèles bi- et tridimensionnels du système Terre-Lune-Soleil.

même type d'apprentissages que des tests menés au planétarium (Warneking, 1970; Dean & Lauck, 1972; Smith, 1974a; 1974b; 1974c; 1976; 1977; 1978; Bondurant, 1975; Hayward, 1975; Bishop, 1977a; 1977b; 1980a; Ankney, 1981).

Les résultats esquissés dans les paragraphes précédents ne sont bien sûr pas exempts d'un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique sur lesquels nous revenons plus en détail à la section 1.0 de l'annexe 2. Mais il ne s'agit pas, à notre avis, de la plus importante lacune de ces nombreuses études, d'un point de vue conceptuel, puisque aucune n'a pris en compte un aspect de l'enseignement de l'astronomie qui nous apparaît absolument fondamental à la lumière des récentes recherches en didactique des sciences : l'apprenant et ses conceptions.

1.4.2 Initier le changement conceptuel au planétarium

En effet, les séances de planétarium qui ont fait l'objet de la très grande majorité des études savantes que nous avons consultées étaient essentiellement magistrales et transmissives dans leurs approches (Giordan, 1989, parlerait de « pédagogie frontale »). À aucun moment n'a-t-on pris en compte les connaissances préalables et les conceptions des spectateurs dans une approche socioconstructiviste de l'apprentissage centrée sur le spectateur comme apprenant (Girault, Sirard, Bigeault, Rivest & Monsché, 1993) et visant l'évolution de ses conceptions, ce que les didacticiens des sciences appellent le changement conceptuel.

En effet, pour les tenants du constructivisme⁵ et du socioconstructivisme en didactique, l'enfant ne se présente pas en situation d'apprentissage comme un récipient vide

⁵ Nous ne faisons pas ici allusion au constructivisme radical (von Glasersfeld, 1984), qui nie toute possibilité que nos constructions mentales puissent nous renseigner sur une quelconque réalité extérieure, ontologique. Nous sommes plutôt d'avis qu'il existe une telle réalité, indépendante de l'observateur, qui se révèle à nous à travers nos sens et de laquelle

que l'on doit « remplir » de connaissances, mais il possède au contraire un « déjà-là » conceptuel, les conceptions⁶, qui naissent de ses interactions directes avec l'environnement physique, de sa compréhension des messages véhiculés par ses pairs et sa culture, de ses présupposés ontologiques, du travail de son inconscient, etc. (Giordan, 1989). En toutes circonstances, l'apprenant est le premier responsable de la construction de ses connaissances. Les idées personnelles, naïves, qui naissent de cette construction sont parfois en contradiction les unes avec les autres et avec les savoirs scientifiques constitués. De plus, elles résistent fortement à l'enseignement et demeurent souvent inchangées à la fin de la scolarisation (Thouin, 2004).

La conception d'une séquence didactique visant l'enseignement de notions scientifiques aux élèves exige donc que l'on s'interroge sur les conditions d'appropriation des savoirs par les élèves. Les auteurs du Programme de formation de l'école québécoise le reconnaissent d'emblée, faisant remarquer que beaucoup d'éléments du Programme :

« [...] font appel à des pratiques basées sur une conception de l'apprentissage d'inspiration constructiviste. Dans cette perspective, l'apprentissage est considéré comme un processus dont l'élève est le premier artisan. Il est favorisé de façon toute particulière par des situations qui représentent un réel défi pour l'élève, c'est-à-dire des situations qui entraînent une remise en question de ses connaissances et de ses représentations personnelles. » (MEQ, 2001, p. 5)

La « remise en question [par l'élève] de ses connaissances et de ses représentations personnelles » dont fait mention le MEQ est précisément le changement conceptuel qu'étudient les didacticiens des sciences. Il importe donc de connaître en détail les

la science aspire à donner une description la plus juste et complète possible à travers des modèles toujours perfectibles.

⁶ Certains auteurs parlent indifféremment de préconceptions, de conceptions naïves, de représentations, de *misconceptions* (en anglais), etc. Nous retiendrons le terme conceptions pour la suite de notre travail.

conditions propices à l'évolution ou au franchissement des conceptions, considérées à la fois comme des aides à penser et des obstacles, dans l'optique où les conceptions erronées (les « erreurs ») deviennent fécondes et un marchepied pour leur propre évolution (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel & Toussaint, 1997).

Comment favoriser l'évolution des conceptions en astronomie d'élèves assistant à une séance de planétarium ? Plusieurs modèles du changement conceptuel, développés dans le contexte plus large de l'enseignement des sciences en général, coexistent présentement, considérant les conceptions soit comme des modèles préscientifiques plus ou moins cohérents (Strike & Posner, 1982; Giordan, 1989; Vosniadou, 1994), soit comme des fragments de savoirs désorganisés, des « savoirs-en-pièces » (diSessa, 1993). Quoiqu'il en soit, les conceptions sont souvent des obstacles à l'apprentissage de notions scientifiques, mais elles sont également les seuls outils conceptuels auxquels l'apprenant a accès dans sa quête de compréhension. Heureusement, les conceptions font preuve d'une certaine plasticité et sont capables d'évolution dans certaines circonstances (Thouin, 2004). Il faut donc « faire avec pour aller contre » (Giordan & de Vecchi, 1987), c'est-à-dire s'appuyer sur une connaissance fine des conceptions des apprenants pour faciliter et favoriser leur franchissement ou leur évolution.

Le défi devient alors de concevoir des séquences didactiques et des environnements éducatifs adaptés pour que l'évolution des conceptions des apprenants, le changement conceptuel, aille dans le sens souhaité par le formateur. Dans le cadre de la présente étude, nous nous attarderons à présenter et commenter quatre modèles du changement conceptuel dont nous nous inspirerons pour la suite de nos travaux. Nous croyons que ces modèles, bien que d'approche générale, peuvent informer la conception d'une séquence didactique sous la voûte d'un planétarium numérique visant l'évolution des conceptions des spectateurs.

Ainsi, Posner, Strike, Hewson & Gertzog (1982) et Strike & Posner (1982) ont proposé une approche favorisant le changement conceptuel et l'évolution des conceptions des apprenants vers les savoirs scientifiques. Ils suggèrent de créer chez l'apprenant de

l'insatisfaction à l'égard de ses propres conceptions en les confrontant à d'autres conceptions présentes au sein du groupe (conflit sociocognitif) ou à des résultats d'expériences ou d'observations contradictoires (conflit cognitif ou de centration). Une fois ses conceptions ébranlées, l'apprenant sera plus réceptif face à de nouvelles conceptions — les savoirs scientifiques — qui lui seront proposées, dans la mesure où ces nouvelles idées lui paraîtront plus intelligibles, plausibles et fructueuses que ses propres conceptions. Si toutes ces conditions sont réunies, il pourra alors se produire un changement conceptuel durable.

Alors que Strike & Posner (1982) voient les conceptions comme la principale cible du changement conceptuel, Vosniadou (1994) croit que les conceptions d'un apprenant (qu'elle appelle aussi ses modèles mentaux) ne sont que la partie émergée de l'iceberg que constituent ses théories naïves et personnelles, un ensemble plus ou moins organisé et cohérent d'idées parfois très profondément enracinées, en partie inconscientes. Selon elle, le changement conceptuel ne devrait donc pas viser les conceptions elles-mêmes, mais plutôt chercher à révéler et réformer les théories naïves qui les sous-tendent. Il faut faire se révéler les conceptions, bien sûr, mais pousser l'analyse plus loin et plus finement pour exposer les théories personnelles de l'apprenant, véritable cible du changement conceptuel.

diSessa (1993) remet lui aussi en question les conceptions comme cibles du changement conceptuel. Toutefois, contrairement à Vosniadou, pour qui les apprenants se présentent en situation d'apprentissage avec des théories personnelles, naïves, mais néanmoins cohérentes, diSessa ne reconnaît pas au novice la moindre cohérence dans ce qu'il appelle son sens physique naïf. Selon lui, le novice possède au contraire un ensemble plutôt lâche et mal organisé de « savoirs-en-pièces », les *phenomenological primitives* ou p-primis, qui constituent les éléments de base de notre système de connaissance en physique. Ces atomes de savoirs sont communs au novice et à l'expert; ils sont simplement mieux organisés au sein du sens physique de l'expert. L'enseignement doit donc contribuer à organiser ces p-primis au sein de classes de coordination qui, à la longue, donneront

naissance au sens physique de l'expert. C'est ce passage du sens physique naïf à expert qui constitue, pour diSessa, le véritable changement conceptuel.

Pour Giordan (1989), enfin, il manque aux modèles du changement conceptuel exposés précédemment la prise en compte des aspects affectifs et sociaux de toute situation d'apprentissage et, surtout, une véritable prise de conscience de l'importance de l'environnement où se déroule l'apprentissage, l'environnement didactique. Selon Giordan, ce sont les éléments saillants de l'environnement où se déroule l'enseignement qui détermineront en bonne partie quelles conceptions seront invoquées et mobilisées face à une situation-problème donnée. Les conceptions ne sont donc pas des fins en soi, dans l'enseignement, mais plutôt des connaissances empiriques utiles, puisqu'elles sont les seuls outils que possède l'apprenant pour analyser une situation nouvelle. En ce sens, Giordan insiste lui aussi sur l'importance de révéler les conceptions, quitte même à provoquer sciemment des erreurs de la part de l'apprenant afin de les exposer à l'apprenant lui-même et à ses pairs pour explorer leur contexte de fonctionnement et tenter de les faire évoluer.

L'aspect le plus original des travaux de Giordan est l'importance qu'il accorde à l'environnement didactique où se produisent les apprentissages. Cet environnement, il le souhaite le plus riche possible, stimulant sur les plans intellectuel, sensoriel et affectif, permettant la multiplication des expériences et observations, des débats entre apprenants, etc. À l'intérieur de cet environnement, il enjoint le médiateur scientifique à créer des situations didactiques adaptées aux besoins des apprenants, leur fournissant le plus d'éléments significatifs possible et un formalisme adéquat pour décrire les concepts à l'étude et leurs propres démarches d'exploration et de conceptualisation. Nous développerons davantage cette idée phare un peu plus loin en présentant le planétarium comme un véritable environnement d'apprentissage constructiviste.

Cependant, force est de reconnaître que les quatre modèles du changement conceptuel que nous venons d'évoquer demeurent d'approche très théorique et ne pèchent pas par excès d'indications pratiques sur les meilleures façons de mener à bien l'enseignement de notions scientifiques... Malgré tout, dans le cadre de notre propre

intervention didactique, nous nous inspirerons d'abord et avant tout des prescriptions de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), que nous considérons comme les plus concrètes, tout en les bonifiant grâce à quelques idées issues des trois autres modèles. Nous espérons ainsi informer la pratique éducative sous le dôme d'un planétarium numérique et insuffler une bonne dose de constructivisme dans le domaine de la recherche en éducation dans les planétariums.

1.4.3 Convergence du planétarium numérique et des environnements virtuels en éducation

La révolution numérique en cours dans le monde des planétariums rapproche ces institutions des environnements de réalité virtuelle qui, depuis une vingtaine d'années, font l'objet de nombreuses recherches pour en évaluer le potentiel éducatif (Youngblut, 1998; Yu, 2005; Roussou, 2006). On note déjà des avantages pédagogiques intéressants du côté de la réalité virtuelle : l'immersion dans un environnement tridimensionnel crédible, la multiplicité des cadres de référence (points de vue) et la stimulation multi sensorielle, pour ne nommer que ceux-là (Salzman, Dede, Loftin & Chen, 1999). Un environnement virtuel éducatif permet en outre à l'utilisateur de faire l'expérience d'un environnement réel dans lequel il ne pourrait pas se rendre physiquement, soit pour des raisons de sécurité (p. ex. : à l'intérieur d'un réacteur nucléaire, au fond d'une baie polluée), de coûts (p. ex. : dans l'espace ou sur la Lune) ou en raison d'autres contraintes physiques, d'échelle ou temporelles (p. ex. : à l'intérieur d'un atome ou d'un réseau cristallin, ou pour observer en accéléré les phases de la Lune ou le passage des saisons) (Winn, 1993). Un autre avantage de la réalité virtuelle en éducation est la possibilité qu'elle offre aux apprenants de revenir en arrière et de tester diverses solutions à un problème donné, en plus de la possibilité de « prendre leur temps » pour les explorer à leur propre rythme (Jelfs & Whitelock, 2000).

Certains envisagent même un environnement virtuel qui remplacerait les laboratoires de physique, de chimie et de biologie par un seul espace où chacune de ces

disciplines pourrait faire l'objet « d'expériences virtuelles » (Kalawski, 1996). De ce point de vue, le planétarium a déjà été comparé à un poste d'observation comme ceux qu'installent les astronomes amateurs en plein champ pour passer une nuit sous les étoiles (Sunal & Sunal, 1977). Dans le cas d'un planétarium numérique allocentrique, on peut facilement faire une analogie avec un vaisseau spatial qui permet de transporter les spectateurs partout dans l'Univers observable.

Notons enfin que les environnements virtuels éducatifs permettent de faire des apprentissages directs et non symboliques (dans une perspective constructiviste), comme l'utilisateur le ferait dans le monde réel :

« The psychological processes that become active in immersive [virtual reality] are very similar to the psychological processes that operate when people construct knowledge through interaction with objects and events in the real world. » (Winn, 1993, p. 2)

Les implications des découvertes faites dans les environnements virtuels éducatifs pour la recherche en éducation dans les planétariums numériques sont immenses mais, jusqu'à présent, peu de chercheurs en ont exploré les multiples ramifications (Yu & Sahami, 2007). Une profonde réflexion est selon nous nécessaire pour évaluer quelles pratiques éducatives développées dans le monde de la réalité virtuelle, particulièrement dans le domaine de la réalité virtuelle appliquée à l'enseignement de l'astronomie, peuvent être transposées dans l'environnement du planétarium numérique. Une telle réflexion est bien sûr au programme de la présente étude et elle influencera la forme que prendra le scénario d'intervention didactique que nous développerons plus loin dans le cadre de la présente thèse.

1.4.4 Le planétarium et les environnements de réalité virtuelle comme environnements d'apprentissage constructivistes

Nous notions précédemment la grande importance qu'accorde Giordan (1989) aux environnements didactiques riches, ce que d'autres appellent des environnements d'apprentissage constructivistes (Jonassen, 1994). Qu'est-ce au juste qu'un environnement d'apprentissage constructiviste ? Il s'agit d'un environnement qui favorise la construction de savoirs par l'apprenant, en interaction avec un milieu riche et varié (Wilson, 1996), capable de lui fournir une grande variété de moyens pour manipuler, interagir, observer, expérimenter, etc.

Nous croyons que les caractéristiques des environnements de réalité virtuelle immersifs utilisés en éducation, à savoir l'immersion (saturation des sens de l'utilisateur) dans un environnement simulé hautement réaliste, le sentiment de présence (l'impression « d'être là ») et la disparition d'une interface médiatisée (clavier, souris, écran) au profit d'une interface naturelle permettant une interaction non symbolique entre l'utilisateur et la simulation (Winn, 1993), en font des environnements d'apprentissage constructivistes exemplaires :

« Immersive VR allows us to create from our experience the kind of knowledge that has hitherto been accessible only through direct experience of the world, never through computer interface, desktop VR, or any of the third-person [indirect] experiences that predominate in school. » (Winn, 1993, p. 7)

Winn (1993) ajoute même que le constructivisme est devenu au fil des ans le principal paradigme qui sous-tend le développement des applications éducatives de la réalité virtuelle (Sánchez, Lumbreras & Silva, 1997). Rappelons que le constructivisme propose l'idée que nos connaissances sont construites par le biais de nos interactions physiques et perceptuelles avec le monde réel et par le partage du fruit de nos constructions avec d'autres apprenants. Cette insistance sur l'importance de nos interactions physiques et

perceptuelles avec le monde réel se conjugue bien avec les avantages et caractéristiques de la réalité virtuelle : puisque la réalité virtuelle peut simuler un environnement quelconque de façon très réaliste, elle permet une interaction naturelle et une véritable construction de connaissances par l'utilisateur, comme dans la réalité.

Toutes les caractéristiques des environnements virtuels éducatifs qui augmentent l'immersion et le sentiment de présence dans un environnement virtuel — interface intuitive, vaste champ de vision couvert par les images, fidélité et haut taux de rafraîchissement des images, grande distance entre le spectateur et l'écran, coordination des signaux visuels et vestibulaires, spatialisation des sons — se retrouvent *de facto* dans un théâtre de planétarium, qu'il s'agisse d'un planétarium analogique ou numérique. Le fait que la distance entre le spectateur et la surface de projection soit généralement assez grande (de l'ordre de dix mètres et plus pour les grands planétariums) et que la salle soit plongée dans la pénombre ou le noir complet ajoute au réalisme de la simulation :

« If the dome is large enough, say thirty feet in diameter or more, the effects of motion parallax, binocular disparity, motion perspective and texture gradients are not as available as in normal light conditions. Without these normal depth cues, accurate estimates of distance are more difficult. Visitors often comment, "It looks like you took the roof off". » (Lowry, 1984, p. 34)

Comme les environnements de réalité virtuelle, et parfois mieux que de tels environnements, le planétarium est donc un environnement immersif qui isole le spectateur du monde extérieur (on peut y admirer des étoiles en plein jour !), lui permet d'explorer des environnements extrêmement fidèles à la réalité, mais où aucun être humain ne s'est encore jamais rendu (l'espace interstellaire, la surface d'autres planètes, le noyau galactique, etc.) et lui permet d'observer en accéléré et de plusieurs points de vue divers phénomènes astronomiques en ressentant un fort sentiment de présence. Pour toutes ces raisons, nous croyons donc que le planétarium est un environnement virtuel éducatif au potentiel énorme.

La principale différence entre le planétarium et d'autres types de simulateurs de réalité virtuelle a trait à la taille de la salle (généralement beaucoup plus vaste dans le cas

du planétarium) et, par conséquent, la possibilité d'y travailler en groupe. Tandis que la petite taille des simulateurs qui utilisent des casques *HMD (Head-Mounted Display)* ou des systèmes de type *ImmersaDesk* ou *CAVE* ne permettent pas ou peu le travail d'équipe, le planétarium se prête bien à l'apprentissage coopératif, au travail d'équipe et à la co-construction de savoirs dans un contexte social très riche. Il s'agit d'un avantage marqué pour le planétarium : Moore (1995) signale que les environnements virtuels qui favorisent le travail d'équipe sont généralement plus à même de susciter des apprentissages profonds et durables. Cette caractéristique supplémentaire fait du planétarium un environnement virtuel éducatif de premier plan, et donc également un environnement d'apprentissage constructiviste et socioconstructiviste d'une richesse inégalée.

Reste à déterminer quels scénarios éducatifs menés sous la voûte d'un planétarium numérique seront le plus à même d'exploiter les forces de cette nouvelle technologie pour amener les apprenants à faire de véritables apprentissages dans cet environnement virtuel immersif. Nous développerons cet aspect au point suivant.

1.4.5 Les simulations, des outils pour apprendre

Jonassen, Peck & Wilson (1999) affirment que les outils éducatifs les plus intéressants en ce qui concerne l'apprentissage dans des environnements virtuels immersifs conçus comme des environnements d'apprentissage constructivistes, sont les simulations. De l'avis des chercheurs, il n'existe pas de meilleure façon de rendre l'apprentissage intentionnel et de mobiliser toutes les ressources intellectuelles et affectives de l'apprenant.

Le but des simulations utilisées en éducation est, ultimement, de permettre à l'utilisateur de découvrir par lui-même les règles, les caractéristiques et le fonctionnement d'un système à l'étude. C'est ce qui en fait des « outils pour penser » (*MindTools*, selon la terminologie de Jonassen, Peck & Wilson, 1999) si efficaces d'un point de vue constructiviste. Les simulations permettent en outre l'expression d'hypothèses par l'utilisateur et leur vérification sur-le-champ, avec une rétroaction immédiate. Dans de tels

cas, l'utilisation de simulations change profondément la notion d'erreur, non plus perçue comme une faute à éradiquer, mais plutôt comme une occasion d'apprendre quelque chose de nouveau à propos d'un système donné (Rieber, 2004). On retrouve ici une caractéristique importante du travail sur les conceptions que nous évoquions plus tôt.

Un autre avantage des simulations utilisées en éducation est la grande variété des représentations, des analogies et des métaphores disponibles pour représenter une situation ou un problème, ce qui permet d'éviter l'écueil du formalisme (mathématique, la plupart du temps) qui, introduit trop tôt, peut représenter une surcharge cognitive paralysante pour l'apprenant (Rieber, 2004).

Enfin, une simulation peut être conçue de manière à attirer l'attention de l'apprenant sur un ou des aspects particuliers de la situation ou des relations entre variables, et lui permettre d'éviter certains écueils prévisibles (Rieber, 2004), tout en réduisant la complexité du phénomène à l'étude et le nombre de « distractions » qui ralentissent l'apprentissage (Alessi, 1988). On trouve ici l'idée d'échafaudage et de guidage, qui permettent de résoudre le dilemme de l'accompagnement — toujours nécessaire — de l'apprenant dans un environnement d'apprentissage constructiviste que l'on souhaite le plus ouvert et non-directif possible, sans pour autant brimer sa liberté d'explorer le système simulé. Car le risque existe que la simulation, utilisée sans « garde-fou » conceptuel, fasse naître de nouvelles conceptions qui sont bien loin des savoirs scientifiques visés par les concepteurs de la séquence didactique. Plusieurs recherches menées au cours des dernières années et utilisant des simulations et des modèles immersifs en réalité virtuelle pour l'enseignement de l'astronomie en sont justement venues à la conclusion que la totale liberté laissée aux apprenants, concepteurs de modèles ou utilisateurs de simulations, pouvait effectivement donner naissance à toutes sortes de conceptions hybrides (Keating, Barnett, Barab & Hay, 2002; Winn, 2002; Bakas & Mikropoulos, 2003; Yair, Schur & Mintz, 2003; Gazit, Chen & Yair, 2004; Gazit, Yair & Chen, 2005).

En ce qui nous concerne, sans vouloir retomber dans une approche complètement dirigiste sous la seule responsabilité du concepteur de l'environnement d'apprentissage,

nous adopterons une position médiane qui met les apprenants en contact avec des simulations astronomiques réalistes et immersives au sein d'un environnement virtuel riche mais, en même temps, guide leur exploration de cet environnement grâce à un scénario didactique comprenant des échafaudages et des balises leur permettant de construire des savoirs plus proches des savoirs scientifiques, en lien avec les savoirs essentiels et les concepts prescrits par le programme scolaire. La grande flexibilité des environnements de réalité virtuelle, dont le planétarium numérique fait partie, offre heureusement une solution immédiate à ce besoin d'accompagnement (Schunk, 2004).

De plus, on peut se demander si les apprenants sont prêts à prendre le contrôle des événements dans un théâtre de planétarium numérique. Cela pourrait représenter un trop grand effort et se faire au détriment de leur capacité à construire leurs connaissances à cause d'une surcharge cognitive. Il vaut donc mieux les guider, attirer leur attention sur les phénomènes les plus révélateurs et échafauder un scénario qui les guide dans leur remise en question de leurs conceptions. Cette approche, similaire à celle présentée dans les travaux de Yair, Schur & Mintz (2003), Gazit, Chen & Yair (2004), Gazit, Yair & Chen (2005) et d'autres, pourrait mettre à profit l'immersion d'un théâtre de planétarium et l'échafaudage dont ont tellement besoin les apprenants.

Ceci nous conduira à proposer une forme très particulière de contrat didactique (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel & Toussaint, 1997) qui fait que les élèves demandent qu'on leur montre ce qu'il faut voir au milieu de la surcharge visuelle que représente une visite au planétarium, et qui impose à l'animateur/concepteur de guider les apprenants à travers le scénario de la séance, scénario imposé aux uns et aux autres par les exigences du programme de formation scolaire. En d'autres termes, nous nous proposons d'offrir aux apprenants les matériaux nécessaires afin qu'ils construisent eux-mêmes une vision plus juste des mécanismes à l'origine des phénomènes astronomiques enseignés. Nous retrouvons ici l'idée de « monstration » que l'on doit à Johsua & Dupin (1989), un type de contrat didactique qui nous guidera lorsque viendra le temps de développer le modèle

d'intervention didactique qui s'appuiera sur la réflexion que nous venons d'exposer succinctement, mais que nous développerons davantage au chapitre suivant, dans le cadre conceptuel.

1.5 Les phases de la Lune

La question se pose maintenant de savoir sur quoi portera l'intervention didactique que nous développerons dans le cadre de la présente thèse. Les sujets pouvant faire l'objet d'un tel scénario éducatif en astronomie dans un planétarium numérique ne manquent pas, offrant littéralement l'embarras du choix au formateur. Les nouveaux planétariums numériques offrent en effet la possibilité de voyager virtuellement de la Terre jusqu'aux plus lointaines galaxies pour étudier les divers mécanismes à l'œuvre derrière les phénomènes sensibles que l'astronomie révèle. Par où commencer et quoi privilégier ?

Il est clair que, dans le contexte restreint de la présente étude, qui vise le développement d'un scénario didactique s'adressant à des apprenants d'âge scolaire qui effectuent une visite de relativement courte durée dans un planétarium, il faut circonscrire le champ d'application. Plusieurs raisons nous ont ainsi conduit à privilégier le thème des phases de la Lune, qui sera l'objet de notre intervention didactique dans un planétarium numérique. D'abord, du point de vue astronomique, les phases de la Lune sont l'un des phénomènes célestes les plus faciles à observer, même par de très jeunes enfants et même en milieu urbain. Cela nous assure un minimum de familiarité avec le sujet de la part des apprenants.

Du point de vue scolaire, par contre, le mécanisme à l'origine de ce phénomène est certainement l'un des plus complexes à saisir pour des élèves, puisqu'il exige, pour être bien compris, la coordination de deux points de vue différents sur notre satellite, géocentrique et allocentrique (Suzuki, 2003). Sans compter qu'il faut également savoir que la Lune est sphérique, bien intégrer les diamètres relatifs de la Terre, la Lune et le Soleil et les distances qui les séparent, comprendre d'où vient la lumière qui éclaire la Lune (le

Soleil) et établir le lien entre la fraction de la surface lunaire éclairée par le Soleil qui est visible de la Terre et la position de la Lune sur son orbite autour de notre planète. Une difficulté supplémentaire découle du peu de familiarité des apprenants avec les notions de trajectoire de la lumière et la formation d'ombres (Stahly, Krockover & Shepardson, 1999), en particulier sur des surfaces sphériques (Parker & Heywood, 1998). Il s'agit évidemment d'un réel défi pour les enseignants qui, avec les livres et le tableau noir, peinent à enseigner ce concept à leurs élèves – et à le comprendre eux-mêmes parfois...

D'autre part, du point de vue de la didactique, le phénomène et le mécanisme des phases de la Lune ont fait l'objet de nombreuses études (la toute première par Piaget (1929) il y a près d'un siècle) visant à documenter les conceptions les plus fréquentes d'élèves de divers groupes d'âges à propos de l'aspect changeant de notre satellite; le tableau de l'annexe 1 en donne un bon aperçu et indique les principales références se rapportant à ce sujet. Dans les mots de Roald et Mikalsen (2001), « *there seems to be a plethora of different, more or less complicated conceptions* [à propos des phases de la Lune] » (p. 436) et le tableau de l'annexe 1 rend bien compte de cette étonnante diversité. Mais puisqu'une des premières étapes de tout processus didactique devrait être la recension et la prise en compte des savoirs préalables des apprenants, il nous apparaît commode de choisir un thème pour lequel ce travail de recension a déjà été complété par d'autres.

En outre, de nombreuses études ont cherché à aller plus loin que de simplement révéler les conceptions les plus courantes à propos des phases de la Lune chez les apprenants de tous âges. Plusieurs auteurs ont également cherché à évaluer l'impact d'interventions didactiques ciblées visant à faire évoluer les conceptions des apprenants vers la vision scientifique du mécanisme des phases. La plus connue de ces interventions, développée par Fraknoi (1995) et ses nombreux collaborateurs, consiste à d'abord faire faire aux apprenants une prédiction concernant la séquence des phases telle qu'ils croient qu'elle se déroule, la plupart du temps en les incitant à faire des dessins ou à mettre en ordre une série de photographies des phases de la Lune. Les apprenants sont ensuite invités

à observer la Lune et ses phases pendant quatre à huit semaines, en notant à chaque jour l'apparence de la Lune, de même que l'heure à laquelle les observations sont faites. À la fin de cette période d'observation, les apprenants sont invités à comparer leurs prédictions avec leurs observations, ce qui déclenche très souvent un conflit de centration. C'est alors qu'est présenté le modèle scientifique, illustré à l'aide de boules de styromousse blanches représentant la Lune que les élèves font tourner autour de leur tête (représentant la Terre) tandis que la classe est plongée dans la pénombre et que seule une puissante ampoule (représentant le Soleil) demeure allumée.

Différentes variantes de cette intervention ont été testées auprès d'apprenants appartenant à divers groupes d'âge. Pour Rusk (2003) et Trundle, Atwood & Christopher (2007a), cette approche a fait ses preuves avec des élèves du primaire; Abell, George & Martini (2002), Trundle, Atwood & Christopher (2002; 2006; 2007b), Ogan-Bekiroglu (2007), Shen & Confrey (2007) et Mulholland & Ginns (2008) observent eux aussi une meilleure compréhension du mécanisme des phases de la Lune suite à une séquence d'enseignement utilisant une approche similaire avec des étudiants universitaires, plusieurs se destinant à devenir eux-mêmes enseignants et ce, tant à court qu'à moyen terme. Mulholland & Ginns (2008) avouent cependant avoir observé la persistance de quelques conceptions hybrides concernant certains aspects du mécanisme des phases suite à leur intervention.

De même, Stahly, Krockover & Shepardson (1999) ont obtenu des résultats mitigés avec des élèves de 3^e année, mais leur étude n'incluait pas l'observation systématique de la Lune par les apprenants. Les chercheurs rapportent que de nombreuses conceptions hybrides sont apparues ou se sont maintenues tout au long de l'enseignement et s'interrogent même sur la pertinence de présenter un concept si difficile à des élèves si jeunes.

Barnett & Morran (2002) ont remplacé l'utilisation de modèles tridimensionnels concrets par l'exploration d'une représentation 3D du système Terre-Lune-Soleil par le biais d'un ordinateur; leur étude, qui portait sur les similitudes et les différences entre les

phases et les éclipses, a montré une nette amélioration dans la compréhension des mécanismes à l'œuvre par des élèves de 5^e année, bien qu'il subsistait tout de même plusieurs conceptions hybrides à la fin de l'activité. Bell & Trundle (2008) et Trundle & Bell (2010) obtiennent des résultats similaires avec de futurs enseignants du primaire en utilisant eux aussi une simulation sur ordinateur pour accélérer l'observation des phases de la Lune.

Küçüközer (2008) et Küçüközer, Korkusuz, Küçüközer & Yürümezoglu (2009) constatent eux aussi des apprentissages significatifs à propos du mécanisme des phases de la Lune de la part d'élèves turcs de 11 à 13 ans, de même que de futurs enseignants en science. Leur approche se base sur une séquence prédiction-observation-explication au cours de laquelle les apprenants prédisent quelle sera la séquence des phases de la Lune pour ensuite observer une simulation 3D projetée sur un écran devant la classe. L'image est divisée en deux, la partie de gauche montrant l'aspect de la Lune vue de la Terre tandis qu'à droite, une simulation 3D montre la position de la Lune sur son orbite autour de la Terre au même moment. La séquence d'animation (préenregistrée) est arrêtée fréquemment pour permettre aux apprenants de discuter de ce qu'ils constatent. Enfin, les apprenants tentent d'expliquer les différences entre leurs prédictions et leurs observations. Suzuki (2003) a suivi un scénario très semblable (hypothèse-expérience-instruction) avec des futurs enseignants japonais en utilisant une lampe et des globes pour représenter le trio Soleil-Terre-Lune et en y ajoutant une caméra vidéo fixée à la « Terre » pour montrer sur un écran la perspective de l'observateur terrestre tandis que la Lune tourne autour de la Terre.

Bien qu'intéressante, l'approche par observation et modélisation des phases de la Lune demande beaucoup de temps (de un à deux mois minimum), demeure à la merci de la météo et repose sur la capacité des apprenants de transposer le modèle Terre-Lune-Soleil illustré en classe aux vrais objets astronomiques. Cette capacité n'a pas encore démontrée, à notre avis, à moins de placer la modélisation par les élèves au cœur de l'activité

d'apprentissage, comme l'ont fait Taylor, Barker & Jones (2003). Osterman Meyer, Mon & Hibbard (2011) ont eux aussi démontré l'efficacité d'associer l'observation des phases de la Lune avec la construction de modèles mentaux par les apprenants, des étudiants universitaires dans leur cas. Mais nous croyons que notre approche, qui transportera virtuellement les apprenants dans l'espace pour observer le mécanisme des phases en direct, donnera des résultats au moins aussi bons, mais en beaucoup moins de temps et à l'abri des intempéries.

Finalement, le choix des phases de la Lune comme thème de notre intervention didactique a été motivé par le fait qu'il s'agit d'un des concepts prescrits prévus par le MEQ pour le premier cycle du secondaire, et donc d'enseignement obligatoire. De plus, de nombreux auteurs considèrent que le groupe d'âge des 12-14 ans est généralement mûr pour aborder ce concept de façon formelle pour la première fois (Tomlinson, 1997; Bishop, 2002). Notre objectif sera donc de concevoir et évaluer une intervention didactique dans un planétarium numérique simulant un environnement astronomique réaliste et visant la compréhension du mécanisme des phases de la Lune par des élèves du premier cycle du secondaire. Si cette initiative connaît le succès que nous espérons, il sera toujours temps d'en extrapoler les conclusions à d'autres phénomènes astronomiques et à d'autres mécanismes (les saisons, les éclipses, le mouvement diurne du ciel, l'organisation hiérarchique des structures dans l'Univers, etc.), mais un travail d'une telle envergure sort clairement du cadre de la présente recherche.

1.6 Méthodologie et questions de recherche

Étant donné notre volonté de développer une intervention didactique pratique et fonctionnelle et de la valider dans les lieux mêmes où elle s'appliquera, c'est-à-dire dans un planétarium numérique, nous avons cherché une approche méthodologique qui sied bien à ce type de recherche concrète et incarnée. Il nous est apparu que la recherche de développement (Van der Maren, 1996), proche de l'ingénierie didactique (Artigue, 1996), offrait les meilleurs outils pour atteindre nos objectifs.

Inspirée des techniques de développement de produits et de processus dans les domaines du génie et du design, la recherche de développement appliquée en éducation s'appuie sur une vaste recension des écrits afin d'établir une base théorique solide, mais perfectible, qui informera le développement d'interventions éducatives appliquées en milieu « naturels » d'éducation. Un des principaux atouts de cette approche est le processus d'itération (Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003) qui permet au chercheur de valider l'intervention didactique et la théorie qui la sous-tend, de les réviser et de les améliorer, tout au long d'un cycle de remises en jeu des approches théoriques et pratiques, jusqu'à ce que l'intervention didactique ait atteint les objectifs fixés au début de la recherche.

Puisque la recherche de développement se trouve aux confluent de deux courants qui l'informent, soit le versant déductif s'appuyant sur la recension des écrits pour constituer le corpus théorique, et le versant inductif intéressé par la mesure de l'intervention elle-même, notre approche méthodologique sera double. D'abord, une vaste recension des écrits dans les domaines de recherche que nous évoquons plus haut nous servira à constituer les bases théoriques de notre intervention didactique. La façon dont le corpus, sujet de cette recension, aura été constitué et analysé sera décrite au chapitre 3 (méthodologie) et son résultat fera l'objet d'une présentation détaillée au chapitre 2 (cadre conceptuel) de la présente thèse.

En ce qui concerne l'évaluation d'une intervention didactique dans un planétarium numérique, dont le développement constitue le cœur du présent travail, il n'entre pas dans le cadre de cette thèse — qui demeure un exercice exploratoire dans le domaine encore très nouveau du lien planétarium-didactique des sciences — de mener jusqu'au bout la recherche de développement, incluant de multiples itérations. Nous nous contenterons plutôt d'effectuer une seule itération en nous inspirant de l'approche de recueil de données qualitatives préconisée par Artigue (1996), à savoir des données d'observation recueillies lors de l'intervention elle-même, complétées par des questionnaires et des entrevues de

groupes réunissant quelques participants. Nous décrirons au chapitre 3 (méthodologie) comment nous recueillerons et analyserons ces multiples données, ce qui nous permettra de comprendre l'impact (en terme d'évolution des conceptions) de l'intervention et les processus cognitifs et affectifs qu'elle met en jeu auprès des apprenants.

Une telle opérationnalisation de la recherche, dans le cadre d'une recherche de développement, nous conduit à soulever un certain nombre de questions de recherche que nous diviserons en deux volets : l'un théorique, l'autre davantage tourné vers la pratique. D'entrée de jeu, on peut retenir les quelques formulations suivantes, qui guideront le volet théorique de notre thèse :

- Quelles pratiques éducatives qui ont fait leurs preuves dans le contexte d'un planétarium traditionnel optomécanique géocentrique peuvent être transposées dans le nouveau contexte d'un planétarium numérique allocentrique et quelles adaptations devront-elles subir ?
- Comment les acquis de la didactique des sciences, en particulier le travail sur les conceptions des apprenants et les conditions de leur franchissement ou de leur évolution, trouveront-ils leur place dans le développement de scénarios éducatifs et didactiques dans les nouveaux planétariums numériques ?
- Quelles pratiques, inspirées du monde de la réalité virtuelle et des environnements immersifs utilisés en éducation, pourront être appliquées dans le contexte d'un planétarium numérique et quelles adaptations spécifiques devront-elles subir ?
- Est-ce que le planétarium numérique peut être le lieu de simulations soutenant et guidant les apprenants engagés activement dans la construction de leurs propres connaissances ?
- À quelles conditions le planétarium numérique pourra-t-il devenir un instrument éducatif socioconstructiviste, inscrit dans la modernité des approches éducatives privilégiées au Québec par le Programme de formation de l'école québécoise ?

Du côté de l'intervention didactique elle-même et de son évaluation en contexte d'enseignement, nous proposons de répondre à la question de recherche suivante :

- Quels apprentissages en astronomie feront des élèves du premier cycle du secondaire au cours d'une intervention didactique dans un planétarium numérique abordant le phénomène des phases de la Lune ?

C'est pour tenter de répondre à ces questions que nous avons entrepris la présente étude. Il est à noter que ces questions de recherche seront précisées, avant leur opérationnalisation effective, en conclusion du chapitre 2, lorsque nous aurons exposé en détail le cadre conceptuel de notre thèse.

1.7 Pertinence de la recherche

Selon nous, la présente étude est pertinente à plusieurs titres. Sur le plan scientifique, d'abord, elle promet de forger de nouveaux liens entre des connaissances provenant de divers domaines de recherche distincts et de mieux informer le processus de conception de séances éducatives sous la voûte d'un planétarium numérique. À notre connaissance, aucune étude publiée à ce jour n'a abordé la question de l'enseignement de notions astronomiques sous la voûte d'un planétarium avec le regard croisé que nous proposons ici. Informer l'approche éducative du planétarium, à la fois sous l'angle de la pratique dans les planétariums traditionnels à l'ère de la révolution numérique et allocentrique, à travers le filtre des pratiques socioconstructivistes chères à la didactique des sciences, et avec un regard affûté par les recherches sur la valeur éducative des environnements virtuels, des environnements d'apprentissage constructivistes et des simulations est, selon nous, inédit. En particulier, notre recension des écrits n'a mis au jour aucune étude qui cherchait explicitement à appliquer les prescriptions de la didactique des sciences et des modèles du changement conceptuel dans un planétarium, analogique ou

numérique. Le présent travail, centré sur une recherche exploratoire à la fois inductive et déductive, constitue donc, à notre connaissance, une première.

Nous croyons également qu'une telle étude répond à un criant besoin de réflexion et d'évaluation des pratiques éducatives dans les lieux de diffusion de la culture scientifique et technique que sont les musées de science et les planétariums. Dans son rapport publié en 2002, le Conseil de la science et de la technologie du Québec notait justement que « les produits et services existants en culture scientifique et technique [...] sont généralement considérés comme étant de bonne qualité », mais ajoutait qu'« ils n'ont pas fait l'objet d'une évaluation systématique, si bien qu'on connaît peu de choses sur ce qui explique l'efficacité de certaines approches [...] » (CST, 2002, p. 178). C'est en partie pour combler cette lacune, dans le domaine restreint des planétariums, que nous entreprenons la présente recherche.

Il nous apparaît également que le planétarium numérique, comme les simulateurs de réalité virtuelle, est une technologie relativement jeune qui est toujours à la recherche d'une « recette » universelle et définitive capable de guider les concepteurs d'environnements d'apprentissage constructivistes en astronomie. Cobb, Neale, Crosier & Wilson (2002) notent que la relative immaturité des environnements virtuels, plus particulièrement des environnements virtuels éducatifs, a jusqu'à présent empêché de mener à bien une évaluation formelle de l'efficacité de ces technologies pour l'éducation. Il est intéressant de retrouver les mêmes interrogations dans le milieu des planétariums où, depuis 1970, des questions similaires concernant la valeur éducative de la technologie déchirent la communauté (voir par exemple Gutsch, Bishop, Elvert, Gijsenbergs & Schafer (2000), Manning, Ciupik, Hennig, Itoh & Kraupe (2000) et Sampson, Fairall, Moore, Ramponi & Whitt (2002) pour des échos relativement récents de ce débat).

Notre étude intéressera bien sûr au premier chef la communauté internationale des planétariums et pourra être largement diffusée par le biais des divers canaux de transmission que se partagent les membres de cette communauté. Citons, par exemple, la revue trimestrielle *Planetarian*, distribuée à travers le monde aux membres de

l'*International Planetarium Society* (IPS), ou encore les congrès internationaux bisannuels de cette même société. D'autres vecteurs de diffusions visant la communauté plus vaste des éducateurs formels et informels en astronomie pourront également être mis à contribution pour la dissémination des conclusions de la présente étude : pensons à la revue électronique *Astronomy Education Review* (accessible à <http://aer.aas.org/>) de même que la revue électronique de l'Union astronomique internationale intitulée *Communicating Astronomy with the Public* (<http://www.capjournal.org/>). Ces différents vecteurs nous permettront de rejoindre un grand nombre de praticiens de l'éducation en astronomie dans les planétariums et de valoriser auprès d'eux de nouvelles façons de faire qui amélioreront certainement la pratique, mais aussi la théorie derrière leurs interventions. De ce point de vue, notre contribution servira, nous l'espérons, à augmenter la reconnaissance sociale et scientifique des planétariums, autant auprès du public, des enseignants, que des chercheurs en éducation.

À une échelle plus restreinte, d'un point de vue qui intéresse plus particulièrement le Planétarium Rio Tinto Alcan de Montréal, la façon dont l'institution jouera son rôle d'accompagnement et de soutien auprès des écoles montréalaises et québécoises, à l'heure de sa transformation en planétarium numérique, sera informée des conclusions de la présente étude, ce qui constitue là aussi un indéniable élément de pertinence. Là encore, nous espérons que ce travail de pionnier sera repris par d'autres et exporté dans d'autres planétariums qui auront été convaincus de la justesse et de la pertinence de notre approche.

Quant au changement de paradigme entre le planétarium optomécanique géocentrique et le planétarium numérique allocentrique, on mentionnait plus haut que le Planétarium Rio Tinto Alcan de Montréal a complété sa transformation de planétarium analogique à planétarium numérique, métamorphose concrétisée en avril 2013. Le nouveau Planétarium Rio Tinto Alcan de Montréal accueille déjà le grand public dans deux théâtres des étoiles complètement numériques et les groupes scolaires suivront sous peu. Compte tenu de cette nouvelle offre de service, il est plus qu'urgent pour l'institution d'approfondir

sa réflexion sur les meilleures pratiques éducatives dans un tel environnement numérique immersif. C'est aussi à cette réflexion qu'ambitionne de contribuer la présente recherche.

1.8 Retombées de la recherche

Si cette étude permet d'identifier les pratiques les plus pertinentes et les plus fécondes pour l'apprentissage de notions en astronomie sous la voûte d'un planétarium numérique allocentrique, pratiques basées et validées par les approches socioconstructivistes de la didactique des sciences, il devrait en découler de meilleures interventions éducatives et didactiques dans le nouveau Planétarium Rio Tinto Alcan. Il deviendra alors plus facile pour les conseils d'établissements scolaires de justifier une visite éducative dans ce type de musée de science, dans un contexte budgétaire difficile (coûts élevés du transport scolaire et des droits d'entrée).

Une telle étude permettra également de démontrer à la Direction d'Espace pour la vie, gestionnaire du Planétarium Rio Tinto Alcan de Montréal, la pertinence de mener à bien ce type de recherche. De plus, une telle étude permettra d'orienter les pratiques et les recherches futures sur la construction des connaissances dans le contexte d'une séance de planétarium s'adressant à d'autres clientèles ayant des besoins spécifiques ou particuliers (adultes, futurs enseignants, personnes handicapées, etc.).

Finalement, les résultats de la présente étude pourront faciliter la diffusion des concepts socioconstructivistes sur lesquels elle se base auprès des membres de la communauté internationale des planétariums, regroupés au sein de l'*International Planetarium Society*, de même que d'autres groupes d'enseignants et de formateurs en astronomie, facilitant ainsi les apprentissages en astronomie par les millions de visiteurs qui assistent à un spectacle de planétarium chaque année dans le monde, suivent des cours d'astronomie à tous les niveaux scolaires ou visitent des musées de science consacrés à l'astronomie (IPS, 2010; Petersen, 2011). Nous espérons qu'ainsi, les planétariums seront reconnus autant pour leurs qualités de divertissement que pour leur apport éducatif et

scientifique et ce, par le public, par les apprenants, leurs enseignants et par les chercheurs en éducation.

2.0 Cadre conceptuel

« The most important single factor influencing learning is what the pupil already knows. Ascertain this and teach him accordingly ».
(Ausubel, 1968, p. vi)

« Knowledge rests not upon truth alone, but upon error also. »
Carl G. Jung (1875-1961)

Nous exposerons dans le présent chapitre les bases théoriques sur lesquelles s'appuiera l'intervention didactique à propos des phases de la Lune que nous développerons et testerons dans un planétarium portatif numérique auprès d'élèves du premier cycle du secondaire. Rappelons que l'étude des phases de la Lune fait partie des concepts prescrits contenus dans le Programme de formation de l'école québécoise pour cet ordre d'enseignement (MEQ, 2001).

Notre recension théorique se déploiera en quatre parties. D'abord, nous présenterons les fruits de la recherche en éducation menée dans les planétariums (majoritairement optomécaniques et géocentriques) depuis 1970. Dans un deuxième temps, nous décrirons les principales théories du changement conceptuel développées par les didacticiens des sciences depuis une trentaine d'années. Ensuite, nous étudierons l'utilisation éducative des environnements d'apprentissage constructivistes, en particulier les environnements de réalité virtuelle, et terminerons par l'utilisation de simulations astronomiques hautement réalistes pour l'enseignement de notions en astronomie. Tous ces apports théoriques seront mis à contribution dans le développement du scénario de notre intervention didactique dans un planétarium numérique que nous présenterons en détail au chapitre 4.

2.1 La recherche en éducation dans les planétariums

« *Visitors often comment, "It looks like you took the roof off."* »
(Lowry, 1984, p. 34)

Cette section sera consacrée à la présentation des principaux résultats de recherches en éducation menées dans le milieu des planétariums depuis 1970⁷. Pour ce faire, nous avons recensé plus d'une centaine de thèses et d'articles de revues savantes consacrés à cette question. Mais afin de ne pas alourdir inutilement le texte, nous résumerons dans la présente section seuls les plus importants de ces travaux ou ceux dont les conclusions seront les plus utiles pour la suite de notre propre recherche. Le lecteur trouvera cependant à l'annexe 2 la recension critique complète des travaux de recherche que nous avons consultés, travaux menés dans les planétariums depuis le début des années 1960.

2.1.1 Introduction

On a déjà mentionné au chapitre 1 que pour certains, le planétarium était « *the greatest teaching instrument ever invented* » (Armand N. Spitz, cité par Abbatantuono, 1994). Depuis l'inauguration du premier planétarium optomécanique par la firme allemande Carl Zeiss dans les années 1920 et jusqu'à nos jours, cette affirmation a été reprise par de nombreux promoteurs qui souhaitaient construire un théâtre des étoiles dans leur communauté (Chartrand, 1973; Marché, 1999; 2001). Dès les premières années de leur implantation, les planétariums ont été perçus et présentés comme de formidables outils d'enseignement mis au service des apprenants :

« [...] *in the field of audio-visual aids there is perhaps no more fascinating or potent educational device than the planetarium. At its best, the planetarium is a broadly informative, dramatic stimulus to learning; at the very least, it is an effective mean of presenting certain astronomical*

⁷ Nous expliquerons au chapitre 3 (section 3.2.1) que nous n'avons pas retenu de textes datant d'avant 1970 dans cette section parce que nous avons jugé, en les consultant, qu'ils n'apporteraient rien de constructif à notre propre recherche.

concepts. [...] the educational aspects of the planetarium are two-fold: the first is to stimulate interest in astronomy and related sciences; and the second, to increase the layman's understanding and knowledge of the universe. » (Fowler, 1960, p. 539)

M. H. Gardner (1964) était tout aussi enthousiaste lorsqu'il écrivait :

« A planetarium can be a dramatic, effective, and extremely versatile method of teaching concepts in astronomy, astrophysics, atmospheric sciences, earth sciences, geochemistry, and geophysics. » (Gardner, 1964, cité par Yee, Baer & Holt, 1971, p. 2)

Dans le contexte plus restreint des spectacles destinés au public scolaire, par contre, on s'entendait sur le fait que le planétarium était efficace dans la mesure où il poursuivait les mêmes objectifs que l'école qu'il entendait desservir :

« As planetaria increase in popularity and numbers, there will be an increasing need for a closer correlation between the planetarium demonstration and the work of the classroom; [...] Unless this correlation and cooperation is forthcoming, it may certainly be said with truth that although the planetarium demonstration is nearly always an exciting and memorable experience for school children, it is not always as fruitful an educational experience as it might be. » (Fowler, 1960, p. 543)

Cette prise de conscience de l'importance du lien planétarium-école a profondément modifié le rôle de l'institution tel qu'il était perçu par ses principaux acteurs et a mis en évidence la complémentarité des deux institutions, le planétarium étant alors vu comme un « laboratoire » d'astronomie.

« The planetarium has moved from its role of producing spectaculars to the point where it is now as vital a part of the scientific educational equipment as the physics or chemistry laboratory. The planetarium has provided the solution to a long standing problem of astronomy teaching. It provides a star filled sky regardless of weather, season, time of day or location of the viewer. The planetarium is marketed today as a "space science" laboratory. » (Reed & Campbell, 1972, p. 368)

Ceci étant dit, au début des années soixante-dix, malgré la réputation enviable dont jouissaient les planétariums et l'aura de respectabilité qui les entourait, la preuve objective

de leur impact positif sur les apprentissages des spectateurs restait à faire (Reed, 1974). Le problème de l'évaluation de l'impact éducatif des interventions dans les planétariums et, peut-être surtout, de la distinction de ses effets de ceux d'un enseignement similaire en classe, se posait alors de manière cruciale :

« Serious evaluation of schools programs [in the planetarium] seems an essential project to be undertaken by every facility offering such shows in an effort to identify and reinforce factors best handled solely by the planetarium. » (Muhl, 1975, p. 7)

C'est pour répondre à cet appel que la plupart des recherches qui seront rapportées dans ce qui suit ont été menées. Quatre questions en particulier ont préoccupé les chercheurs qui s'intéressaient à l'impact éducatif d'une visite au planétarium. La première est de savoir si l'environnement immersif du planétarium est plus propice à l'apprentissage de notions en astronomie que la salle de classe ou que tout autre environnement à caractère éducatif (musée, observatoire, etc.). La seconde, complémentaire à la première, est de déterminer comment le planétarium peut le mieux appuyer et compléter le travail éducatif mené en classe ou dans un autre environnement éducatif. La troisième s'interroge sur le rôle (éducatif, comportemental et motivationnel) du planétarium et sur les moyens (audio-visuels, techniques, d'animation) et les approches pédagogiques (magistrale, interactive, participative, manipulatoire, etc.) intrinsèques à l'institution qui sont le plus susceptibles de favoriser l'acquisition de connaissances par les spectateurs. La quatrième, enfin, s'interroge sur les notions astronomiques (ou autres) qui sont susceptibles d'être mieux comprises et assimilées par les apprenants sous la voûte d'un planétarium.

Nous nous intéresserons plus particulièrement dans ce qui suit à ces deux derniers aspects de la recherche dans les planétariums. Le lecteur intéressé par l'ensemble des textes recensés dans le cadre de la présente thèse est invité à consulter l'annexe 2. Notre recension des écrits se basera bien sûr d'abord sur les résultats de recherche eux-mêmes, qu'ils aient été publiés sous forme de mémoires, de thèse ou d'articles parus dans des revues spécialisées. Mais nous nous appuierons également sur un certain nombre de travaux de

synthèse (Powers, 1973; Wall, 1973; King, 1974; Reed, 1974; Sunal, 1976; Riordan, 1991; Brunello, 1992; Marché, 1999; 2001; Schroeder, 2004; Brazell & Espinoza, 2009) qui ont été publiés au cours des quarante dernières années.

2.1.2 L'éducation dans les planétariums : résultats de la recherche

2.1.2.1 L'impact affectif et comportemental du planétarium

De très nombreux auteurs se sont intéressés au rôle motivationnel du planétarium, en partant du principe qu'un élève motivé apprend davantage et mieux qu'un autre qui l'est moins (Johnston, 1981). À la lumière de leurs résultats, il semble que le planétarium permet effectivement le développement d'une attitude positive par rapport à l'astronomie et aux sciences et qu'il possède un pouvoir attractif et motivationnel important, sa plus grande force résidant peut-être dans sa capacité à émouvoir et émerveiller. C'est du moins la conclusion à laquelle arrivent Reed (1970), Reed & Campbell (1972), Ridky (1973), Burnette (1976) et Sumners (2001). Ainsi, pour Mergler (1975), le planétarium est une excellente source de motivation lorsqu'il se présente comme un véritable laboratoire du ciel. Pour Ortell (1977a; 1977b), la supériorité du planétarium en terme de motivation viendrait du fait que les étudiants perçoivent le lieu comme très différent de la salle de classe (effet de nouveauté), ce qu'ils trouvent très stimulant.

D'autres chercheurs sont également du même avis, comme Jamison (1972), qui a mesuré par sondage auprès d'un public non scolaire l'impact motivationnel important de l'animateur et de l'effet « d'immersion » dans un planétarium. Reed (1975) a constaté l'impact motivationnel nettement positif qu'avait la promesse de visiter un planétarium, inscrite dans le syllabus d'un cours d'astronomie, sur le choix de ce cours par des étudiants de niveau *College*. Bishop (1980a) a utilisé une panoplie d'approches (manipulation de modèles, prise de notes, jeux de rôle) pour enseigner à des élèves de 8^e année divers concepts astronomiques (rotation de la Terre et mouvements de la sphère céleste, saisons, phases de la Lune, position et mouvements apparents des planètes, etc.) exigeant d'eux la

capacité de se représenter une situation de deux points de vue différents (les capacités de projection et d'orientation spatiales, ou *projective spatial ability*). Elle aussi a constaté une très forte motivation chez ses élèves. Mallon (1980; voir aussi Mallon & Bruce, 1982), enfin, a comparé deux approches sous la voûte d'un planétarium avec des élèves de la 3^e à la 5^e année pour l'apprentissage des constellations, la présentation magistrale et l'approche participative (activités concrètes, discussions, etc.), cette dernière donnant de meilleurs résultats à tous points de vue (cognitifs, affectifs et motivationnels).

Au contraire, Yee, Baer & Holt (1971), Dobson (1983), Twiest (1989) et Meyer (2000) arrivent à des résultats plus mitigés en ce qui concerne l'évolution des attitudes et de la motivation des élèves ayant assisté à une ou plusieurs séances au planétarium (ce que pourrait laisser croire à une atténuation de l'effet de nouveauté du planétarium). C'est aussi ce qu'à découvert Griffin (1978), qui a conçu un questionnaire pour estimer la valeur affective associée à l'utilisation du planétarium pour l'enseignement des sciences à des élèves du secondaire. Johnston (1981) a obtenu des résultats mitigés en terme de motivation en comparant deux approches différentes en ce qui concerne l'utilisation du planétarium à des fins éducatives auprès d'élèves de 5^e année, une présentation magistrale traditionnelle et une seconde approche que l'on pourrait qualifier de « découverte guidée ». Finalement, Edoff (1982) a comparé deux approches éducatives différentes auprès d'élèves de 5^e et de 8^e année pour enseigner les concepts de la mesure du temps, des saisons, des mouvements et des phases de la Lune, une approche incluant des manipulations directes de la part des spectateurs sous la voûte du planétarium, tandis que l'autre n'en prévoyait aucune. Cet auteur n'a pas pu mettre en évidence un quelconque effet du planétarium sur la motivation des élèves, peu importe l'approche privilégiée.

Quoi qu'il en soit, il semble tout de même que le planétarium permet le développement de comportements et d'attitudes procéduraux efficaces en astronomie et en sciences, comme l'ont mis en évidence Riordan (1991) dans sa recension des écrits, Tomlinson (1997) dans sa proposition de concepts astronomiques adéquats, échelonnés en

fonction de l'âge des élèves, et Brazell & Espinoza (2009) dans une méta-analyse d'une vingtaine d'études portant sur les phénomènes éducatifs dans un planétarium.

2.1.2.2 Importance de la présence physique de l'animateur du planétarium

On s'en doute, la présence physique d'un animateur sous la voûte du planétarium est un important facteur facilitant les apprentissages : Mallon (1974) l'a découvert en comparant deux programmes de planétarium identiques s'adressant à des élèves de 2^e année, l'un des spectacles étant commenté en direct par un animateur et l'autre utilisant une narration préenregistrée. D'autres études consultées dans le cadre de la présente thèse, mais datant d'avant 1970, insistent également sur l'importance de la formation accordée aux animateurs qui accueillent les groupes scolaires et les accompagnent tout au long de la séance : idéalement, cette formation devrait contenir des éléments de sciences et de science de l'éducation, complétés par une véritable expérience d'enseignement (Chamberlain, 1962; Korey, 1963; McDonald, 1966).

Fletcher (1977), qui a comparé un spectacle de planétarium de facture plus traditionnelle (présentation magistrale) à un spectacle fortement participatif s'adressant à des élèves de 8^e année pour l'enseignement du mécanisme des saisons, a constaté un fait similaire, à savoir que la maîtrise d'un programme présenté en direct par un animateur qui l'a déjà offert à quelques reprises influe positivement sur les apprentissages réalisés par les élèves spectateurs : plus l'animateur maîtrise le contenu, meilleurs seront les apprentissages des spectateurs.

2.1.2.3 Importance du mot de bienvenue et de la « démystification » du planétarium

Il semble qu'un théâtre de planétarium, à cause de son architecture singulière (salle circulaire, surface de projection en forme de dôme hémisphérique), de son ambiance feutrée, de la disposition particulière des fauteuils et de la présence en son sein d'équipements technologiques inhabituels (projecteur optomécanique central, projecteurs à diapositives ou vidéos) suscite tellement de questions sur son fonctionnement chez les

spectateurs que ces derniers ne sont pas d'emblée réceptifs aux contenus que l'on entend leur présenter au cours de la visite.

Cet effet a été d'abord pressenti par Akey (1973), puis mesuré par Ridky (1973; 1975), qui a étudié directement l'effet d'une séance de « démystification » du planétarium et de ses équipements sur des élèves de 8^e année, démontrant qu'une telle présentation avant un spectacle de planétarium améliorerait fortement l'apprentissage en « évacuant » les questions que les jeunes spectateurs se posaient à propos du lieu et de ses équipements. C'est aussi Ridky (1975) qui a formulé le concept de *mystique effect* (l'aura de mystère qui entoure le planétarium). Dans son étude, Edoff (1982) est arrivé à une conclusion similaire concernant l'influence positive d'une séance de démystification avant un spectacle de planétarium sur les apprentissages réalisés par les élèves.

Dans un même ordre d'idées, Bisard (1979a; 1979b) a montré qu'un mot de bienvenue prononcé en direct ou projeté sur le dôme et résumant le contenu du spectacle ou de la séance de planétarium avant que celle-ci ne débute, même sans aborder la question de l'architecture de la salle ou des équipements, favorisait la rétention d'informations par les spectateurs. Notons que l'étude de Bisard s'intéressait à des spectacles s'adressant à un large public, et non pas des spectacles scolaires. Nous croyons toutefois que ses conclusions peuvent parfaitement être transposées aux représentations scolaires : un mot de bienvenue permettrait aux spectateurs de développer une certaine disponibilité face aux contenus qui leur seront présentés ultérieurement.

2.1.2.4 Le rôle unique du planétarium comme simulateur astronomique

Il semble à première vue inutile de rappeler que l'originalité et la force du planétarium, particulièrement lorsqu'on le compare à la salle de classe, reposent sur sa capacité à simuler en accéléré des phénomènes astronomiques variés (Heyde, 1972; Hayward, 1975; Mergler, 1975; Bishop, 1976; Sunal & Sunal, 1977; Nevius, 1980; Palmer,

2007) et difficilement observables durant les heures normales de classe (Reed, 1973; Friedman, Schatz & Sneider, 1976; Urke, 1993; Rusk, 2003).

En conclusion de leur méta-analyse, dans laquelle ils comparent une vingtaine d'études menées dans divers planétariums, Brazell & Espinoza (2009) constatent que l'enseignement de notions d'astronomie d'observation et de position est en effet plus efficace sous la voûte d'un planétarium qu'en classe. Il semble également qu'une séance sous la voûte d'un planétarium fournit aux élèves un bagage d'expériences (observation du ciel, de ses mouvements et des phénomènes qui s'y déroulent) qu'ils pourront invoquer par la suite en situation d'apprentissage (Urke, 1993). Comme le souligne Palmer (2007), cela leur évite la surcharge cognitive de devoir créer eux-mêmes des images mentales lorsqu'ils étudient ces phénomènes.

Ces constats amènent plusieurs auteurs à proposer que le planétarium devrait se concentrer sur ce qu'il fait de mieux, soit la simulation de la voûte céleste et de ses mouvements, et mettre de côté les sujets qu'il ne peut illustrer mieux que ce qu'il est possible de faire dans une salle de classe (Heyde, 1972; Reed, 1973; 1976; Sonntag, 1982; Urke, 1993).

2.1.2.5 Le planétarium et les capacités de projection et d'orientation spatiales

Un aspect important des concepts astronomiques fréquemment exposés en classe et au planétarium est le fait que nombre d'entre eux, même ceux qui sont facilement perceptibles dans la vie quotidienne, ne présentent pas le même aspect selon que l'observateur est sur Terre – et sa position exacte sur Terre entre également en ligne de compte – ou en un point de l'espace situé loin de la Terre. Par exemple, les phases de la Lune vues de la surface de la Terre n'auront pas le même aspect selon que l'observateur se trouve dans l'hémisphère nord ou dans l'hémisphère sud. De plus, un observateur situé dans l'espace à l'extérieur de l'orbite lunaire ne verra pas non plus le phénomène de la même façon. Le même observateur sur la face visible de la Lune verra plutôt des phases de la Terre !

Il est par conséquent extrêmement difficile de comprendre un tel phénomène à moins d'être capable de coordonner différents points de vue, c'est-à-dire se représenter un phénomène sous différents angles à la fois, ce que les chercheurs dont nous citerons les travaux plus loin appellent généralement les capacités de projection et d'orientation spatiales (*spatial orientation ability*). Mathewson (1999) nous rappelle que ces capacités dépendent autant de nos yeux que de notre cerveau :

« [v]isual-spatial thinking includes vision – the process of using the eyes to identify, locate, and think about objects and orient ourselves in the world, and imagery – the formation, inspection, transformation, and maintenance of images in the “mind’s eye” in the absence of a visual stimulus. » (p. 34)

Plus précisément, Linn & Petersen (1985) définissent les capacités de projection et d'orientation spatiales de la manière suivante : *« [s]patial ability generally refers to skill in representing, transforming, generating, and recalling symbolic, nonlinguistic information »* (p. 1482). Pour Sonntag (1988a), il s'agit de *« [o]ne’s ability to mentally juxtapose, manipulate, and rotate an object and to create structures in the mind from written or verbal directions »* (p. 34). Gardner (1977) parle plutôt d'intelligence spatiale, mais ce terme englobe une réalité possédant les mêmes attributs et caractéristiques : aptitude à percevoir une forme ou un objet, aptitude à reconnaître le même élément sous différents angles, aptitude à reconnaître ou à opérer mentalement une transformation (rotation, translation, torsion...), capacité à évoquer une image et à la transformer ensuite, capacité à produire une représentation graphique ressemblante d'une situation spatiale, etc.

Il apparaît que les capacités de projection et d'orientation spatiales jouent un rôle fondamental dans l'aptitude des élèves à comprendre l'explication d'un phénomène astronomique donné, particulièrement sous la voûte du planétarium :

« It would appear that spatial orientation ability is an extremely powerful student characteristic, extending influence in both the cognitive and affective domains. This variable should be of interest to anyone attempting to evaluate the educational value of the planetarium. » (Sonntag, 1987, p. 66)

Black (2005) a ainsi montré qu'il existe une corrélation positive entre les réponses à un test écrit mesurant la compréhension de concepts liés aux sciences de la Terre (géologie, astronomie, météorologie, etc.) et les habiletés spatiales d'étudiants universitaires dans des domaines de formation non-scientifiques. Ces habiletés spatiales sont celles définies par Linn & Petersen (1985), soit la rotation mentale, la perception spatiale et la visualisation spatiale. Black (2005) remarque en particulier une forte corrélation entre les réponses au test et les capacités de rotation mentale des sujets, capacités qu'elle juge essentielles pour comprendre de nombreux mécanismes à l'origine de phénomènes astronomiques, comme les phases de la Lune. Kikas (2006) a obtenu des résultats similaires avec des élèves de 1^e et 2^e années : elle a constaté une forte corrélation entre les habiletés de visualisation spatiales et les capacités verbales des élèves et leur compréhension des concepts scientifiques liés à la forme de la Terre et à la gravitation.

Il semble de plus que les capacités de projection et d'orientation spatiales des élèves facilitent leurs apprentissages sous la voûte d'un planétarium, comme l'a constaté Etheridge (1976) qui, en comparant deux présentations sur les constellations, l'une utilisant le planétarium et l'autre, des diapositives de champs d'étoiles, a mesuré de nets apprentissages du côté des élèves de niveau *College* qui possédaient déjà de meilleures capacités de projection et d'orientation spatiales que les autres. Bishop (1980a) arrive elle aussi à une conclusion semblable dans son étude que nous avons déjà commentée. Dans son étude menée exclusivement en classe, Reynolds (1990) a demandé à des élèves de la 4^e année du secondaire de proposer une explication pour les phases de la Lune en utilisant divers moyens de leur choix (écrits, dessins, maquettes 3D, etc.). Il a constaté que les élèves ayant proposé des modèles tridimensionnels expliquaient mieux le mécanisme des phases que les autres, ce qui semble suggérer encore une fois que les élèves possédant déjà de bonnes capacités de projection et d'orientation spatiales auront plus de facilité à comprendre les mécanismes complexes à la source de nombreux phénomènes astronomiques. Dans un contexte scolaire similaire, Wilhelm (2009) a montré que l'utilisation de modèles bi- et tridimensionnels du système Terre-Lune-Soleil pour

enseigner le mécanisme des phases de la Lune aidait les élèves à améliorer ces mêmes capacités spatiales, davantage encore chez les filles.

D'autres chercheurs constatent au contraire que la visite d'un planétarium semble profiter davantage aux élèves qui possèdent des habiletés de projection et d'orientation spatiales moyennes ou faibles : c'est le cas de Bondurant (1975), qui a utilisé le planétarium comme instrument d'évaluation des compétences utilisées par des élèves de 5^e année dans la reconnaissance des constellations, et de Sonntag (1981), dans une étude déjà citée.

Il semble toutefois qu'une séance de planétarium peut améliorer les capacités de projection et d'orientation spatiales de tous les spectateurs, en particulier celles des élèves pour qui ces capacités sont plus faibles au départ. Cette conclusion est soutenue par les travaux de Battaglini (1971), qui a utilisé le planétarium comme outil d'évaluation des capacités de projection et d'orientation spatiales d'élèves de 4^e année; également par les travaux de Bondurant (1975), de Hayward (1975), de Bishop (1978) et de Friedman, Lowry, Pulos, Schatz & Sneider (1993); aussi par les nombreuses études de Sonntag (1981; 1982; 1987; 1988a; 1989) menées sur le sujet; et plus récemment par Baxter & Preece (2000), qui ont évalué les apprentissages d'élèves de 3^e année et d'étudiants universitaires, en formation pour devenir enseignants, à l'aide d'un mini-planétarium et d'un ordinateur muni d'un logiciel d'astronomie.

On constate souvent un écart entre les capacités de projection et d'orientation spatiales des filles et des garçons d'un même groupe d'âge, ces derniers performant généralement mieux que les filles, en particulier pour des tâches impliquant la rotation mentale et la perception spatiale (Linn & Petersen, 1985; Hacker, 1986). Mais les travaux de Bishop (1980a) suggèrent que le planétarium est peut-être un outil très important pour permettre aux filles, à l'aube de l'adolescence, de combler cet écart. Sonntag (1988b) et Baxter & Preece (2000) font la même proposition. Ceci étant dit, et c'est là une mise en garde importante, les concepts astronomiques qui requièrent la coordination de plusieurs

points de vue et le passage de représentations bidimensionnelles à des situations tridimensionnelles ne semblent pas à la portée des élèves plus jeunes de niveau primaire (Bishop, 1980a; Sonntag, 1982; Dobson, 1983).

Enfin, Sonntag (1982) cite plusieurs études qui arrivent à la conclusion qu'un pourcentage important de la population en général (l'auteur indique près de 33 % de ses propres sujets) éprouvent de la difficulté à coordonner deux ou plusieurs points de vue différents. Ceci le conduit à émettre une critique importante à l'endroit des études qui ont cherché à comparer l'enseignement en classe et sous la voûte du planétarium sans tenir compte des capacités de projection et d'orientation spatiales des sujets. Compte tenu du rôle fondamental que jouent ces capacités dans la maîtrise de nombreux concepts astronomiques et du fait que les élèves qui les maîtrisent bien réussissent souvent mieux en situation d'enseignement traditionnel (en classe), le chercheur est d'avis que ces deux facteurs ont peut-être favorisé artificiellement la salle de classe au détriment du théâtre du planétarium dans un grand nombre d'études comparatives.

2.1.2.6 Importance de mener des activités concrètes sous la voûte du planétarium

De nombreux chercheurs se sont intéressés à diverses techniques d'animation à privilégier sous la voûte d'un planétarium pour favoriser les apprentissages en astronomie. C'est ainsi qu'ils ont découvert que les séances interactives menées au planétarium et impliquant le travail d'équipe, la manipulation de modèles tridimensionnels, le jeu de rôle, l'approche kinesthésique, la prise de notes, la réalisation de croquis et d'autres activités concrètes favorisent l'apprentissage de notions astronomiques

C'est le cas de Mergler (1975), dont nous avons déjà mentionné les travaux, et de Schafer (1977), qui a sondé la préférence du grand public visitant un planétarium pour divers types de spectacles, les spectacles interactifs et participatifs remportant l'adhésion du plus grand nombre. Friedman, Schatz & Sneider (1976) et Beetle (1978) suggèrent la même chose, tout comme Bishop (1977a; 1977b), qui a utilisé une approche fortement participative et manipulative pour enseigner le mouvement diurne à des élèves de 2^e année

et les phases de la Lune à des élèves de 6^e année, des concepts qu'elle juge toutefois difficiles pour des élèves de ces groupes d'âge, mais dont le planétarium a beaucoup facilité l'apprentissage.

Nous avons déjà mentionné les travaux de Mallon (1980) et Mallon & Bruce (1982) auprès d'élèves de la 3^e à la 5^e année, et ceux de Edoff (1982) auprès d'élèves de 5^e et de 8^e année, travaux qui ont démontré la supériorité d'une approche manipulative et participative dans un planétarium pour l'apprentissage des constellations, des saisons et des phases de la Lune, entre autres. Bishop (1988) préconise, quant à elle, une approche kinesthésique, tout comme Plummer (2009), qui a montré qu'une telle approche aidait les élèves à s'approprier des savoirs en astronomie. Rusk (2003) a fait la démonstration de l'avantage qu'il y avait à manipuler des modèles sous la voûte du planétarium, en particulier pour l'apprentissage du mécanisme des phases de la Lune. Une telle approche « concrète » sous la voûte du planétarium est particulièrement utile chez les plus jeunes élèves, comme l'a montré Bishop (1980a) dans sa propre étude, qui faisait une large place à la prise de notes et la manipulation de modèles sous la voûte d'un planétarium.

Mentionnons tout de même que d'autres auteurs, moins nombreux, qui ont eux aussi étudié ces approches participatives et manipulatoires obtiennent au contraire des résultats mitigés : Cottrill (1976), dans une étude comparant un spectacle participatif (*ask & do*) à une représentation similaire de facture plus traditionnelle (*show & tell*) s'adressant à des élèves de 4^e année et abordant les thèmes du système solaire, de la rotation et révolution des objets du système solaire et de l'Univers au-delà du système solaire; Reed (1976), avec une approche manipulative pour l'enseignement du mouvement diurne auprès d'élèves de 1^e année, des élèves selon lui trop jeunes pour aborder un tel concept; Fletcher (1977), avec un spectacle participatif à propos des saisons; et Johnston (1981), dans le cadre d'une séance de « découverte dirigée » sous le dôme d'un planétarium.

Giles (1981; voir aussi Giles & Bell, 1982) a étudié l'utilisation répétée de divers types d'aides à l'apprentissage (*mediators of learning*), comme le regroupement de concepts et l'échafaudage, sous la voûte du planétarium auprès d'élèves de la fin du secondaire, pour constater qu'une telle approche favorise grandement les apprentissages par les élèves. De plus, l'enseignement par les pairs sous la supervision d'un mentor demeure un bon moyen de favoriser l'apprentissage de notions en astronomie, comme l'ont montré Reynolds (1990) et Baxter & Preece (2000), qui constatent que le fait de devoir expliquer un concept à autrui est un puissant stimulant pour le comprendre d'abord soi-même de manière approfondie.

2.1.2.7 L'impact visuel du planétarium

Il semble inutile de rappeler que les stimuli visuels dominant lors d'une séance de planétarium, en particulier les images en mouvement et les images réalistes pleine voûte qui remplissent complètement le champ de vision du spectateur. C'est exactement la conclusion à laquelle arrivent Gutsch (1978), qui a mesuré la réponse affective des spectateurs qui assistaient à un spectacle de planétarium grand public comportant des scènes utilisant divers type de stimuli visuels, et Bishop (1981), qui a mesuré la vitesse et la justesse à laquelle les sujets de son étude reconnaissaient des constellations selon la portion de leur champ de vision couvert par les images. Notons toutefois qu'Etheridge (1976) a obtenu des résultats mitigés à ce sujet. La trame sonore d'un spectacle peut aussi jouer un rôle positif si elle est pertinente et bien synchronisée aux éléments visuels, qui dominant l'apprentissage (Brunello, 1992); dans le cas contraire, la bande sonore peut par contre constituer une source de distraction, comme l'a constaté Wooten (1979) dans son étude, où un spectacle commenté en direct avec bande sonore a été comparé à un autre sans support musical.

Les images dans un planétarium sont importantes, donc, tout comme l'est la façon dont les images sont montrées. Hunt (1991) nous signale qu'il faut en effet laisser suffisamment de temps aux spectateurs pour s'approprier les informations visuelles contenues dans les images projetées sur la voûte d'un planétarium, et il est souhaitable

d'attirer leur attention sur les éléments les plus pertinents de ces images par divers moyens, qu'il s'agisse de flèches, de surlignement, de couleurs vives, etc.

2.1.2.8 Évaluation des apprentissages sous la voûte du planétarium

La plupart des études que nous avons consultées dans le cadre de notre recherche ont utilisé des moyens traditionnels pour évaluer les apprentissages des sujets participants aux recherches, en particulier des tests écrits (questionnaires à choix multiples ou non, questions à développement, échelle de Likert, dessins et croquis). La question se pose de savoir si ces moyens évaluaient bien ce que les chercheurs voulaient mesurer...

À la lumière des conclusions obtenues par de nombreux chercheurs, il semble que non. L'évaluation des connaissances acquises dans l'environnement virtuel du planétarium devrait plutôt se faire sous la voûte d'un planétarium ou sous le vrai ciel, plutôt que par le biais de questionnaires bidimensionnels (papier et crayon) qui ne mesurent apparemment pas le même type d'apprentissages. Warneking (1970) a été l'un des premiers à insister sur le fait que le mode d'évaluation devait reprendre certains éléments de la situation éducative, si l'on voulait être certain que la mesure reflète véritablement les apprentissages. Citons le travail de Dean & Lauck (1972), qui ont fait œuvre de pionniers en étant les premiers à mesurer les apprentissages, faits sous la voûte du planétarium à propos des constellations, dans un champ, à la campagne, sous le vrai ciel étoilé.

Smith (1974a; 1974b; 1974c; 1976; 1977; 1978) a lui aussi beaucoup étudié cette question avec des élèves de divers groupes d'âge et avec des adultes, toujours à propos de la reconnaissance des constellations, pour arriver à des conclusions similaires. Selon lui, il semble particulièrement difficile de mesurer des connaissances acquises sous la voûte du planétarium à l'aide d'un questionnaire papier-crayon, tandis que l'inverse (apprentissage en classe et évaluation au planétarium) semble donner de meilleurs résultats. Mais si l'on n'a pas le choix d'évaluer les apprentissages réalisés au planétarium à l'aide d'un questionnaire écrit, il faut au moins valider les réponses au questionnaire en les comparant

à des réponses verbales obtenues sous la voûte d'un planétarium, comme ce qu'à fait avec succès Mallon (1980) dans sa propre étude.

Ceci étant dit, Bondurant (1975), Hayward (1975), Bishop (1980a) et Ankney (1981) mentionnent tous la difficulté que vivent les élèves qui doivent passer d'un apprentissage en 2D (représentations sur une feuille de papier) à une évaluation en 3D (planétarium) et vice versa, sans compter le fait que les représentations du ciel étoilé sur papier sont souvent des images « en négatif » (étoiles noires sur fond blanc) et à des échelles différentes, sans respecter l'orientation changeante des étoiles dans le ciel au gré des mouvements diurne et saisonnier, etc.

2.1.2.9 Le planétarium et les conceptions des élèves

Un dernier point de notre recension concerne la façon dont quelques études seulement (deux, pour être précis) ont considéré les apprenants comme les constructeurs de leurs propres savoirs et se sont donc intéressées à leurs conceptions et les conditions de leur évolution (nous développerons cette vision constructiviste de l'apprentissage à la section 2.0 du présent cadre conceptuel). Sadler (1992) et Plummer (2009) ont tous deux montré le grand intérêt éducatif d'amener l'élève à faire des prédictions basées sur ses conceptions quant à l'aspect ou le fonctionnement de phénomènes astronomiques, puis de les confronter à la simulation réaliste de ces phénomènes sous la voûte du planétarium. Le fait que si peu d'études menées dans les planétariums jusqu'à ce jour aient adopté ce point de vue constructiviste est une bonne indication du grand intérêt qu'il y a à mener une recherche mettant en jeu les conceptions des spectateurs sous la voûte d'un planétarium numérique, ce qui est justement le but de la présente thèse.

2.1.3 Conclusion : Les meilleures pratiques éducatives dans un planétarium

En lisant et comparant les nombreux résultats de recherches menées sous la voûte d'un planétarium, résumés dans les sections précédentes et présentés de manière plus

détaillée à l'annexe 2, on peut mettre en évidence les points saillants suivants, qui constituent en quelque sorte une liste des meilleures pratiques éducatives sous la voûte d'un planétarium :

L'impact affectif et comportemental du planétarium

- Le planétarium permet le développement d'une attitude positive par rapport à l'astronomie et aux sciences et il possède un pouvoir attractif et motivationnel important;
- Le planétarium permet le développement de comportements et d'attitudes procédurales efficaces en astronomie et en sciences.

Importance de la présence physique de l'animateur du planétarium

- La présence physique d'un animateur sous la voûte du planétarium est un important facteur facilitant les apprentissages.

Importance du mot de bienvenue et de la « démystification » du planétarium

- Un mot de bienvenue prononcé en direct ou projeté sur le dôme et résumant le contenu du spectacle ou de la séance de planétarium favorise les apprentissages par les spectateurs;
- Une séance de « démystification » du planétarium et de ses équipements améliore la rétention des connaissances par les spectateurs.

Le rôle unique du planétarium comme simulateur astronomique

- L'originalité et la force du planétarium reposent sur sa capacité à simuler en accéléré des phénomènes astronomiques variés et difficilement observables durant les heures normales de classe;
- La séance sous la voûte d'un planétarium fournit aux élèves un bagage d'expériences qu'ils pourront invoquer par la suite en situation d'apprentissage;
- Le planétarium devrait se concentrer sur ce qu'il fait de mieux, soit la simulation de la voûte céleste et de ses mouvements.

Le planétarium et les capacités de projection et d'orientation spatiales

- Les capacités de projection et d'orientation spatiales des élèves constituent un facteur important qui facilite leurs apprentissages sous la voûte d'un planétarium;
- Le travail au planétarium semble profiter davantage aux élèves qui possèdent déjà des habiletés de projection et d'orientation spatiales fortes;
- Une séance de planétarium peut améliorer les capacités de projection et d'orientation spatiales des spectateurs, en particulier celles des élèves plus faibles et des jeunes filles;
- Les jeunes filles semblent avoir des capacités de projection et d'orientation spatiales plus faibles que les garçons, en particulier en ce qui concerne la rotation mentale, mais le planétarium peut les aider à combler cet écart;
- Les concepts astronomiques qui requièrent la coordination de plusieurs points de vue et le passage de représentations bidimensionnelles à des situations tridimensionnelles ne semblent pas à la portée des élèves plus jeunes;
- Le planétarium réduit la charge cognitive des élèves en leur montrant des représentations tridimensionnelles d'objets et de phénomènes astronomiques qu'ils devaient autrement concevoir eux-mêmes.

Importance de mener des activités concrètes sous la voûte du planétarium

- Les séances interactives menées sous la voûte d'un planétarium impliquant le travail d'équipe, la manipulation de modèles tridimensionnels, le jeu de rôle, l'approche kinesthésique, la prise de notes, la réalisation de croquis et d'autres activités concrètes favorisent l'apprentissage de notions astronomiques, particulièrement chez les plus jeunes élèves;
- L'utilisation répétée des aides à l'apprentissage et de l'échafaudage sous la voûte du planétarium favorise les apprentissages par les élèves;
- L'enseignement par les pairs sous la supervision d'un mentor est un bon moyen de favoriser l'apprentissage de notions en astronomie.

L'impact visuel du planétarium

- Les stimuli visuels dominent lors d'une séance de planétarium, en particulier les images réalistes pleine voûte qui remplissent le champ de vision du spectateur et les images en mouvement;
- La trame sonore peut par contre constituer une source de distraction, à moins qu'elle ne soit pertinente et synchronisée aux éléments visuels;
- Il faut laisser le temps aux spectateurs de s'approprier les informations visuelles contenues dans les images projetées sur la voûte d'un planétarium et il est souhaitable d'attirer leur attention sur les éléments les plus pertinents de ces images.

Évaluation des apprentissages sous la voûte du planétarium

- L'évaluation des connaissances acquises dans l'environnement virtuel du planétarium devrait se faire sous la voûte d'un planétarium ou sous un vrai ciel, plutôt que par le biais de questionnaires bidimensionnels (papier et crayon) qui ne mesurent apparemment pas le même type d'apprentissages;
- Si on n'a pas le choix d'évaluer les apprentissages réalisés au planétarium à l'aide d'un questionnaire écrit, il faut au moins valider les réponses au questionnaire en les comparant à des réponses obtenues sous la voûte d'un planétarium.

Le planétarium et les conceptions des élèves

- Amener l'élève à faire des prédictions basées sur ses conceptions quant à l'aspect ou le fonctionnement de phénomènes astronomiques, puis les confronter à la simulation réaliste de ces phénomènes sous la voûte du planétarium, est une bonne façon de favoriser les apprentissages en astronomie.

Ces résultats donnent de précieuses indications quant aux éléments qui favorisent l'apprentissage dans un contexte de planétarium (animation, participation active des spectateurs, stimuli visuels abondants, manipulation de modèles, etc.). On comprend donc que le planétarium excelle lorsqu'il déploie ses forces intrinsèques.

Par contre, très peu de spectacles dont on a étudié l'impact cognitif et affectif sur les spectateurs ont été conçus en tenant compte des conceptions des élèves par rapport aux thèmes abordés (Girault, Sirard, Bigeault, Rivest & Monsché, 1993). Or, les recherches des trente dernières années en didactique des sciences insistent toutes sur ce point : les apprenants, qui construisent eux-mêmes leurs connaissances, sont seuls responsables de leurs apprentissages et ils apprennent à partir de ce qu'ils savent déjà, ce que l'on appelle leurs conceptions. Tout enseignement doit prendre appui et rendre explicite ces conceptions afin d'amener les apprenants à les dépasser (Astolfi & Develay, 2002).

Par conséquent, il nous paraît primordial de vérifier à quel point l'expression des représentations des élèves et leur prise en compte dans la trame même d'une séance de

planétarium provoque des apprentissages appréciables et durables. C'est précisément cette approche plus « constructiviste » de l'enseignement dans les planétariums que nous entendons développer dans le cadre du présent travail de recherche.

Dans le chapitre suivant, nous allons justement définir ce que nous entendons par conception d'élève et étudier quatre approches théoriques qui se proposent de faciliter leur évolution, le tout bien sûr dans le contexte précis de l'enseignement de notions astronomiques dans un planétarium.

2.2 Conceptions d'élèves et changement conceptuel

« Avant d'instruire, il faut commencer par détromper. »
Montesquieu, De l'esprit des lois (1748)

« Soon after the appearance of the Rubber Tipped pencil, it's use in schools became general; but within the last few years, there has been a tendency among teachers and school directors to turn to the plain pencil, without the [eraser] tip. [...] One of the duties of a teacher is to make pupils correct their errors. Attached erasers [...] make it easier to correct errors and hence it might almost be laid down as a general law, that the easier errors may be corrected, the more errors will be made. »
(Catalogue de la Compagnie de crayons J. Dixon, 1903,
cité dans Petroski (1992), 178-179)

Cette section sera consacrée à la présentation du second volet de notre approche d'intervention didactique dans un planétarium numérique, à savoir le travail sur les conceptions des élèves, leur révélation et les conditions de leur évolution et/ou de leur franchissement. Nous débuterons par un rappel de ce que sont les conceptions des élèves, leur origine et leurs caractéristiques, pour ensuite recenser quatre approches du changement conceptuel qui ont été proposées au cours des trente dernières années pour assurer leur évolution et/ou leur franchissement, et donc un véritable apprentissage par les élèves. Nous conclurons en exposant les quelques éléments concrets de ces approches théoriques que nous privilégierons pour la suite de notre travail, soit la conception et l'évaluation d'une intervention didactique dans un planétarium numérique au sujet des phases de la Lune et s'adressant à des élèves du premier cycle du secondaire.

2.2.1 Origine et caractéristiques des conceptions d'élèves

Cette section sera consacrée à la question de savoir comment les enfants apprennent les sciences, l'origine des conceptions, leur définition et l'exposition de la vision constructiviste de l'apprentissage, basée sur la prise en compte des conceptions des élèves.

2.2.1.1 Comment les enfants apprennent les sciences ?

Si l'on considère que les enfants sont les principaux acteurs dans leur processus d'apprentissage et les constructeurs de leur propre savoir, notons que le nombre limité de connaissances qu'ils maîtrisent, de même que leur capacité réduite à utiliser un système de pensée rationnelle et logique (surtout chez les plus jeunes), donne lieu à un grand nombre d'idées et de concepts naïfs, personnels, mal construits et mal maîtrisés (Bishop, 1980b; Driver, Guesne et Tiberghien, 1985; Bransford, Brown & Cocking, 1999; Duit, s.d.), concepts que les chercheurs ont nommé de diverses manières : *misconceptions* (en anglais), représentations, conceptions, fausses conceptions, conceptions erronées, etc.

Ces conceptions sont de plus des obstacles à l'apprentissage de concepts plus abstraits et plus proches de ce que les experts professent (Driver, 1981). Il est donc essentiel, pour ceux et celles qui conçoivent l'enseignement, de tenir compte de ce « déjà-là » conceptuel avec lequel les enfants abordent toute nouvelle situation d'apprentissage, puisqu'il s'agit souvent des seuls outils intellectuels à leur disposition en situation d'apprentissage (Giordan & de Vecchi, 1987). Il s'agit d'une profonde remise en question de la façon « traditionnelle » d'enseigner les sciences, remise en question basée sur une nouvelle vision de l'apprentissage :

« [...] for the learner, learning is the revision of his or her own cognitive structure, that is a shift in the way he or she perceives and construes events and behaves in situations. This view of learning implies that an appreciation of the student's view of the world, and the student's meanings for words, needs to be fully appreciated if teaching is to be successful. » (Osborne & Gilbert, 1980, p. 379)

Pour reprendre la citation d'Ausubel (1968) que nous mettons en épigraphe de l'introduction du présent chapitre, « le facteur le plus important influençant l'apprentissage est ce que l'apprenant sait déjà. Découvrez ces connaissances préalables et enseignez-lui en conséquence⁸ ».

⁸ Notre traduction.

2.2.1.2 Une vision constructiviste de l'apprentissage

Une vision de l'apprentissage axée sur la remise en question des conceptions des apprenants, dont nous avons parlé à la section précédente, est une des conséquences les plus profondes du constructivisme, une perspective philosophique et psychologique qui prétend que les individus construisent eux-mêmes leurs propres savoirs (Schunk, 2004). Il existe plusieurs acceptions du mot constructivisme en éducation, mais toutes reposent sur les mêmes bases, à savoir :

- L'apprentissage est un processus actif de construction de sens plutôt que d'acquisition de connaissances;
- L'enseignement consiste à supporter cette construction de sens plutôt que de communiquer des savoirs. (Duffy & Cunningham, 1996)

Le constructivisme part du principe qu'il existe plusieurs façons différentes d'appréhender la réalité du monde et que chaque individu appréhende cette réalité en construisant des modèles mentaux personnels, ce que l'on nomme les conceptions. Ces modèles mentaux, que l'on pourrait aussi qualifier de théories personnelles, sont soutenus par l'enseignement formel et informel et sont d'autant plus faciles à construire qu'ils sont liés à des modèles personnels et des conceptions déjà existants (Salis & Pantelidis, 1997). Les principales caractéristiques des conceptions ont été établies au fil des recherches en didactique (Driver, 1981; Driver, Guesne & Tiberghien, 1985; Giordan & de Vecchi, 1987; Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel & Toussaint, 1997; Thouin, 1997; Comins, 1998; Comins, s.d.; Astolfi, Peterfalvi & Vérin, 2001) :

- Les conceptions sont inspirées par le sens commun et l'observation directe, immédiate, de phénomènes naturels facilement perceptibles par nos sens dans notre environnement;
- Elles sont liées à un champ d'application plus ou moins restreint dont la pertinence dépend du type de problème à résoudre;
- La construction des conceptions commence dès le plus jeune âge par la manipulation d'objets et l'observation du monde environnant;

- Les conceptions sont hautement personnelles. Confrontés à un même phénomène naturel, des enfants en feront des observations différentes les uns des autres (en fonction de leurs idées, de leurs attentes et de leurs expériences préalables) et offriront des interprétations très diverses du phénomène en rapport avec leur propre vision du monde;
- Les diverses conceptions d'un même enfant peuvent être incohérentes entre elles et mener à des interprétations contradictoires d'un même phénomène naturel. D'autre part, une même conception peut déboucher sur des interprétations différentes d'un même phénomène dans des contextes différents sans que l'enfant ne le ressente comme une contradiction. Son système explicatif personnel n'a pas la portée ni l'universalité auxquelles aspirent les concepts scientifiques. Malgré cela, l'enfant ne ressent pas spontanément le besoin d'adhérer à un modèle plus général qui permettrait d'amoindrir ou d'annuler incohérences et contradictions;
- Les conceptions ne sont pas des savoirs figés, mais elles évoluent au gré des situations didactiques, des savoirs préalables que l'apprenant possède, des questions et des problèmes qui lui sont soumis, des outils intellectuels auxquels il a accès en fonction de son niveau de développement (opérations cognitives), de même que de la structure des savoirs qui lui sont enseignés (épistémologie, terminologie, représentations schématiques, symboles, etc.);
- Les conceptions sont, la plupart du temps, très différentes des concepts communément acceptés par la communauté des chercheurs. Elles résistent à l'enseignement tel qu'il est généralement prodigué et persistent souvent jusqu'à l'âge adulte.

Les origines des conceptions sont diverses : elles correspondent à des explications personnelles construites « sur-le-champ » par les apprenants confrontés à des manipulations directes ou des observations de phénomènes naturels immédiatement perceptibles, ou mis en contact avec les idées véhiculées par leur environnement social (autres enfants, professeurs, parents, émissions de télévision, cinéma, etc.). Certaines conceptions sont également liées au développement affectif de l'enfant et au travail de son inconscient (Thouin, 2004). D'autres, enfin, sont liées au développement historique des connaissances; on peut d'ailleurs établir un parallèle entre elles et les idées qui ont joué un rôle important dans l'évolution de la pensée humaine (Duschl, Hamilton & Grandy, 1992).

2.2.2 Prise en compte didactique et évolution des conceptions des apprenants

Il existe encore aujourd'hui un débat à propos de la prise en compte didactique des conceptions : sont-elles des obstacles qui doivent être abattus et franchis, comme le préconise Bachelard (1938; 1940) lorsqu'il écrit qu'« en toutes circonstances, l'immédiat doit céder le pas au construit » (Bachelard, 1940, p. 144), ou plutôt des matériaux dont les capacités d'adaptation facilitent les apprentissages (diSessa, 1993; Potvin, 2002) ? Nous croyons qu'elles sont un peu des deux. En effet, les conceptions sont des « erreurs » conceptuelles, mais elles sont aussi les seuls outils intellectuels dont dispose l'apprenant pour construire ses connaissances. Il faut donc « faire avec pour aller contre » afin d'amener l'apprenant à les dépasser et les faire évoluer (Giordan & de Vecchi, 1987). Autrement dit, il faut considérer les conceptions non pas comme des savoirs figés qui doivent être remplacés par d'autres, mais plutôt comme de « véritables débuts de modélisation, avec leur propre cohérence et leur propre logique » (Johsua & Dupin, 1999, p. 333). Il s'agit donc d'utiliser l'extraordinaire capacité d'adaptation et d'évolution des conceptions, leur aptitude à intégrer des faits nouveaux, dans un contexte qui dirigera cette évolution vers le modèle que l'on désire transmettre. Toute la question est donc de savoir par quels moyens didactiques on peut provoquer et « diriger » cette évolution pour que les conceptions se rapprochent des modèles « canoniques » dont l'apprentissage demeure le but ultime de tout enseignement, particulièrement en science.

Dans un premier temps, les travaux en didactique des sciences prenant en compte les conceptions des apprenants ont permis d'établir l'importance de créer chez eux un conflit de centration, ou conflit cognitif — conflit entre les diverses conceptions d'un même individu ou entre ses conceptions et l'observation de phénomènes naturels ou de résultats d'expériences —, ou encore un conflit sociocognitif entre les conceptions de différents élèves et/ou les concepts acceptés par la communauté scientifique (Driver, Asoko, Leach, Mortimer & Scott, 1994; Carey, 2000). Dans ces modèles du « changement conceptuel »,

un tel conflit devrait créer une insatisfaction chez l'apprenant et l'amener à se rendre compte du caractère limité, inadéquat et infructueux de ses conceptions et de l'intérêt que présentent d'autres conceptions qui lui sont proposées. Ces nouvelles conceptions auront d'autant plus de chances d'être acceptées par les apprenants qu'elles seront intelligibles et plausibles, qu'elles seront d'application plus générales que leurs conceptions initiales et qu'elles seront plus fructueuses, permettant de rendre compte de phénomènes jusque-là inexplicables (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982; Strike & Posner, 1982).

Mais d'autres approches ont depuis été proposées qui critiquent cette méthodologie du conflit et proposent une autre vision du changement conceptuel. Dans ce qui suit, nous présenterons en détail la théorie de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), de même que des modèles concurrents : Vosniadou (1994), diSessa (1993) et Giordan (1989), dans cet ordre.

Avant d'entreprendre cette recension, précisons ce que nous entendons par l'expression « changement conceptuel ». Vosniadou, Vamvakoussi & Skopeliti (2008) rappellent que cette expression a été introduite par Kuhn (1962) pour indiquer que les concepts inscrits dans une théorie scientifique donnée changent de signification lorsque cette théorie est remplacée par une autre au terme d'un changement de paradigme. Suite à un tel changement, la nouvelle signification des concepts devient incompatible (incommensurable, selon l'expression de Kuhn) avec les concepts inscrits dans la théorie précédente. Dans le contexte du développement cognitif, le changement conceptuel peut aussi être vu comme l'assignation d'un concept à une catégorie ontologique différente, ou encore à la création de nouvelles catégories ontologiques (Carey, 1991). Le changement conceptuel peut également impliquer une différenciation ou un regroupement de concepts.

Thagard (2008) a, pour sa part, inclus dans l'expression changement conceptuel tous les types de changement qui peuvent survenir dans le processus d'apprentissage, du simple ajout d'une nouvelle règle ou l'observation d'une nouvelle manifestation d'un concept déjà établi, jusqu'à la révision radicale d'un concept impliqué dans un changement de théorie et qui s'accompagne d'un changement de catégorie ontologique. Chi (2008) distingue quant à

elle trois types de changements conceptuels : la révision des croyances, la transformation des modèles mentaux et les changements ou glissements de catégories. De nombreux autres auteurs font des distinctions similaires, dont Keil & Newman (2008), Wiser & Smith (2008) et Inagaki & Hatano (2008).

Mais comme Vosniadou et al. (2008), nous nous intéresserons dans ce chapitre aux changements conceptuels induits par l'enseignement formel ou informel en sciences et qui consiste à exposer les élèves ou les apprenants à des concepts contre-intuitifs. La recherche des trente dernières années en didactique des sciences a montré de façon exemplaire à quel point les élèves, peu importe leur âge et leur niveau scolaire, avaient de la difficulté à s'appropriier les concepts et théories scientifiques, surtout lorsque ces dernières entrent en conflit avec leurs idées premières et leurs théories naïves, basées sur l'expérience directe de la nature et les connaissances véhiculées par la culture générale. C'est précisément dans ce courant que s'inscrit notre propre démarche pour favoriser les apprentissages dans un planétarium numérique, démarche que nous espérons clarifier à la lumière des quatre modèles didactiques du changement conceptuel que nous exposerons dans la suite de cette section.

Pour chacun des quatre modèles exposés, nous présenterons d'abord les fondements théoriques, suivis de la vision du changement conceptuel propre à chaque modèle, pour enfin discuter de leur application en situation concrète d'enseignement ou de médiation de la science.

2.2.2.1 Le modèle « classique » de Posner, Strike, Hewson & Gertzog (1982)

Posner, Strike, Hewson & Gertzog ont présenté en 1982 un important modèle pour décrire les conditions du changement conceptuel (Posner et al., 1982), modèle qualifié de « classique » par Vosniadou (2008). La même année, Strike & Posner ont publié un second article dans lequel ils tentaient de préciser les conditions d'application de leur modèle didactique (Strike & Posner, 1982). Nous rendons compte dans ce qui suit de ces deux

articles phares de la didactique des sciences en nous attardant surtout à en extraire les enseignements utiles à la constitution de notre propre modèle d'intervention didactique.

2.2.2.1.1 Description du modèle (fondements théoriques)

Dans leur premier texte (Posner et al., 1982), les auteurs affirment s'inscrire dans le courant constructiviste de l'éducation, inspiré des travaux d'Ausubel (1968), où l'apprentissage est « *the result of the interaction between what the student is taught and his current ideas or concepts* » (Posner et al., 1982, p. 211). Selon eux, l'apprentissage est une activité hautement rationnelle qui consiste à comprendre et accepter des idées nouvelles sur la base de leur intelligibilité et de leur logique propre. Il ne s'agit pas de la simple accumulation et mémorisation de faits, mais plutôt d'une entreprise de transformation des connaissances (Strike & Posner, 1982, p. 231). L'apprentissage est ainsi vu comme une forme de quête où l'apprenant doit faire des choix en fonction des preuves qui sont à sa portée, mais aussi sur la base de ses propres conceptions. Bien que Posner et al. (1982) reconnaissent l'importance de l'affect et des émotions dans toute activité d'apprentissage, leur modèle tente d'expliquer l'apprentissage uniquement en tant qu'activité intellectuelle rationnelle, considérant les aspects affectifs comme facilitateurs, mais non centraux à l'acte d'apprendre.

S'inspirant des recherches qui constatent la présence de nombreuses conceptions chez les apprenants dans divers domaines de l'enseignement des sciences, et partant du principe que l'enseignement doit viser l'évolution de ces conceptions vers des modèles commensurables avec les paradigmes scientifiques (selon l'épistémologie kuhnienne), les auteurs ont cherché à développer une théorie décrivant comment les conceptions se modifient, changent et évoluent, en d'autres termes, comment les apprenants apprennent et modifient leurs conceptions, et ce, malgré que ces mêmes conceptions soient généralement très robustes et résistent à l'enseignement qui cherche à les mettre en contradiction (Posner et al., 1982).

Dans leur modèle, Posner et al. (1982) s'inspirent aussi des processus d'assimilation et d'accommodation décrits par Piaget, bien que leur utilisation des termes clés de la pensée piagétienne soit légèrement différente de celle du penseur suisse :

« Sometimes students use existing concepts to deal with new phenomena. This variant of the first phase of conceptual change we call assimilation. Often, however, the students' current concepts are inadequate to allow him to grasp some new phenomenon successfully. Then the student must replace or reorganize his central concepts. This more radical form of conceptual change we call accommodation. » (Posner et al., 1982, p. 212)

Dans Strike & Posner (1982, p. 234), les auteurs reprennent cette idée selon laquelle la distinction entre assimilation et accommodation témoigne davantage du degré de changement conceptuel visé que de la nature de ce changement. Ainsi, les changements à petite échelle s'apparentent à de l'assimilation, tandis que les changements à plus grande échelle (ou plus profonds) s'apparentent à de l'accommodation.

Posner et al. (1982) présentent ensuite les « *concepts* » (que nous traduirons par conceptions) des apprenants dans leur texte en disant qu'elles découlent des croyances et des présupposés épistémologiques (conscients ou non) des apprenants et leur servent de points de repère et de grille d'analyse lors de l'investigation de situations ou de concepts nouveaux :

« Whenever the learner encounters a new phenomenon, he must rely on his current concepts to organize his investigation. Without such concepts, it is impossible for the learner to ask a question about the phenomenon, to know what would count as an answer to the question, or to distinguish relevant from irrelevant features of the phenomenon. » (Posner et al., 1982, p. 212-213)

En d'autres termes, c'est avec ses conceptions que l'apprenant analyse et tente de donner un sens aux nouveautés qu'il rencontre. L'apprenant n'est pas une *tabula rasa* qui se présente en situation d'apprentissage la tête vide; au contraire, l'ensemble de ses conceptions et de ses idées, certaines très anciennes et bien implantées, forment une sorte

de réseau plus ou moins organisé de théories personnelles. Comme chez les scientifiques, ce réseau influencera quels concepts seront retenus, modifiés ou mis de côté. Lors de l'apprentissage, certaines de ces conceptions seront modifiées ou éliminées, tandis que d'autres, plus centrales, demeureront intactes, le critère ultime qui détermine quelles conceptions demeurent et lesquelles disparaissent ou évoluent étant leur utilité en situation d'apprentissage.

2.2.2.1.2 *Quatre conditions pour le franchissement des conceptions*

Pour Posner et al. (1982), le changement conceptuel résulte donc d'une réorganisation des conceptions ou du remplacement d'une conception centrale par une autre. Ces changements (assimilation et accommodation) se produisent graduellement et requièrent souvent plusieurs ajustements, avec maints faux départs et retours en arrière (p. 223). Dans leur modèle, Posner et al. (1982) postulent quatre conditions qui permettent le changement conceptuel (p. 214) :

1. Dans une situation donnée, une conception déjà présente doit être insatisfaisante. Il semble en effet peu probable qu'un apprenant modifiera en profondeur ses conceptions s'il croit que des ajustements mineurs feront l'affaire. Avant que ne se produise une accommodation plus ou moins radicale, il faut sans doute que l'apprenant ait accumulé un certain nombre de problèmes non résolus, constaté plusieurs anomalies entre ses conceptions et ses observations et expériences et ait perdu foi dans la capacité de ses propres conceptions à les résoudre et les corriger;
2. Une nouvelle conception doit être intelligible par l'apprenant, c'est-à-dire qu'elle doit lui permettre de saisir comment son expérience et ses théories personnelles peuvent être mieux structurés par ce nouveau concept et lui permettre d'explorer les possibilités nouvelles qu'il offre;
3. Une nouvelle conception doit être plausible, offrant la possibilité de résoudre les problèmes et les anomalies générés par les conceptions initiales de l'apprenant tout en n'entrant pas en contradiction avec ses autres savoirs;
4. Une nouvelle conception doit être féconde, suggérant, dans les mots de Lakatos (1970), la possibilité d'un nouveau programme de recherche fructueux, ouvrant de nouvelles possibilités et de nouveaux champs d'investigation.

Selon les auteurs, ces quatre conditions — insatisfaction, intelligibilité, plausibilité et fécondité — doivent être remplies pour que se produise un véritable changement conceptuel au niveau de l'apprenant. On retrouve ici les étapes proches de ce que proposent Nussbaum et Novick (1982).

Revenons plus en détails sur les quatre conditions posées par Posner et al. (1982) pour susciter un changement conceptuel chez l'apprenant. L'insatisfaction correspond à la prise de conscience par l'apprenant de ses propres conceptions à propos d'un phénomène donné et de la découverte d'anomalies entre ce qu'il pense, les prédictions qu'il fait en se basant sur ses croyances et ses présupposés épistémologiques, et le fruit de ses observations, expériences, lectures, démonstrations ou autres contacts avec le phénomène. Ce sont ces anomalies qui font naître le besoin de considérer d'autres éventualités :

« The more students consider the anomaly to be serious, the more dissatisfied they will be with current concepts, and the more likely they may be ready ultimately to accommodate new ones. » (Posner et al., 1982, p. 224)

Les auteurs insistent sur les anomalies constatées par l'apprenant (et non simplement révélées par le médiateur) comme une source majeure d'insatisfaction (Posner et al., 1982, p. 220). Selon eux, une anomalie survient lorsqu'un apprenant s'avère incapable d'assimiler dans le système de ses conceptions un élément qui semble à première vue assimilable — en d'autres termes, l'apprenant est incapable de donner du sens à ce nouvel élément. Mais un tel conflit cognitif seul ne mène pas automatiquement à un changement conceptuel : l'apprenant pourrait par exemple préférer rejeter le nouvel élément plutôt que le considérer valide, il pourrait ne pas se sentir interpellé par l'anomalie, compartimenter l'élément distracteur de telle sorte qu'il n'ait plus de rapport avec ses conceptions, ou encore tenter d'assimiler le nouveau concept en le greffant à ses conceptions premières pour en faire des conceptions intermédiaires ou hybrides, plutôt que d'en changer complètement (Posner et al., 1982, p. 221).

Posner et al. (1982) insistent donc fortement pour qu'en plus de choisir avec soin les anomalies qui seront soumises à l'apprenant pour les rendre saillantes, le médiateur l'outille adéquatement pour l'aider à voir ce que ces anomalies représentent comme défi pour son système explicatif personnel, pour que l'apprenant sente le besoin de réconcilier les anomalies avec ses conceptions, qu'il s'engage à éliminer les inconsistances entre ses croyances et les faits empiriques et qu'il soit convaincu que ses tentatives d'assimilation sont vouées à l'échec. En d'autres termes, il faut aider l'apprenant à développer une véritable épistémologie scientifique. Ce n'est qu'à ces conditions qu'une nouvelle conception intelligible, plausible et plus féconde proposée à l'apprenant aura des chances de déloger la conception initiale et résoudre l'anomalie :

« If the dissatisfaction with the existing conception created by its inability to make sense of experience is followed by learning of an intelligible alternative which resolves or promises to resolve some of the anomalies of its predecessor, then the new conception may be plausible. » (Posner et al., 1982, p. 221)

En effet, selon Posner et al. (1982), *« only an intelligible theory can be a candidate for a new conception in a conceptual change »* (p. 217). Par intelligible, on entend bien sûr que les mots soient compréhensibles par l'apprenant (niveau de langage et transposition didactique adéquats) mais aussi que le concept ait du sens pour lui en fonction de son âge, sa maturité intellectuelle, ses expériences passées, etc. Les auteurs ajoutent que cela doit aussi passer par la construction, par l'apprenant, d'une représentation mentale cohérente et sensée de la nouvelle théorie, qui peut alors devenir un véritable « objet pour penser » (Posner et al., 1982, p. 217). Cela se fera par une mise en contexte adéquate de la part du médiateur de la nouvelle conception, faisant apparaître les possibilités qu'elle offre, et à l'utilisation d'analogies et de métaphores pour en faciliter la compréhension.

La plausibilité du nouveau concept fait référence, quant à elle, à la façon dont il peut ou non s'insérer adéquatement à l'intérieur de l'écologie conceptuelle de l'apprenant. Ultimement, c'est sa propre écologie conceptuelle qui sert à l'apprenant de filtre pour juger des nouvelles idées. Les auteurs signalent au moins cinq façons par lesquelles une nouvelle

conception peut atteindre un certain niveau de plausibilité : elle est cohérente par rapport aux croyances de l'individu et ses présupposés épistémologiques; elle est cohérente par rapport à ses autres conceptions et connaissances; elle est cohérente vis-à-vis ses expériences passées; les images qu'elle crée ou suggère correspondent à la vision du monde de l'apprenant. Enfin, une conception plausible permettra de rectifier des anomalies perçues et résoudra des problèmes (les observations et les expériences qui contredisaient la conception initiale de l'apprenant) d'une manière que la conception d'origine ne permettait pas de faire (Posner et al., 1982, p. 218).

Les auteurs ajoutent que, de toutes ces caractéristiques, c'est la première, ayant trait à la cohérence vis-à-vis des présupposés épistémologiques de l'apprenant, qui semble jouer un rôle prépondérant. Cela suggère d'intervenir auprès des apprenants pour déterminer quels sont leurs présupposés épistémologiques :

« [...] it is important to find out just what epistemological commitments students have, if one wants to understand what they are likely to find initially plausible or implausible and more generally, to understand their process of conceptual change. » (Posner et al, 1982, p. 218)

La fécondité d'un concept, enfin, implique que ce nouveau concept permet d'expliquer des phénomènes nouveaux en plus de rendre compte de ce que l'apprenant sait déjà :

« If the new conception not only resolves its predecessor's anomalies but also leads to new insights and discoveries, then the new conception will appear fruitful and the accommodation of it will seem persuasive. » (Posner et al., 1982, p. 222)

Par exemple, en situation d'apprentissage, des activités de structuration qui permettent un réinvestissement des nouvelles conceptions dans des situations nouvelles et inédites pour l'apprenant montreront bien leur fécondité accrue (Thouin, 1997). Dans le cas des phases de la Lune, par exemple, on pourra faire valoir la fécondité de la conception

scientifique du mécanisme à la base du phénomène en montrant qu'il permet également d'expliquer les phases de Mercure et de Vénus, telles que vues de la Terre.

2.2.2.1.3 *Application en situations d'apprentissage*

Malgré l'apparente simplicité de leur modèle, Posner et al. (1982) nous mettent en garde contre une volonté d'appliquer la progression insatisfaction – intelligibilité – plausibilité – fécondité de manière trop littérale en situation d'enseignement. Bien que l'accommodation d'une nouvelle conception soit un changement plutôt radical, il n'est pas nécessairement abrupt et peut progresser de manière irrégulière, par bonds suivis de reculs plus ou moins prononcés, émaillés d'erreurs, de détours et d'errances. Certains aspects d'une conception peuvent évoluer plus vite que d'autres, menant à des conceptions intermédiaires (hybrides) qui prennent du temps à se fixer. Posner et al. (1982) décrivent ainsi le processus du point de vue de l'apprenant :

« For them, accommodation may be a process of taking an initial step forward a new conception by accepting some of its claims and then gradually modifying other ideas, as they more fully realize the meaning and implication of these new commitments. Accommodation, particularly for the novice, is best thought of as a gradual adjustment in one's conception, each new adjustments laying the groundwork for further adjustments but where the end result is a substantial reorganization or change in one's central concepts. » (Posner et al., 1982, p. 223)

Comment le modèle du changement conceptuel que nous venons de décrire peut-il être appliqué en situation d'apprentissage ? Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982) répondent d'abord en rappelant que, pour eux, enseigner les sciences revient à fournir aux apprenants des raisons rationnelles et logiques de changer leurs conceptions. Mais comme les auteurs le notent eux-mêmes, il n'existe pas de recette magique pour y parvenir. Plusieurs facteurs peuvent bien sûr créer un contexte favorable au changement conceptuel, en particulier les anomalies constatées par l'apprenant et, plus important encore, les croyances et présupposés épistémologiques avec lesquels il pose un jugement sur ces anomalies. Mais il n'est pas certain que ses croyances et présupposés épistémologiques

actuels permettent à l'apprenant de saisir la portée de l'anomalie... On risque ainsi de demeurer prisonniers d'un cycle sans issue.

Devant ce constat, les auteurs présentent quelques pistes pour favoriser le changement conceptuel chez les apprenants, insistant d'abord pour qu'un véritable travail de révélation des présupposés épistémologiques et des croyances de chaque apprenant, en amont, fasse partie de l'attirail de l'enseignant ou du médiateur. On doit également inculquer aux apprenants la volonté de développer une vision cohérente du monde, leur présenter les fondements historiques et épistémologiques de la science et les aider à apprécier le caractère fécond des concepts scientifiques. Les auteurs croient plus important de s'attarder aux difficultés d'assimilation et d'accommodation des apprenants, par rapport à un contenu scientifique donné, qu'à l'exposition du contenu lui-même. Les anomalies tirées de l'histoire des sciences peuvent aussi être utilement évoquées, ajoutent-ils, tout comme les analogies, métaphores ou modèles qui peuvent rendre un contenu plus intelligible et plausible pour l'apprenant.

Du côté des stratégies d'enseignement, quiconque vise l'évolution des conceptions des apprenants plutôt que la simple mémorisation de contenu aurait avantage à créer des exposés, démonstrations, problèmes et exercices (de laboratoire ou autres) qui sont susceptibles de créer chez l'apprenant un conflit cognitif (et un conflit sociocognitif au sein du groupe) en suscitant la prise de conscience d'anomalies. Une autre stratégie potentiellement fructueuse consiste à s'attarder aux erreurs des apprenants dans une perspective de découverte des conceptions naïves et autres « blocages conceptuels » qu'elles révèlent et qui sont un frein à l'évolution des conceptions. Des techniques d'évaluation (entretien d'explicitation) inspirées des travaux de Piaget et de Vermersch (2003; Vermersch & Maurel, 1997) permettent d'aller au cœur des conceptions des élèves et de mieux les cerner. La représentation des concepts scientifiques selon divers modes (visuel, concret, mathématique, verbal, etc.) et le passage fréquent de l'un à l'autre peuvent aussi aider les apprenants à se les approprier.

Quant au rôle du médiateur scientifique, Posner et al. (1982) suggèrent qu'il agisse comme un adversaire de l'apprenant (au sens socratique du terme), c'est à dire qu'il soit capable, par son dialogue, de confronter l'apprenant à ses propres conceptions, sans toutefois les dénigrer. Il doit aussi utiliser la pensée scientifique de manière exemplaire en étant exigeant en ce qui concerne la cohérence entre la théorie et les résultats empiriques.

De l'aveu même des auteurs, ces préceptes sont loin de constituer un programme d'enseignement complet et détaillé. Ils présentent plutôt ces pratiques comme un début de programme de recherche enraciné dans une vision de l'apprentissage épistémologiquement valable, où l'enseignement et l'apprentissage sont vus comme des reflets de notre compréhension de la nature des connaissances et de la façon dont les enfants apprennent les sciences (Strike & Posner, 1982, p. 240).

2.2.2.1.4 Quelques critiques concernant le modèle de changement conceptuel de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982)

En analysant le modèle du changement conceptuel proposé par Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), Johsua & Dupin (1999) soulèvent de nombreuses critiques de ce qu'ils qualifient de « vision naïve du modèle de changement conceptuel » dont, entre autres, l'impossibilité selon eux de produire de tels changements au cours de conflits brefs⁹, la difficulté d'atteindre des stades où les dits conflits peuvent être significatifs aux yeux des élèves, le caractère fragile de ces changements (s'ils se produisent) et, de manière plus générale, la difficulté de faire reconstruire par les élèves mis dans de telles situations l'entièreté du savoir scientifique visé. Plus loin, les auteurs ajoutent qu'une simple « mise en rapport d'un élève avec une expérience contradictoire à son attente, ou/et de la mise en

⁹ C'est le cas dans le contexte d'une visite au musée, comme le soulignent Allard & Boucher (1991) et Allard, Boucher & Forest (1993), qui notent eux aussi la brièveté d'une visite scolaire au musée qui laisse peu de temps pour provoquer un changement conceptuel profond et durable.

discussion sociale de cette contradiction, [ne permet pas] automatiquement une évolution positive de ces conceptions » (Johsua & Dupin, 1999, p. 334).

Vosniadou et al. (2008) nous rappellent qu'on a reproché au modèle du changement conceptuel de Posner et al. (1982) de traiter les conceptions des apprenants de façon étroite et négative en se concentrant sur les erreurs qu'elles représentent, alors que les idées des apprenants, même naïves, peuvent et doivent servir de base pour le développement d'une pensée scientifique ou mathématique plus sophistiquée (Smith, diSessa & Roschelle, 1993).

Les conceptions devraient, selon Vosniadou et al. (2008), être considérées comme des extensions ou des extrapolations fautives de connaissances productives plutôt que comme des savoirs fautifs qui doivent être remplacés par d'autres par le biais de l'enseignement. Selon ces critiques, l'apprentissage devrait être conçu dans la continuité, les connaissances de base servant d'éléments dans la construction de structures de connaissance plus complexes. En d'autres termes, le modèle du changement conceptuel de Posner et al. (1982) demeure, pour ses détracteurs, trop superficiel, antagoniste et insuffisamment flexible pour rendre véritablement compte de la complexité du processus en jeu, qui semble impliquer davantage des structures sous-jacentes aux conceptions. Ce sont ces structures, auxquelles Vosniadou (1994) et diSessa (1993) attribuent des noms et des caractéristiques différentes, qui doivent être selon Vosniadou et al. (2008) le véritable foyer de l'attention des didacticiens des sciences.

2.2.2.2 Les « modèles mentaux » de Vosniadou (1994)

Stella Vosniadou s'est beaucoup intéressée aux changements conceptuels chez les élèves du primaire en astronomie, en particulier en ce qui concerne la forme de la Terre et sa position dans l'espace (Vosniadou & Brewer, 1992; Vosniadou, 1992). L'auteure a développé sa vision théorique du changement conceptuel dans de nombreux articles parus depuis le début des années 1990. Plus récemment, en 2008, elle dirigeait la publication d'un ouvrage de référence sur le sujet dans lequel elle reprend ses principaux arguments

(Vosniadou, Vamvakoussi & Skopeleti, 2008, chapitre 1). Nous avons retenu pour la présente recension un article publié en 1994 et le premier chapitre de l'ouvrage publié en 2008, qui présentent en détail sa théorie. Contrairement à diSessa (1993), qui attribue ce que nous appelons les conceptions initiales à des pièces de savoirs éparses, non organisées (voir section 2.2.2.3), Vosniadou y voit plutôt l'expression de théories naïves plus ou moins organisées et cohérentes, comme nous le développerons dans les paragraphes suivants.

2.2.2.2.1 *Description du modèle (fondements théoriques)*

La vision de Vosniadou des changements conceptuels s'appuie sur l'idée que notre interaction directe, quotidienne, avec le monde physique, à travers nos sens, impose un certain nombre de contraintes au développement de notre système explicatif du monde :

« [...] the human mind operates on the basis of a small number of domain-specific constraints, reflecting the structure of the specific adaptive problems humans needed to solve over a long period of time in the course of evolution. » (Vosniadou, 1994, p. 47)

En d'autres termes, les humains ont dû apprendre à composer avec un environnement physique qui leur imposait un certain nombre de contraintes et découvrir rapidement des solutions qui fonctionnent pour résoudre des problèmes du monde réel, solutions relayées ensuite par la culture et renforcées par l'interaction quotidienne des individus avec l'univers physique. Pour Vosniadou, ces explications initiales du monde physique ne constituent pas des observations fragmentées, mais forment plutôt un système explicatif cohérent (Vosniadou et al., 2008).

Les contraintes imposées par l'univers physique donnent naissance, selon Vosniadou et al. (2008), à des présupposés bien arrêtés et enracinés dans l'esprit de chacun, présupposés organisés au sein d'une théorie cadre de physique naïve (« *naive framework theory of physics* »). Cette théorie cadre est hautement personnelle, le plus souvent inconsciente et généralement invérifiable, au sens où l'on conçoit généralement la vérifiabilité des hypothèses scientifiques. La théorie cadre de physique naïve se construit

très tôt dans l'enfance, de manière graduelle, et découle de la façon dont un individu interprète ses interactions avec les objets matériels, ses observations du monde, les messages véhiculés par sa propre culture et les nouvelles informations qu'il reçoit à propos de l'univers physique à travers ses sens. Il s'agit, en d'autres termes, de l'épistémologie personnelle, ontologique, de l'individu. L'auteure prétend que cette théorie cadre agit comme un filtre pour l'apprenant, contraignant le processus d'apprentissage de manière analogue au programme de recherche de Lakatos (1970) ou au paradigme dominant de Kuhn (1962) qui influencent et orientent la direction de la recherche scientifique. Comme le patron d'un casse-tête, la théorie cadre détermine quelles pièces nouvelles de savoir peuvent s'emboîter les unes dans les autres et lesquelles sont mises de côté.

Contrainte par notre perception et nos interactions avec l'univers physique, notre théorie cadre de physique naïve impose à son tour des contraintes au développement des théories spécifiques, que Vosniadou définit de la manière suivante :

« A specific theory consists of a set of interrelated propositions or beliefs that describe the properties or behavior of physical objects. Specific theories are generated through observation or through information presented by the culture under the constraints of the framework theory. » (Vosniadou, 1994, p. 47-48).

Contrairement à la théorie cadre, de portée très générale, les théories spécifiques sont d'application plus restreinte. Elles rendent compte de la structure interne d'un domaine conceptuel circonscrit et sont donc liées de près aux phénomènes observés dans ce domaine précis. Elles sont aussi composées d'un ensemble de propositions et de croyances à propos des propriétés et du fonctionnement d'objets particuliers. Mais contrairement à la théorie cadre, mieux ancrée et plus stable, les théories spécifiques sont continuellement enrichies et modifiées par l'expérience et l'observation. Ainsi, au fur et à mesure qu'il interprète ses observations et obtient des informations nouvelles, l'individu construit ou modifie des théories spécifiques à propos de nouveaux phénomènes du monde qu'il découvre autour de lui (Vosniadou, 1994, p. 46).

Les croyances qui constituent une théorie spécifique peuvent ainsi être considérées comme des contraintes de second ordre (après celles de la théorie cadre) qui émergent de la structure de tout nouveau savoir et s'imposent comme un autre filtre agissant sur le processus d'acquisition de connaissances nouvelles. De tels filtres agissent aussi sur les catégories mentales dans lesquels les objets physiques sont classés. De tels classements constituent de puissants mécanismes d'apprentissage : en classant de façon plus ou moins consciente un objet dans une catégorie donnée en fonction de certains présupposés (souvent inconscients), l'apprenant infère plusieurs de ses caractéristiques fondamentales (Chi, 2008). Cela peut nuire à l'apprentissage si la catégorie où est classé l'objet est inappropriée (Vosniadou et al., 2008). Par exemple, la Terre en tant qu'objet physique donne naissance à des conceptions fort différentes de celles qui apparaissent lorsque l'apprenant modifie le classement de notre planète pour en faire un objet astronomique (Vosniadou et al., 2008).

La théorie cadre et les théories spécifiques décrites par Vosniadou forment une structure mentale le plus souvent inconsciente. Il existe pourtant une part émergée de cet iceberg, les « *mental models* », terme par lequel Vosniadou décrit les représentations mentales dynamiques (les modèles mentaux, que nous associerons aux conceptions) qui peuvent être manipulées mentalement pour fournir des explications causales de phénomènes physiques observés et faire des prédictions à propos du fonctionnement du monde autour de nous (Vosniadou, 1994, p. 48). Ces représentations mentales (ou modèles mentaux) sont sous-tendus par les théories cadre et spécifiques, qui en contraignent l'apparition et l'évolution.

Selon Vosniadou et al. (2008), les modèles mentaux seraient donc des théories explicatives personnelles que les apprenants invoqueraient et utiliseraient à tour de rôle (mais pas nécessairement dans un ordre donné) au cours de leur évolution conceptuelle pour un domaine donné, entre leur théorie naïve initiale et le modèle accepté par la communauté scientifique. Elle donne l'exemple de la forme de la Terre et de sa position dans l'espace pour illustrer son propos. Pour un enfant en situation d'apprentissage, on voit

souvent une évolution conceptuelle qui passe par les mêmes stades (Terre plate, Terre ronde mais creuse, Terre ronde mais aplatie au sommet, etc.), l'enfant exprimant tour à tour des conceptions déjà documentées chez d'autres enfants. De plus, à travers les cultures, on constate que les mêmes modèles mentaux de la Terre et de l'espace se retrouvent presque intégralement chez des enfants du même âge (voir à cet effet Nussbaum & Novak, 1976; Mali & Howe, 1979; Nussbaum, 1979; Klein, 1982; Nussbaum & Sharoni-Dagan, 1983; Sneider & Pulos, 1983; Samarapungavan, Vosniadou & Brewer, 1996; Sneider & Ohadi, 1998; Blown & Bryce, 2006; Bryce & Blown, 2006; voir également Liu (2005) pour une comparaison d'élèves allemands et taïwanais). On doit certainement voir dans ces ressemblances la signature de l'épistémologie et l'ontologie initiale de chaque enfant, influencées par l'observation directe des mêmes phénomènes naturels (horizon local « plat », rotation de la Terre indécélable, etc.). Les auteures reconnaissent toutefois la possibilité qu'un modèle mental soit également conçu spontanément par l'élève en situation d'apprentissage (*on the spot*), pour répondre aux besoins spécifiques d'un problème à résoudre.

Vosniadou (1994) détaille les divers modèles mentaux ou conceptions qu'elle considère dans son approche. Il y a d'abord les modèles initiaux, qui se forment spontanément lors de la première exposition du jeune enfant à un phénomène donné. Lors de son exposition au modèle scientifique, en situation d'apprentissage, ce modèle initial se modifiera et évoluera vers un modèle hybride, synthétique selon la nomenclature de l'auteure, modèle qui comblera des éléments du modèle initial avec d'autres provenant du modèle scientifique. L'auteure soupçonne également que la confrontation entre modèles initiaux, synthétiques et scientifiques fera naître chez les apprenants d'autres modèles mentaux ou conceptions sous la forme d'inconsistances (des faits nouveaux plaqués sur les théories initiales) et des connaissances inertes, qui sont des savoirs nouveaux, incompatibles avec la théorie initiale de l'apprenant, mais qui seront par exemple invoqués en situation scolaire, un phénomène qui s'apparente à certains aspects du contrat didactique (Brousseau, 1986).

2.2.2.2.2 *Enrichissement vs révision : le changement conceptuel selon Vosniadou*

À partir des constructions théoriques que nous venons de décrire, Vosniadou développe sa vision du changement conceptuel. Elle note au départ que, puisque les présupposés épistémologiques et les catégories ontologiques de la théorie cadre de physique naïve sont ancrés dans l'expérience physique et la culture de l'apprenant et sont stables depuis longtemps, un changement conceptuel à ce niveau est particulièrement difficile, surtout si certaines présuppositions fondamentales doivent être révisées et que l'appartenance de certains concepts à des catégories ontologiques doit être modifiée (Vosniadou et al., 2008). Dans ce contexte, Vosniadou décrit d'ailleurs le changement conceptuel d'une théorie cadre (ou spécifique) comme une révision plus radicale, qu'elle oppose aux simples apprentissages où il y a uniquement un enrichissement des connaissances sans changement profond de l'épistémologie de l'individu. Vosniadou définit ainsi ce qu'elle entend par enrichissement et révision :

« Enrichment involves the addition of information to existing conceptual structures. Revision may involve changes in individual beliefs or presuppositions or changes in the relational structure of a theory. Revision may happen at the level of the specific theory or at the level of the framework theory. » (Vosniadou, 1994, p. 46)

Cette distinction entre les deux processus d'apprentissage, enrichissement versus révision, s'apparente à celle proposée par Posner et al. (1982) entre assimilation et accommodation. On retrouve encore ici un écho des idées de Piaget sur le couple assimilation et accommodation.

Selon Vosniadou, tant l'enrichissement que la révision de théories cadre ou spécifiques sont des processus qui se déroulent graduellement, sur le long terme. Comme on s'en doute, l'enrichissement est plus facile que la révision, surtout lorsque la révision implique des présuppositions épistémologiques et des croyances qui représentent des systèmes d'explication relativement cohérents et historiquement fructueux pour l'apprenant (Vosniadou, 1994, p. 68).

À partir de ces bases et présupposés théoriques, Vosniadou aborde la difficile question de décrire le processus du changement conceptuel : « [...] *the process of conceptual change appears to proceed through a gradual revision of the presuppositions and beliefs of the specific and framework theories.* » (Vosniadou, 1994, p. 63) Le changement conceptuel serait donc une série graduelle de révisions plus ou moins radicales des théories cadres et spécifiques de chaque apprenant, révisions qui se manifesteraient dans leurs parties « visibles » par l'apparition et l'évolution de diverses conceptions (modèles mentaux, inconsistances et connaissances inertes) au cours de l'apprentissage, jusqu'au modèle accepté par la communauté scientifique.

2.2.2.2.3 *Application en situations d'apprentissage*

Comment l'enseignement (formel ou informel) peut-il favoriser l'évolution des conceptions vers le modèle scientifique ? Vosniadou, qui a beaucoup réfléchi à cette question, offre comme point de départ la prise en compte des théories cadre et spécifiques présentes chez chaque individu qui se présente en situation d'apprentissage :

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

Ce ne sont donc pas les conceptions, manifestations changeantes et superficielles des théories personnelles d'un individu, qui doivent être au cœur de l'enseignement, mais plutôt les théories naïves qui les sous-tendent et qui sont, elles, beaucoup plus résistantes au changement. Vosniadou donne l'exemple suivant en appui à sa thèse :

« For example, telling a child who believes that people live on flat ground inside a hollow sphere, that the Earth is not hollow, will not solve this child's problem with the notion of the spherical Earth. Children believe that the Earth is a hollow sphere because they cannot reconcile their perception of a flat Earth with the idea of roundness and with their presupposition that gravity operates in an up/down fashion. What children need in order to get

rid of this misconception is a lesson on gravity and a lesson on how round things can sometimes appear to be flat. Otherwise, one misconception will be followed by another, and the students will remain confused. » (Vosniadou, 1994, p. 67)

Ce travail plus en profondeur implique, selon elle, l'exposition de l'apprenant à des concepts jugés plus difficiles, surtout pour des enfants plus jeunes, comme le concept de gravité dans l'exemple cité précédemment. Cela a bien sûr un effet important sur le programme de formation qui sera appliqué dans les lieux d'enseignement formels et informels (Vosniadou, 1991). Il importe en effet d'exposer l'apprenant à tous les concepts qui peuvent, en première analyse, faire obstacle à l'évolution des théories naïves vers le modèle scientifique. Cela implique, pour le formateur, de non seulement identifier les conceptions présentes chez les apprenants, mais aussi d'en faire une analyse fine pour détecter les théories personnelles qui s'expriment « sous le masque » des conceptions.

Comme Posner et al. (1982), Vosniadou insiste sur le rôle crucial que joue l'apprenant dans ses propres apprentissages et donne quelques pistes pour l'aider à réaliser ses apprentissages, en particulier en s'assurant que l'apprenant sait qu'il porte en lui des théories personnelles et en l'amenant à les confronter aux faits et aux théories des autres autour de lui :

« Provide children with situations in which they can engage in the active “doing” of science [by presenting] them with problem solving situations that require observation and experimentation and the testing of hypotheses. Encourage children to provide verbal explanations of phenomena, to share these explanations with other students, to defend them against criticism, and to compare them to the explanations of experts. Take students' mental models seriously and create environments that allow students to express their representations of situations, to manipulate them, to test them, and to have the experience of revising them successfully. » (Vosniadou, 1994, p. 67-68)

Vosniadou insiste sur l'importance du groupe et du dialogue entre les pairs et avec le formateur pour servir de « résonateur » ou d'écho aux théories et conceptions de chaque apprenant. L'auteure juge également essentiel d'amener les apprenants à se méfier de leur

propre épistémologie et ontologie (souvent inconscientes) et à considérer leurs théories personnelles comme de véritables théories scientifiques, sujettes à falsification. Selon l'auteure, cette forme de métacognition serait bénéfique en offrant une plus grande flexibilité mentale, propice au changement conceptuel. Enfin, selon Vosniadou, il faut du temps pour que les théories personnelles se modifient et évoluent vers les théories scientifiques, et il faut laisser l'apprenant aller à son rythme à travers les diverses conceptions (modèles synthétiques) qu'il invoquera au cours de son cheminement.

En ce qui concerne le conflit cognitif tel que décrit par Posner et al. (1982), Vosniadou (1994) ne croit pas qu'il soit suffisant pour provoquer un changement conceptuel, à moins qu'il ne se déroule sur une longue période et s'attaque non seulement aux conceptions elles-mêmes, mais surtout aux théories naïves qui les sous-tendent (Vosniadou et al., 2008). Vosniadou insiste en effet sur la nécessité d'approfondir le travail de révision pour qu'il aille au-delà des manifestations superficielles que sont les conceptions et « descende » jusqu'au niveau de la théorie cadre et des théories spécifiques qui les sous-tendent. Ce n'est qu'à ce prix, selon elle, que les apprenants pourront véritablement faire évoluer leurs conceptions, particulièrement en physique.

2.2.2.3 Le « savoir-en-pièces » de diSessa (1993)

Contrairement à d'autres théoriciens de l'éducation, comme McCloskey (1983) ou Vosniadou (1994), qui défendent l'idée que l'on retrouve chez l'apprenant des théories personnelles naïves, mais cohérentes, diSessa remet en question le changement conceptuel conçu comme le remplacement ou l'évolution d'une théorie naïve, ou conception, par ou vers une théorie acceptée par la communauté savante. Selon lui, les apprenants novices sont loin de démontrer un niveau de sophistication suffisant pour soutenir un ensemble organisé de connaissances systématiques qui ne serait qu'une version maladroite ou primitive des théories scientifiques acceptées par les experts. À ces modèles, qui s'appuient sur l'hypothétique cohérence de la pensée des apprenants dans le cadre de théories naïves,

diSessa oppose l'idée du « *knowledge in pieces* », les connaissances ou savoirs-en-pièces, qu'il a développé dans un chapitre paru en 1988 (diSessa, 1988) et ultérieurement dans un article-phare paru en 1993 (diSessa, 1993). Nous nous appuyerons plus particulièrement sur ce dernier texte pour explorer la pensée de diSessa à propos du changement conceptuel.

Rappelons enfin que diSessa a été fortement influencé dans sa réflexion par la recherche informatique sur l'intelligence artificielle et ses algorithmes, et que sa théorie se veut « *a computational theory of common sense and intuitive knowledge and its evolution into scientific understanding* » (diSessa 1993, p. 174). Bien que son modèle ait été développé dans le contexte restreint de l'enseignement de la physique et qu'il s'avère très pointu, ayant trouvé jusqu'à présent relativement peu d'applications en dehors de ce domaine précis (Vosniadou et al., 2008), nous le considérons tout de même comme une importante source d'inspiration et croyons même que certaines idées qu'il développe peuvent être utilisées avec succès dans le cadre de l'enseignement de l'astronomie, du moins pour comprendre l'origine de certaines conceptions fréquentes.

2.2.2.3.1 Description du modèle (fondements théoriques)

Dans sa théorie, diSessa propose deux idées centrales pour expliquer l'évolution conceptuelle de l'apprenant lui permettant de passer de l'observation des événements communs se déroulant autour de lui jusqu'à la formulation des lois physiques qui sont supposées expliquer ces événements. La première idée est que le sens physique intuitif et naïf du novice n'a ni la profondeur ni la systémativité de celui de l'expert; il est au contraire plus épars et moins général dans son application. Pour l'expert, les phénomènes doivent en effet pouvoir se réduire à un nombre relativement restreint de causes premières (les lois et théories physiques), ce qui n'est pas du tout à la portée du novice. Deuxièmement, l'apprentissage de la physique, dans l'optique de diSessa, se conçoit comme le passage graduel d'une phénoménologie naïve (« *intuitive physics* ») à la science plus fondamentale par la réorganisation et la priorisation des connaissances intuitives de l'apprenant. En

d'autres termes, diSessa ne propose pas de remplacer des conceptions erronées ou naïves par d'autres qui seraient plus proches des idées savantes; au contraire, il croit que l'expert utilise les mêmes outils de base que le novice (« *reused intuitive knowledge* », diSessa 1993, p. 191), mais à l'intérieur d'une structure de pensée plus systématique et cohérente que le novice n'a pas encore développée.

Dans l'hypothèse défendue par diSessa, les connaissances de l'apprenant ne sont donc pas organisées comme le sont celles de l'expert à l'intérieur d'une structure sophistiquée que l'on nomme théorie, mais consistent plutôt en un nombre relativement élevé de fragments d'idées ou structures de connaissance qu'il a baptisés *phenomenological primitives*, ou p-prims, que nous traduirons par phénoménologies primitives. diSessa présente ces p-prims comme des abstractions plutôt simples, basées sur l'observation et l'expérience quotidienne de phénomènes naturels. Elles ont à peu près le niveau de complexité des mots par rapport au langage, mais des mots monosémiques. Elles sont primitives dans le sens qu'elles n'exigent pas d'explication préalable en amont; elles sont ce qu'elles sont, tout simplement. diSessa considère les p-prims comme des entités élémentaires hautement personnelles, des atomes de connaissances ou de savoirs, dont le rôle principal consiste à rendre compte du fonctionnement ou du comportement d'un système physique, une forme de vocabulaire ou de schématisation primaire qui nous aide à voir et comprendre le monde : « *Fundamentally, it is an individual's extended experience with the physical world that determines what particular p-prims exist.* » (diSessa 1993, p. 119)

Les p-prims constituent donc l'interface entre l'expérience directe du monde physique à travers les sens d'un individu et la formalisation de la physique en tant que science descriptive. Elles sont à la base du développement de ce que diSessa nomme le « *Physical sense of mechanism* » (diSessa, 1993), que nous traduisons librement par sens du mécanisme. Le sens du mécanisme de diSessa permet d'expliquer comment les choses fonctionnent et quels sortes d'événements sont possibles ou impossibles dans l'univers

physique. Le sens du mécanisme est la somme des connaissances qui nous permettent d'évaluer la plausibilité d'une vaste classe d'événements physiques, de faire des prédictions à propos du résultat de certaines actions ou d'expliquer *a posteriori* ce qui s'est passé, et de fournir des explications et des descriptions causales pour ces événements. Le sens du mécanisme de diSessa est également à l'œuvre lorsque nous tentons d'établir une chaîne causale pour déterminer qu'est-ce qui a provoqué quoi, pourquoi et comment.

Dans le modèle de diSessa, les relations entre les p-prims sont décrites qualitativement par ce qu'il appelle les priorités d'activation et de rétroaction. La priorité d'activation décrit la façon dont une p-prim est activée par la mobilisation préalable d'une ou plusieurs autres p-prims, tandis que la priorité de rétroaction explique comment l'activation d'une p-prim affectera plus ou moins directement son état dans le futur à travers une boucle de rétroaction qui pourra activer un plus ou moins grand nombre d'autres p-prims.

Même si ces relations n'organisent pas la collection complète des atomes de savoir (les p-prims) dans le sens d'une théorie physique experte, l'auteur relève tout de même certaines systémativités dans les relations entre p-prims. Ces systémativités peuvent provenir de l'usage mutuel courant d'un sous-ensemble de p-prims, d'attributs communs qu'elles partagent ou d'un vocabulaire commun qui les décrit, de leur plausibilité mutuelle à travers des syllogismes phénoménologiques, ou du niveau de complétude et d'abstraction qu'elles atteignent pour décrire un sous-ensemble de phénomènes. Dans tous les cas, cependant, ces relations demeurent variables et fonction du contexte spécifique où les p-prims sont activées (en ce qui concerne les novices, bien sûr).

2.2.2.3.2 *Le passage du sens physique naïf à expert selon diSessa*

En terme d'apprentissage de la physique, le passage du sens physique naïf à expert se déroule, selon diSessa, de la manière suivante. Au départ, un individu en contact avec le monde physique autour de lui construit une vaste collection relativement peu structurée de p-prims. Ce manque de structure se traduit par des priorités d'activation et de rétroaction

qui n'agissent que sur des structures locales, en d'autres termes, des p-prims qui sont déjà proches les uns des autres. Ces priorités changent également avec le contexte étudié et avec le temps, d'où un manque de systématique et de cohérence dans la capacité d'explication et de prévision du modèle physique naïf de l'apprenant.

Mais en situation d'apprentissage de la physique, au fur et à mesure que l'apprenant développe un sens physique davantage structuré, les priorités d'activation et de rétroaction agissent de manière plus globale, la priorité de certaines p-prims devenant prépondérante par rapport à d'autres dont l'importance décroît. Il se peut également que de nouvelles p-prims inédites pour l'apprenant s'ajoutent à sa collection lorsque son attention se tourne vers de nouveaux phénomènes du monde physique. Le statut même des p-prims se trouve bouleversé par le développement graduel d'un sens physique expert. Les p-prims ne peuvent en effet plus être considérées comme fondamentales et auto-explicatrices; au contraire, elles doivent désormais se soumettre à des structures mentales plus complexes composées de lois et de théories physiques. Les p-prims demeurent alors actives, mais seulement en tant que base d'activation heuristique de structures de connaissances plus formelles.

« The fundamental change in structure is that, instead of a very broad and shallow explanatory system, whatever p-prims are still used must defer to or become part of the complex but few subsystems that are encoding the physical laws themselves. Instead of a slew of p-prims, only physical laws are explanatorily primitive at the highest levels of reliability. » (diSessa 1993, p. 143)

Cette vision du changement conceptuel, non plus comme le remplacement de théories naïves, mais plutôt comme le réarrangement de connaissances à la pièce, permet selon diSessa une analyse plus fine des motivations intrinsèques et personnelles de l'apprenant qui sont à la base des conceptions, perçues ici comme des manifestations macroscopiques des éléments microscopiques que sont les p-prims et de leurs interactions :

« [...] contrary to the misconceptions point of view of widely held systematic difficulties, the present view allows us to understand individual, although sometimes personally pervasive, constructions as attempts to universalize combinations of common primitives into a more systematic sense of mechanism. » (diSessa, 1993, p. 138)

2.2.2.3.3 Application en situations d'apprentissage

diSessa s'interroge bien sûr sur les implications pédagogiques de sa théorie. Selon lui, la prise en compte des p-prims et du sens du mécanisme naïf de l'apprenant offre une nouvelle cible aux éducateurs, au-delà de l'enseignement de concepts théoriques ou du développement de compétences pour la résolution de problèmes. Les p-prims sont, selon lui, les véritables structures auxquelles il faut s'attarder, et non pas les conceptions, qu'il perçoit comme des manifestations superficielles des p-prims sous-jacentes. Le fait que l'apprenant développe un sens physique expert en utilisant les mêmes structures de base que celles qui sous-tendent son sens physique naïf évite également d'ostraciser le porteur de conceptions naïves, comme c'est trop souvent le cas dans l'enseignement, déplore-t-il. Les difficultés d'apprentissages se situant plutôt au niveau de l'organisation des p-prims, leur remédiation revient à réorganiser un système d'éléments déjà présents, et non de les abandonner au profit d'autres éléments ou concepts. Il s'agit toutefois d'un travail hautement individuel, le sens du mécanisme de chaque individu étant enraciné dans ses propres expériences sensorielles, donc très personnelles.

Au niveau de l'instruction et du développement de modèles d'interventions didactiques, le modèle de diSessa nous invite à considérer le sens physique naïf des apprenants comme le savoir essentiel à activer en situation d'apprentissage. Cela peut se faire, selon l'auteur, par des discussions, démonstrations, expériences ou observations ciblées d'événements quotidiens, ceux-là même qui sont à l'origine du développement des p-prims et de leur organisation au sein du système explicatif naïf de l'apprenant :

« Thinking about everyday phenomena is not just making an analogy or providing helpful scaffolding; it is invoking the very resources out of which expertise is built, and it is also exercising a component of developing

knowledge not engaged in more schematic problems. » (diSessa 1993, p. 207)

Enfin, la microstructure des p-prims peut nous aider à décrire en détail les ressources conceptuelles déjà à la portée des apprenants et identifier les sources de problèmes potentiels. Cela implique, en fin de compte, d'invoquer les p-prims dans l'enseignement pour favoriser leur réorganisation à l'intérieur d'un système qui, ultimement, deviendra le sens physique de l'expert. Cela jette aussi un éclairage nouveau sur les conceptions, qui seraient simplement la conséquence perceptible de l'utilisation de p-prims en dehors de leur contexte approprié : « *Indeed, it seems empirically true that many misconceptions come simply from using an element outside its range of legitimate applicability.* » (diSessa, 1993, p. 116)

Appliquant les idées de diSessa au domaine de l'astronomie, on pourrait par exemple postuler l'existence d'une p-prim décrivant le fait de percevoir visuellement le mouvement d'un objet, mais ne pas se sentir en mouvement soi-même, ce qui amène à postuler que c'est l'autre objet qui bouge (comme dans le métro lorsque l'autre rame se met en branle et qu'on a brièvement l'impression de bouger nous-mêmes). Une telle p-prim (basée sur une perception naïve de l'inertie) pourrait être à l'origine de nombreuses conceptions en astronomie, du géocentrisme au mouvement diurne :

« Certainly we have better access to sensing variations in mass through kinesthetics. We have even better access to patterns that are spatially describable, such as "more motion", because of our highly developed visual capabilities. This would lead to an increased priority for spatially describable p-prims, even if the motion involved is too small to be directly perceived. » (diSessa 1993, p. 150)

Autre exemple, en parlant du phénomène des marées et de la difficulté que représente ce concept pour des novices (voir Viiri, 1999; 2000; Viiri & Saari, 2000), diSessa fait remarquer que le mouvement de la Terre en chute libre vers la Lune, nécessaire pour expliquer le renflement océanique du côté de la planète opposé à son satellite, ne peut

tout simplement pas exister pour quiconque utilise encore un sens naïf de la physique où la fixité de la Terre joue un rôle central. Dans les termes de l'auteur, « *“Very big things just do not move,” might be a verbal expression of this heuristically useful phenomenological assumption.* » (diSessa 1993, p. 163) Peut-être doit-on voir dans une telle p-prim une base de la vision géocentrique des mouvements diurnes et annuels du ciel, où tout se déplace, sauf l'observateur lui-même confiné à la surface de la Terre immobile. Il y a certainement ici matière à scénariser des interventions didactiques pour réorganiser ces savoirs naïfs (Plummer, Wasko & Slagle, 2011).

2.2.2.3.4 *Le débat diSessa vs Vosniadou*

Les modèles du changement conceptuel proposés par diSessa et Vosniadou sont à ce point différents que nous jugeons important de rappeler ici leurs divergences et d'analyser une possible réconciliation entre les deux. Rappelons que, pour Vosniadou (1994; Vosniadou et al., 2008), les apprenants se présentent en situation d'apprentissage avec des théories personnelles relativement organisées et cohérentes. Pour diSessa (1993; 2008), au contraire, les novices ne présentent pas la cohérence dans l'usage de théories scientifiques que l'on reconnaît à l'expert; selon lui, les apprenants possèdent une vaste collection d'atomes de savoirs (*knowledge in pieces*) dont l'organisation varie d'une situation à l'autre. Alors que Vosniadou propose la prise en compte des théories cadres et spécifiques de chaque individu pour « corriger » les théories naïves fautives, diSessa est plutôt d'avis que le processus d'apprentissage consiste à réorganiser les atomes de savoirs en un tout cohérent mis au service du sens physique de l'expert.

Vosniadou propose tout de même d'intégrer les p-prim de diSessa dans son approche de cohérence en leur donnant le rôle de croyances basées sur l'observation directe de phénomènes physiques (*observation-based beliefs*, Vosniadou et al. 2008, p. 23). Sa propre vision du système conceptuel de l'apprenant, constitué de divers éléments de connaissance, comme les croyances, les présupposés et les modèles mentaux, s'accorde bien, selon elle, à la prescription de diSessa selon laquelle l'apprentissage des sciences

devrait se préoccuper non pas des conceptions elles-mêmes, mais plutôt du riche système de connaissances qui les sous-tend et qui est lui-même constitué de multiples éléments (Vosniadou et al., 2008). Vosniadou continue tout de même à soutenir que les p-prim s'organisent au sein de structure relativement cohérentes (théories naïves et modèles mentaux) beaucoup plus tôt que ne le croit diSessa. Dans ce cas, l'apprentissage doit aller au-delà de la simple réaffectation des p-prim pour s'attaquer également à leur organisation hâtive en théories et modèles mentaux primitifs, un processus lent et graduel dû précisément au très grand nombre d'éléments à traiter.

C'est cette idée même de cohérence que diSessa remet en question, notant au passage à quel point le terme est mal défini par les tenants de cette approche (diSessa, 2008). S'il y a cohérence, écrit-il, cela implique qu'il doit exister un certain nombre de relations entre les éléments qui composent et structurent la théorie, relations qui sont rarement, sinon jamais définies par les tenants de la pensée cohérente des apprenants. diSessa se demande avec raison comment juger de la cohérence d'une structure si on ne sait rien de son articulation interne, de la façon dont ses divers éléments sont reliés entre eux, ni du contexte dans lequel s'expriment ces éléments. Sa prétention est que si les théories naïves et intuitives des apprenants existent bel et bien, elles nous apparaissent sous une forme fortement agrégée et constituent peut-être des entités trop importantes (trop grossières) pour permettre de retracer le fin détail des changements conceptuels, qui se jouent au niveau sous-jacent des atomes de savoirs (diSessa 2008, p. 38). Le débat ne porterait plus, selon lui, sur la cohérence prônée par Vosniadou et d'autres versus sa propre théorie du savoir-en-pièces, mais plutôt sur la taille des grains de savoirs qui permettrait de décrire le changement conceptuel en sciences :

« At what grain size and level of detail must we describe intuitive ideas so as to have characterized them adequately enough to understand conceptual change? » (diSessa, 2008, p. 37)

Cette question, et le débat qui la sous-tend, restent ouverts. Selon nous, le facteur temps, le temps qu'un éducateur ou un médiateur peut raisonnablement accorder à la recherche fine sur les théories personnelles naïves ou les p-primis dans le cadre d'une activité éducative menée à l'école ou au musée, joue aussi un rôle important et limitera certainement le niveau de détail qui sera atteint dans la description des structures sous-jacentes aux conceptions chez les apprenants.

diSessa reconnaît par contre que ses conclusions sont peut-être trop intimement liées au domaine scientifique étudié, la physique et plus particulièrement la mécanique, et peuvent ne pas être transférables à d'autres domaines d'apprentissage, comme par exemple la cosmologie :

« In particular, physical intuition is built from a huge and critically important phenomenology—living every day in the physical world and having to negotiate it effectively in order to survive and flourish. To take a historically relevant contrast case, children's cosmologies certainly make interesting study from a conceptual change point of view. But it is unclear that uninstructed ideas in this domain are nearly as rich and experientially founded as intuitive physics. » (diSessa, 2008, p. 37)

Quoi qu'il en soit, du point de vue de l'application de ces deux perspectives théoriques en contexte d'enseignement (formel et informel), diSessa reconnaît qu'elles suscitent des approches similaires (simulation et modélisation informatique, discussion de classe, expériences, observations, etc.) qui ont donné de bons résultats en terme d'apprentissage et de changement conceptuel (diSessa, 2008, p. 56). En ce qui nous concerne, dans le cadre du développement de notre intervention didactique dans un planétarium numérique, cela signifie de ne pas s'arrêter aux conceptions, mais fouiller davantage pour révéler ce qui les sous-tend et ainsi approfondir le travail de changement conceptuel avec les apprenants, dans les limites permises par la (courte) durée de la visite au planétarium.

2.2.2.4 Le modèle d'apprentissage allostérique de Giordan (1989)

Une des principales raisons pour laquelle le modèle d'apprentissage allostérique de Giordan (1989) a été retenu dans le cadre de la présente recension est le fait qu'il propose plusieurs stratégies concrètes pour l'enseignement formel et informel, contrairement aux modèles exposés dans les sections précédentes, qui sont plus discrets à ce sujet. Le modèle allostérique ne se concentre pas uniquement sur les processus cognitifs, mais tente de tenir compte de la complexité de l'apprentissage en y incluant des aspects affectifs et sociaux, ce que font peu ou pas les autres modèles que nous avons étudiés, soient ceux de Posner et al. (1982), Vosniadou (1994) et diSessa (1993). Le modèle allostérique met également l'accent sur la qualité de l'environnement dans lequel se situe l'apprentissage et où évolue l'apprenant. D'ailleurs, le qualificatif allostérique fait ici référence aux protéines du même nom dont les interactions dépendent des stimuli qu'elles reçoivent de l'environnement où elles évoluent (Eastes & Pellaud, 2004).

Il s'agit également d'un modèle plus pragmatique, où l'importance de l'apprenant et des interactions entre contenus, apprenants et situations d'apprentissage sont au cœur de l'apprentissage (Giordan, 1989). Enfin, Giordan ne s'arrête pas aux processus d'enseignement formels, mais inclut de façon systématique dans sa théorie le pendant de la médiation et de la vulgarisation scientifique, ce qui en fait un modèle attrayant dans la situation qui nous préoccupe dans le cadre du présent travail. Ajoutons aux raisons invoquées précédemment la perspective française et francophone de Giordan et ses bases théoriques différentes de celles invoquées par des auteurs anglo-saxons, ce qui ouvre des vues intéressantes et autrement inédites sur le processus d'enseignement des sciences.

2.2.2.4.1 Description du modèle (fondements théoriques)

Giordan (1989) rappelle d'entrée de jeu que les apprenants se présentent en situation d'apprentissage avec un certain nombre d'idées (l'auteur utilise indifféremment les termes conceptions et représentations) nées de l'enseignement ou de leur propre interaction avec le

monde physique. Ces idées sont des constructions (au sens constructiviste du terme) qu'ils ont eux-mêmes élaborées, ce qui amène Giordan à justifier la centralité de l'apprenant dans ses propres apprentissages. Ces conceptions sont le plus souvent résistantes à l'enseignement; le savoir enseigné, s'il ne déplace ou ne modifie pas les conceptions, se retrouve alors « plaqué » à côté du savoir familier (Giordan, 1989).

En situation d'apprentissage, les connaissances antérieures mobilisées par l'apprenant dépendront de ce que ce dernier perçoit des enjeux de la situation. Selon Giordan, ne considérer que l'apprenant et ses conceptions laisse ainsi de côté un facteur tout aussi important, à savoir le contexte même de l'apprentissage « [...] ou plus précisément de la situation didactique en tant que système de relations “apprenant – situation d'apprentissage – enseignant, médiateur – savoir” » (Giordan, 1989, p. 241).

Contrairement aux auteurs anglophones cités précédemment, qui se réclament des travaux de Piaget, Bruner et Ausubel pour justifier l'approche du conflit cognitif où l'apprenant confronte les connaissances nouvelles à ses connaissances antérieures, Giordan invoque plutôt les travaux de Bachelard (1938; 1940) sur le concept d'obstacle épistémologique pour développer les idées significatives qui forment la base de sa théorie. Pour Bachelard, les élèves se présentent en situation d'apprentissage avec un certain « déjà-là » conceptuel qui fait obstacle au nouveau savoir. Il faut donc enseigner « contre » ces idées préconçues : « on connaît toujours contre une connaissance antérieure, produit du passé ou d'une attitude moins critique » (Giordan, 1989, p. 242).

Mais Bachelard distingue les erreurs d'inattention (« distractions de l'esprit fatigué ») et les erreurs positives, utiles, qui révèlent les savoirs antérieurs de l'apprenant. Ces erreurs mettent à jour des conceptions qui sont autant d'obstacles à franchir, mais dont la prise en compte est impérative dans l'élaboration même de l'enseignement puisqu'il s'agit des seuls outils que l'apprenant a à sa disposition pour comprendre. Il faut en quelque sorte « faire avec pour aller contre » ces conceptions (Giordan & de Vecchi, 1987), ce qui implique de débiter l'enseignement par une phase d'expression de ces savoirs antérieurs par les élèves eux-mêmes et leur prise en compte par la classe et le formateur.

2.2.2.4.2 *Le changement conceptuel selon Giordan*

Giordan (1989) rappelle d'abord que la notion de conception, en tant qu'obstacle épistémologique à déconstruire, franchir, dépasser ou extirper (l'auteur dresse une longue liste de synonymes qu'il emploie indifféremment) a donné naissance à un certain nombre d'approches pédagogiques et didactiques, dont certaines que nous invoquons dans les sections précédentes (Posner et al. (1982), entre autres), envers lesquelles Giordan se montre généralement critique.

L'auteur souligne les conditions plutôt frustes d'application de ces modèles théoriques dans la pratique, arguant qu'elles donnent souvent lieu à la recherche effrénée d'une panacée pédagogique découlant de considérations philosophiques et de certains présupposés cognitifs insuffisamment fondés (Johsua & Dupin (1999) sont du même avis). Il y a, selon lui, un gouffre entre ces propositions théoriques et leurs possibilités d'application en situation d'enseignement des sciences. Il déplore aussi que l'on fasse trop souvent s'exprimer les élèves sur leurs conceptions, ce qui est bien, mais pour ensuite les abandonner et ne plus y revenir, escamotant ainsi un véritable travail en profondeur sur les obstacles épistémologiques que rencontrent les apprenants. De plus, la présentation à des élèves mal préparés de concepts scientifiques complexes trop tôt dans le processus d'enseignement ne ferait qu'induire des définitions stéréotypées et apprises par cœur. Sous-estimer la résistance des conceptions premières des apprenants face aux concepts nouveaux amènerait enfin l'enseignant à ne présenter qu'un seul argument ou une seule expérience cruciale, dans l'espoir que l'apprenant franchira l'obstacle. Or, comme le note Giordan :

« [...] une conception ne fonctionne jamais isolément : il n'est pas évident qu'un savoir préalable se réfute directement. Celui-ci[,] en liaison avec une structure cohérente plus vaste, la pensée de l'apprenant, qui porte en elle sa logique et ses systèmes de signification propres, résiste même à des argumentations très élaborées. » (Giordan, 1989, p. 247-248)

Giordan note de plus que le contexte de fonctionnement d'une conception est rarement connu et pris en compte dans les modèles didactiques du changement conceptuel auxquels il fait référence (Posner et al. (1982), entre autres). Il remarque également qu'il ne suffit pas que l'apprenant prenne conscience que ses conceptions sont erronées pour accéder spontanément à de nouveaux concepts, mais que cela ne représente que l'amorce du travail de changement conceptuel : « L'apprentissage nécessite de procéder à de nouvelles séries de mises en relation, d'émettre de nouvelles possibilités à corroborer, ou d'accepter un nouveau modèle, etc. » (Giordan, 1989, p. 248).

Sur un plan plus fondamental, Giordan signale que les pratiques pédagogiques issues des modèles courants du changement conceptuel traitent le plus souvent les conceptions comme des objets, des fins en soi, au lieu de les considérer comme un type de connaissance empirique ou intuitif « faisant obstacle à la construction d'un autre type de connaissance : le savoir scientifique » (Giordan, 1989, p. 248). L'auteur fait également remarquer qu'on ne peut saisir les différences entre deux explications ou deux concepts que dans la mesure où on les comprend tous les deux, même minimalement, même superficiellement. Sinon, toute comparaison et évaluation de l'un vis-à-vis l'autre est impossible. Cela milite en faveur de fréquents retours sur les conceptions initiales des apprenants et leur mise en parallèle avec le concept scientifique à l'étude. Finalement, Giordan réfute l'idée qu'il soit toujours nécessaire d'invalider les savoirs préalables des apprenants, ceux-ci pouvant s'avérer très utiles dans leur évolution conceptuelle. Il donne à l'appui de sa thèse de nombreux exemples issus de l'histoire des sciences, où des concepts erronés ont tout de même été utiles et fructueux en mettant les scientifiques sur la piste d'une explication plus juste des phénomènes étudiés.

À la lumière de ce qui précède, Giordan juge qu'il est nécessaire de « dépasser les pédagogies fonctionnant “contre” les représentations initiales, tout comme il a été important de réfuter celles fonctionnant sur le “avec”. » (p. 249-250). Il poursuit en exposant le cœur de l'approche qu'il propose :

« L'acquisition de nouveaux savoir se situe tout à la fois dans le prolongement des savoirs antérieurs qui fournissent le cadre de questionnement et les éléments de référence pour décoder les idées nouvelles, et par rupture à ceux-ci, ou du moins par détour, l'élaboration d'un concept étant la résultante d'une structuration autre des divers éléments cognitifs en réponse à un questionnement. » (Giordan, 1989, p. 250)

En d'autres termes, c'est l'injonction déjà citée de « faire avec pour aller contre », processus conflictuel que Giordan met au centre de son modèle allostérique de l'appropriation du savoir scientifique, en ajoutant que « les conceptions ne sont donc pas seulement le point de départ et le résultat de l'activité, elles sont les instruments mêmes de cette activité [...] » (p. 250). Eastes & Pellaud (2004) parlent d'un processus de « déconstruction-reconstruction » en faisant référence au réseau conceptuel de l'apprenant qui doit subir une transformation plus ou moins radicale pour passer des conceptions premières aux concepts scientifiques.

Le modèle allostérique de Giordan s'articule autour de trois idées fondamentales qui fondent sa nouvelle approche. Premièrement, l'auteur souligne que l'élaboration de concepts ne saurait se réduire à la simple accumulation de données isolées. Au contraire, l'apprentissage des concepts « est caractérisé par la multiplicité des relations, la pluralité des organisations et la possibilité de les saisir et de les aborder sous des angles différents » (Giordan, 1989, p. 251), ce qui nous force à mettre l'accent sur les relations qui existent entre les concepts. L'existence de telles relations entre concepts d'un même domaine souligne à son tour l'importance de la structure cognitive d'accueil, ou structure d'intégration, qui valorise ces relations. Cela pose la condition que les nouvelles connaissances ne pourront être comprises que si des structures qui en permettent l'intégration sont disponibles, à l'image des protéines allostériques. En outre, les concepts en cours d'élaboration devront être consolidés par une mobilisation dans d'autres situations où ils peuvent être appliqués (réinvestissement) et différenciés progressivement au cours de l'apprentissage.

De plus, un nouvel élément ne s'inscrira pas directement dans la ligne des connaissances antérieures de l'apprenant, qui représentent le plus souvent un obstacle à son intégration (Giordan, 1989, p. 251). Il faudra au contraire que la structure intellectuelle d'accueil, la grille d'analyse, soit déformée, déconstruite, ce qui débouchera sur une transformation plus ou moins radicale du réseau cognitif de l'apprenant.

Enfin, il faudra que l'apprenant puisse repérer les ressemblances et les différences entre les anciens savoirs et les nouveaux et résoudre les contradictions entre les deux. L'auteur ajoute :

« [...] l'apprentissage en profondeur des concepts suppose que l'élève exerce un contrôle délibéré sur son activité d'étude et sur les processus qui régissent cette activité. De plus, l'apprenant réorganise l'information qui lui est présentée ou qu'il se procure en fonction des appréciations qu'il se fait des situations, des significations qu'il élabore à leur propos, des représentations du savoir qu'il établit. Enfin, tout ceci se joue dans la durée, les apprentissages fondamentaux demandant du temps. » (Giordan, 1989, p. 252)

À propos du facteur temps, l'auteur ajoute un point qui nous paraît très important lorsqu'il écrit : « Ce n'est donc que lentement, par la multiplication et la diversification des situations didactiques où ils sont opératoires, que concepts (et raisonnements intégrés) sont progressivement intégrés par les apprenants » (Giordan, 1989, p. 252).

2.2.2.4.3 *Application en situations d'apprentissage*

Pour favoriser l'évolution des conceptions des apprenants en situation d'enseignement ou de médiation des sciences, Giordan propose de mettre à leur disposition un riche environnement didactique, un « cocktail d'éléments indispensables que l'enseignant, le médiateur, pourra proposer à chaque apprenant pour interférer avec son système de pensée et lui permettre son dépassement » (Giordan, 1989, p. 253). Quelles sont les principales caractéristiques d'un tel environnement didactique ? Giordan (1989), Giordan & Pellaud (2001) et Eastes & Pellaud (2004) proposent les éléments suivants :

-
- Un environnement didactique devra induire chez l'apprenant une série de déséquilibres conceptuels pertinents en regard du sujet à l'étude;
 - Il permettra de contextualiser le problème et de l'ancrer dans le quotidien de l'élève;
 - Il sera une source de motivation pour l'élève, promouvra sa propre prise en charge de ses apprentissages et favorisera le développement d'une attitude et d'une démarche scientifiques;
 - Il favorisera les échanges et les confrontations diverses entre les conceptions des élèves, celles du médiateur, les informations recueillies, etc., dans le but de convaincre l'apprenant que ses conceptions sont inadéquates par rapport au problème traité;
 - Il favorisera un accompagnement respectueux et ouvert des élèves, de leurs erreurs, de leurs conceptions et questionnements;
 - Il favorisera le recueil de données pertinentes qui enrichiront l'expérience des apprenants;
 - Il favorisera la reformulation du problème et forcera les apprenants à envisager d'autres relations et d'autres solutions;
 - Il accompagnera l'élève dans la reconstruction de ses savoirs suite à la phase de déconstruction de ses conceptions;
 - Il permettra aux apprenants d'accéder à des modes de raisonnement variés;
 - Il fournira à l'apprenant un formalisme qui deviendra une aide à la réflexion pour organiser les nouvelles données;
 - Il fournira des situations propices au réinvestissement des savoirs nouvellement acquis, afin de tester leur opérationnalité et leurs limites;
 - Il favorisera la réflexion de l'apprenant sur ses pratiques conceptuelles (métacognition) et la logique sous-jacente aux démarches mises en jeu.

Giordan (1989) rappelle qu'il n'est pas question que l'apprenant refasse seul toute la démarche empirique et logique qui a mené les savants à élaborer les théories scientifiques, surtout que le temps d'enseignement formel ou informel est toujours limité. C'est pourquoi il faut que le médiateur crée des situations concrètes (situations questionnantes, confrontations multiples) où l'élève trouvera un certain nombre d'éléments significatifs (documentations, expérimentations et observations, argumentations) et un formalisme (symboles, graphiques, schémas, modèles) adaptés à la situation et pouvant être intégrés

dans sa démarche. Tous ces éléments devront susciter l'intérêt de l'élève et favoriser un réinvestissement rentable des connaissances nouvellement acquises. Ceci souligne à nouveau l'importance du médiateur scientifique : si l'élève demeure le maître d'œuvre de la construction de ses connaissances, il ne peut le faire seul et dans le vide, comme le rappellent Giordan & Pellaud (2001) : « [...] si seul l'élève peut apprendre, il ne peut apprendre seul. L'enseignant a donc une place fondamentale, non plus en tant que "transmetteur" de savoirs, mais en tant qu'organisateur des conditions d'apprentissage. » (p. 7)

2.2.3 Conclusion

Nous avons vu dans la présente section que l'enfant se présente en situation d'apprentissage avec un « déjà-là » conceptuel, les conceptions, qui naissent de ses interactions directes avec l'environnement physique, les messages véhiculés par ses pairs et sa culture, ses présupposés épistémologiques et ontologiques, le travail de son inconscient, etc. En toutes circonstances, l'apprenant est le premier responsable de la construction de ses connaissances. Les idées personnelles, naïves, qui naissent de cette construction sont parfois en contradiction les unes avec les autres et avec les savoirs scientifiques constitués. De plus, elles résistent fortement à l'enseignement et demeurent souvent inchangées à la fin de la scolarisation.

Ces « savoirs » préalables, les conceptions, sont donc des obstacles à l'apprentissage de notions scientifiques, mais elles sont également les seuls outils conceptuels auxquels l'apprenant a accès dans sa quête de compréhension. Il faut donc « faire avec pour aller contre », c'est à dire s'appuyer sur une connaissance fine des conceptions des apprenants pour faciliter et favoriser leur franchissement ou leur évolution. Heureusement, les conceptions font preuve d'une certaine plasticité et sont donc capables d'évolution dans certaines circonstances.

Le défi devient alors de concevoir des séquences didactiques et des environnements éducatifs adaptés pour que l'évolution des conceptions des apprenants, ce que les auteurs nomment le changement conceptuel, aille dans le sens souhaité par le formateur.

Nous avons présenté en détail quatre modèles du changement conceptuel, soient ceux de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), Vosniadou (1994), diSessa (1993) et Giordan (1989). Quelles leçons tirer de la présentation de ces quatre modèles du changement conceptuel que nous avons décrits dans cette section, modèles fort différents les uns des autres, pour la conception de notre propre intervention didactique dans un planétarium numérique ? On ne peut pas dire que ces quatre modèles théoriques pèchent par excès de propositions concrètes pour susciter et diriger l'évolution des conceptions des apprenants dans le sens souhaité par le formateur. Il nous apparaît toutefois que le modèle de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982) est celui des quatre dont l'opérationnalisation dans un contexte d'enseignement informel dans un planétarium numérique est le plus porteur. Nous détaillons dans ce qui suit les raisons qui nous amènent à retenir ce modèle, tout en l'augmentant de certains aspects tirés des trois autres modèles du changement conceptuel, afin d'en arriver à un modèle « hybride » qui nous guidera pour la suite de nos travaux.

Nous nous inspirerons en effet directement du modèle de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982) dans la construction de notre intervention didactique en retenant ses propositions clés, comme la nécessité de révéler et prendre en compte les conceptions des élèves, qui sont l'expression de leurs présupposés ontologiques et épistémologiques et constituent des erreurs fécondes dans une situation d'apprentissage donnée. Mais nous comprenons également qu'il ne s'agit là que d'une première étape et qu'il importe d'aller plus loin pour décrire en détails les théories plus ou moins organisées ou les atomes de savoirs qui sont à la base des conceptions, comme le suggèrent Vosniadou (1994) et diSessa (1993), chacun à l'intérieur du paradigme de sa propre approche théorique. Thouin (1997) parle de son côté des mécanismes d'élaboration, qui expliquent comment

l'apprenant en vient à exprimer telle ou telle conception dans un contexte donné, et qui s'avèrent de précieux outils pour comprendre l'origine et la trajectoire évolutive des conceptions. Nous nous efforcerons donc de prolonger le dialogue avec les apprenants afin de faire s'exprimer non seulement les conceptions, mais également les assises théoriques personnelles de chacun, dans le but de dresser un portrait plus complet de leur convictions épistémologiques.

La confrontation des conceptions des apprenants et de leurs théories sous-jacentes avec des observations ou des expériences contradictoires, un autre élément clé de l'approche préconisée par Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), nous semble également une étape incontournable vers le changement conceptuel. Comment en effet croire que l'apprenant délaissera ses conceptions si on ne lui en montre pas les défauts, faiblesses et limites ? Le débat ainsi suscité au sein du groupe permet également de confronter les diverses conceptions les unes aux autres, relativisant davantage leur vraisemblance.

La suite logique d'un tel débat au sein de la communauté des apprenants est, toujours suivant les prescriptions de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), la démonstration claire, acceptable par tous à l'intérieur des balises méthodologiques et épistémologiques adoptées par les apprenants, du mécanisme sous-jacent au phénomène étudié, qui devra être proposé afin de montrer comment il permet de résoudre les contradictions qui auront été soulevées au cours du débat. Selon les mots de Posner et al. (1982) et Strike & Posner (1982), cette démonstration et le mécanisme lui-même devront être intelligibles et plausibles. De plus, le mécanisme exposé devra être fructueux, permettant une extension pour montrer son applicabilité dans de nouveaux contextes inédits, par exemple dans le cadre d'un réinvestissement. Cela devrait achever de convaincre les participants d'abandonner leurs conceptions premières au profit de celle qui aura montré sa plus grande portée.

Enfin, nous comprenons également l'importance, pour mener à bien un tel programme, d'un environnement didactique riche et bien conçu, comme le préconise

Giordan (1989), permettant l'expression des idées des apprenants, les débats, mais surtout offrant une grande variété de stimuli multisensoriels, favorisant la multiplication des expériences, observations et points de vue sur les objets d'étude. En ce sens, le planétarium numérique s'avère un environnement didactique d'une très grande richesse pour l'apprentissage de notions astronomiques, comme nous le démontrerons dans la section suivante. Nous verrons également à la section 2.4 que la présentation de simulations réalistes constitue, surtout en sciences, un moyen idéal d'introduire le débat scientifique sur les conceptions dans l'environnement d'apprentissage. Là encore, le planétarium, surtout le planétarium numérique, est l'endroit parfait pour immerger les apprenants dans des simulations astronomiques hautement réalistes.

2.3 Environnements d'apprentissage constructivistes, réalité virtuelle et planétarium

« Thoughts are but dreams till their effect be tried. »
William Shakespeare (1564-1616)

On a vu à la section précédente comment la prise en compte des conceptions des apprenants dans une approche constructiviste de l'apprentissage amène les concepteurs de situations d'apprentissage (situations didactiques, pour reprendre la terminologie de Giordan (1989)) à délaisser un enseignement magistral, basé sur la transmission de connaissances, au profit d'une approche où l'apprenant construit ses propres savoirs en interaction avec ses pairs (qu'il s'agisse des autres apprenants ou des adultes) et avec l'environnement où cet enseignement se situe. Dans la présente section, nous nous attarderons plus particulièrement à la définition et à des exemples d'environnements d'apprentissage constructivistes et à l'étude de leur impact en enseignement.

Selon Lefoe (1998), une des principales conséquences de l'application du constructivisme en éducation a justement été la création d'environnements d'apprentissage riches qui permettent l'expression des intérêts uniques, du style individuel, des motivations et des capacités de chacun des apprenants. De tels environnements permettent une véritable construction de connaissances par leurs utilisateurs en leur fournissant tous les outils, les stimulations et les défis que leur propose le monde « réel ».

Cette nouvelle approche centrée sur le constructivisme dans des environnements riches a profondément modifié le travail des éducateurs. Jusqu'alors, leur but avait été de créer des épisodes éducatifs visant l'atteinte d'objectifs éducatifs mesurables et qui demandaient aux apprenants d'interagir d'une manière précise avec des savoirs prescrits pour eux et transmis par le biais de l'enseignant ou de tout autre moyen ou mécanisme. Au contraire, le constructivisme insiste non plus seulement sur la conception de séquences éducatives, mais davantage sur la création d'environnements éducatifs riches et variés

permettant justement l'interaction entre l'apprenant et les notions et concepts à l'étude par le biais de situations concrètes où il construit ses connaissances.

Comment concevoir de tels environnements d'apprentissage constructivistes et selon quels principes ? Une théorie de la conception d'environnements éducatifs doit pouvoir proposer un ensemble de principes et de modèles conceptuels pour aider les enseignants et les concepteurs à concevoir et créer de tels environnements. Ce sont ces principes et ces modèles que nous développerons — et critiquerons — dans la première partie de cette section.

Par la suite, nous définirons ce que sont les environnements de réalité virtuelle et exposerons les raisons pour lesquelles nous croyons que les environnements de réalité virtuelle utilisés en éducation — dont le planétarium fait partie — sont de véritables environnements d'apprentissage constructivistes capables de soutenir la construction de connaissances en astronomie par les apprenants en réunissant et en mettant en jeu les principes et les caractéristiques que nous aurons exposés. Enfin, nous expliquerons pourquoi nous croyons que le planétarium numérique est un véritable environnement d'apprentissage constructiviste, d'une grande richesse en ce qui a trait à l'apprentissage de notions en astronomie.

2.3.1 Les environnements d'apprentissage constructivistes : conception et défis

Qu'est-ce qu'un environnement d'apprentissage ? Selon Wilson (1996), un environnement d'apprentissage est un environnement qui favorise la construction de savoirs par l'apprenant, en interaction avec un milieu riche et varié. Au minimum, un environnement d'apprentissage doit donc mettre en relation un apprenant et un lieu ou un espace physique où l'apprenant est actif, utilisant des outils et des mécanismes, interprétant des informations, interagissant avec d'autres, etc. Wilson (1996) nous indique la

signification d'ajouter l'adjectif constructiviste à l'expression « environnement d'apprentissage » :

« A learning environment is a place where people can draw upon resources to make sense out of things and construct meaningful solutions to problems. Adding 'constructivist' to the front end of the term is a way of emphasizing the importance of meaningful, authentic activities that help the learner to construct understandings and develop skills relevant to solving problems. »
(Wilson, 1996, p. 3)

Wilson (1996) insiste ensuite sur la nécessaire richesse d'un tel environnement d'apprentissage, capable de fournir à l'apprenant une grande variété de moyens pour manipuler, interagir, observer, expérimenter, etc. Perkins (1991) suggère ainsi une liste d'attributs que devraient posséder les environnements d'apprentissage constructivistes :

1. Des sources d'information diverses (livres, Internet, etc.);
2. Des moyens techniques de représenter l'information (papier, crayons, ordinateur, etc.);
3. Un *phenomenaria*, terme que nous traduirons par « théâtre de phénomènes ». Un théâtre de phénomènes est un lieu où l'on peut présenter, observer et manipuler des phénomènes, réels ou simulés¹⁰;
4. Des kits de construction facilement manipulables (Lego, Meccano, etc.);
5. Un gestionnaire de tâches (l'enseignant, le programmeur, l'animateur, le médiateur).

Si l'établissement du « contenu » d'un environnement d'apprentissage constructiviste est important, les principes de sa conception et de son utilisation en éducation le sont tout autant. De nombreux auteurs ont abordé cette question cruciale. Ainsi, Jonassen (1991; 1994; s.d.), Wilson & Cole (1991), Ernest (1995), Duffy & Cunningham (1996), Honebein (1996), Cunningham, Duffy & Knuth (2000) et Savery &

¹⁰ Un planétarium, où l'on peut simuler de façon hautement réaliste une foule de phénomènes astronomiques, est certainement un théâtre de phénomènes idéal pour l'apprentissage de notions en astronomie.

Duffy (2001) ont identifié quelques grands principes devant guider la conception d'environnements d'apprentissage constructivistes. Nous reproduisons ci-dessous les sept principes élaborés par Honebein (1996), qui résumant bien la pensée des autres auteurs cités plus haut. Ainsi, les environnements d'apprentissage constructivistes devraient :

1. Favoriser l'expérimentation par l'apprenant du processus de construction de connaissances;
2. Favoriser la prise de conscience par l'apprenant du fait qu'il existe plusieurs points de vue valides;
3. Intégrer l'apprentissage dans des contextes réalistes et pertinents;
4. Encourager l'appropriation du processus d'apprentissage par l'apprenant et l'expression de ses intérêts;
5. Intégrer l'apprentissage dans une expérience sociale par le biais du dialogue et de la conversation;
6. Encourager l'utilisation de plusieurs modes de représentation (graphique, iconique, kinesthésique, etc.), et non seulement verbale et écrite;
7. Encourager la prise de conscience par l'apprenant de son propre mode de construction des savoirs (« comment je sais ce que je sais »).

Émettons quelques remarques critiques concernant certains des points qui viennent d'être mentionnés. D'abord, il nous apparaît difficile de soutenir que les élèves sont les principaux responsables de la détermination des notions à l'étude dans un domaine donné, de la façon dont ils vont apprendre et des méthodes et des stratégies qu'ils vont mettre en œuvre pour résoudre des problèmes. En pratique, les thèmes étudiés sont déterminés par le programme de formation scolaire, qui est imposé à l'école par des agents extérieurs à l'institution. Dans les milieux d'enseignement informels comme les planétariums, ce sont souvent les mêmes notions qui sont abordées, puisque ces institutions tentent de s'arrimer le plus possible aux contenus des programmes scolaires.

D'autre part, des raisons pratiques de gestion du temps et des lieux de l'enseignement empêchent l'enseignant ou le médiateur de laisser les apprenants totalement libres de déterminer le déroulement de la séance d'apprentissage. Dans un

contexte informel d'apprentissage, comme une visite au Planétarium, des contraintes liées à la disponibilité des locaux et à la durée de la visite empêchent également les visiteurs de vivre une expérience de visite totalement libre. Dans tous les cas, l'apprenant doit donc construire ses connaissances à l'intérieur d'un contexte contraignant, construction dont il demeure toutefois le maître d'œuvre.

Au point no 3, on propose que les concepteurs d'environnements d'apprentissage constructivistes rendent le contexte d'apprentissage le plus authentique possible en y remettant le « bruit de fond » de la vie quotidienne et en le basant solidement dans la complexité du monde réel, afin de rendre l'apprentissage plus concret. Cela est possible jusqu'à un certain point, mais il faut tout de même prendre garde de ne pas rendre la situation ou le problème tellement complexe qu'il provoque une surcharge cognitive chez l'apprenant et rend toute solution inaccessible (Harper, Squires & McDougall, 2000). Un peu de complexité permet à l'apprenant de développer ses habiletés à résoudre des problèmes; trop de complexité le décourage et l'empêche de mener son travail à bien.

Au point no 4, plutôt que ce soit l'enseignant ou le médiateur qui détermine ce que l'élève devra apprendre, on propose que les apprenants jouent un rôle central, entre autres en exprimant ce qui les motive et les intéresse, d'où découleront leurs buts et leurs objectifs. Nous faisons à cette proposition la même objection que précédemment, en ajoutant qu'il revient à l'enseignant ou au médiateur d'écouter ce que les élèves ont à dire et, dans la mesure du possible, d'accéder à leurs demandes ou d'exaucer leurs souhaits. Mais lorsque ce n'est pas possible, l'enseignant ou le médiateur doivent trouver des façons de motiver les apprenants (scénario, mise en contexte, etc.) pour que la tâche qu'ils leur proposent soit la plus attrayante possible, une opération de dévolution délicate dont dépendra fortement le succès de l'apprentissage.

Enfin, il nous semble qu'il manque dans les principes de conceptions d'environnements d'apprentissage constructivistes cités plus haut un point concernant la

prise en compte des conceptions des apprenants et, surtout, les moyens mis en œuvre pour favoriser leur évolution vers des conceptions plus proches de ce que les experts tiennent pour vrai. C'était là le sujet de la section 2.2.

Malgré les quelques réserves que nous venons d'exprimer, nous ne saurions être plus d'accord avec les principes exposés précédemment en ce qui concerne la conception d'environnement d'apprentissage constructivistes. Favoriser l'expérimentation par l'apprenant du processus de construction des connaissances dans un contexte riche où plusieurs conceptions s'expriment dans un dialogue entre pairs et avec l'enseignant, et en s'appuyant sur plusieurs modes de représentation ne peut que faciliter un apprentissage profond et durable. Si, de plus, la classe de science ou le milieu informel d'enseignement devient un véritable lieu d'observation, d'expérimentation et de débat scientifique au sens où l'entendent Gil-Perez & Carrascosa-Alis (1994) et que les apprenants ont également le loisir de réfléchir à leurs propres apprentissages, l'on se rapproche d'une situation idéale.

Nous exposerons dans les sections suivantes les raisons pour lesquelles nous croyons que les environnements de réalité virtuelle utilisés éducation — dont le planétarium fait partie — sont de véritables environnements d'apprentissage constructivistes capables de soutenir des apprentissages réels et durables en réunissant et en mettant en jeu les caractéristiques et les principes que nous venons d'exposer.

2.3.2 La réalité virtuelle comme environnement d'apprentissage constructiviste

Dans cette section, nous définirons ce qu'est la réalité virtuelle et examinerons quelles caractéristiques propres aux environnements immersifs recréés par cette technologie (immersion, sensation de présence, interface naturelle, possibilité de simuler de façon réaliste toutes sortes d'environnements, etc.) en font de véritables environnements d'apprentissage constructivistes. Nous ne parlerons ici que des applications de la réalité virtuelle en éducation, sans aborder ses autres applications (par exemple, les jeux). Par la

suite, nous exposerons les caractéristiques communes au planétarium et aux environnements virtuels en éducation, ce qui nous permettra de conclure que le planétarium est bel et bien un environnement d'apprentissage constructiviste.

2.3.2.1 Qu'est-ce que la réalité virtuelle ?

2.3.2.1.1 Définition

L'expression « réalité virtuelle » fait référence à une technologie basée sur la qualité d'image des nouveaux projecteurs vidéo et la puissance de calcul des ordinateurs qui utilisent des interfaces d'entrée et de sortie intuitives et immersives (casques de type *Head-Mounted Display (HMD)*, environnements de type *ImmersaDesk* ou *CAVE*, etc., voir McLellan (1996) et Youngblut (1998) pour une description détaillée de ces technologies) permettant aux utilisateurs de faire l'expérience et d'interagir avec un environnement artificiel, non plus par le biais d'interfaces traditionnelles (clavier, souris, écran), mais bien comme s'il s'agissait du monde réel (Schunk, 2004). Nous proposons ici une définition de la réalité virtuelle qui nous servira à mettre en relief les aspects les plus importants de cette technologie :

« [Virtual Reality is] a combination of high-end computing, human computer interfaces, graphics, sensor technology and networking. This allows the user to become immersed in and interact in real time with a 3D artificial environment representing realistic or non-realistic situations. [Educational Virtual Environments are] the virtual environments that are designed to educate the user, have educational objectives and provide the user with experiences they would otherwise not be able to experience in the physical world. » (Bakas & Mikropoulos, 2003, p. 959)

Il ressort clairement de cette définition qu'un environnement de réalité virtuelle consiste, au minimum, en un ordinateur (ou une autre forme de technologie permettant la présentation de contenus, comme des projecteurs vidéo), un utilisateur et une interface ordinateur-humain configurée afin de maximiser l'effet d'immersion et de « présence »

pour l'utilisateur dans un environnement artificiel créé par la technologie. Cet environnement isole l'utilisateur du monde extérieur, lui proposant d'explorer un univers tridimensionnel reproduisant une situation réaliste ou non et permettant une interaction en direct (*real time*) entre l'utilisateur et la simulation. Enfin, et c'est là le principal avantage de cette technologie, la réalité virtuelle offre la possibilité d'explorer des environnements et d'assister à des phénomènes autrement inaccessibles. Nous reviendrons plus en détail sur cet aspect un peu plus loin dans ce texte.

On le voit, la réalité virtuelle est clairement une technologie qui modifie de façon profonde notre interaction avec le monde médiatisé. Psotka (1995) n'hésite pas à parler d'un changement de paradigme :

« VR [Virtual Reality] provides a paradigm shift from previous interactive computer technologies because it permits all human senses, especially the most communicative, vision, to be used in natural ways that evolution has best prepared us to use them. [VR] provides a fundamentally different mode of communication between computer and person, between symbolic form and mental representation; and between collaborators in conceptual worlds. VR replaces interaction with immersion; it replaces the desktop metaphor with a world metaphor; and it replaces direct manipulation with symbiosis. » (Psotka, 1995, p. 410)

2.3.2.1.2 Immersion et présence en réalité virtuelle immersive

McLellan (1996) souligne que l'immersion et le sentiment de présence au sein d'un environnement virtuel immersif sont les deux éléments clés de ce type de technologie :

« The key feature of all virtual-reality systems is that they provide an environment created by the computer or other media where the user feels present, that is, immersed physically, perceptually, and psychologically. » (McLellan, 1996, p. 459)

La présence est ici définie comme la réponse psychologique de l'utilisateur à un environnement médiatisé comme s'il s'agissait de son environnement local, et non d'un environnement lointain ou synthétique (Slater, 2003). Ce concept est similaire au *suspension of disbelief* qui est notre conviction que l'information que nous envoient nos

sens correspond à la réalité, et non à une simulation (Moore, 1995). La présence dépend à son tour en bonne partie des capacités immersives du système de réalité virtuelle, l'immersion étant ici définie comme la capacité d'un système technologique de réalité virtuelle de saturer les sens d'un utilisateur, par exemple en couvrant l'ensemble de son champ de vision à l'aide d'images stéréoscopiques (Psotka, 1995) et en simulant des perceptions auditives et tactiles, l'isolant ainsi du monde extérieur (Slater, 2003).

Lin, Duh, Parker, Abi-Rached, & Furness (2002) ont étudié les principaux facteurs qui influencent le sentiment de présence qu'un utilisateur ressent dans un environnement virtuel, quelle que soit la technologie qui lui sert de support. En utilisant diverses méthodes de mesure psychologiques et physiologiques, ils ont montré que le sentiment de présence est fortement corrélé à une meilleure résolution des images, un plus haut taux de rafraîchissement (nombre d'images par seconde, de 30 ips à 120 ips¹¹) et l'augmentation du champ de vision de l'utilisateur couvert par l'environnement virtuel (l'immersion), avec une réponse asymptotique au-delà de 140 degrés. Hatada, Sakata & Kusaka (1980) de même que Prothero & Hoffman (1995) et Tan, Gergle, Scupelli & Pausch (2003; 2004) sont tous arrivés à des conclusions similaires.

Outre le champ visuel couvert par un système de réalité virtuelle, d'autres facteurs agissent sur l'immersion et le sentiment de présence dans un tel environnement. Par exemple, une plus grande distance entre l'utilisateur et la surface de projection facilite ce que Psotka (1995) appelle la *self localization*, la capacité d'un utilisateur d'évaluer sa position dans un espace virtuel et de juger des distances qui le séparent des objets virtuels environnants. Une plus grande distance entre l'utilisateur et « l'écran » favorise l'« auto localisation », ce qui favorise à leur tour l'immersion et le sentiment de présence dans un environnement virtuel.

¹¹ Images par seconde (ips). En anglais : fps, *frames per second*.

Pspotka (1995) poursuit en notant que l'information visuelle que perçoit l'utilisateur dans un environnement virtuel est nécessaire, mais pas toujours suffisante pour susciter son immersion complète ni un véritable sentiment de présence. Un autre ingrédient-clé est l'information que lui envoie son système vestibulaire (oreille interne), synchronisée à ce que ses yeux lui montrent de l'environnement lorsqu'il pivote ou tourne la tête pour suivre l'action dans un tel environnement.

« Without motion correlated with visual change, the central and defining feature of VR—presence or immersion—is absent. In VR environments a person has to generate the motion to create the feeling of presence in most current applications. » (Pspotka, 1995, p. 415)

L'auteur affirme même que, plus l'environnement simulé est complexe, non familier ou hyper réaliste, plus ces informations vestibulaires prennent de l'importance. Il est clair que dans un théâtre de planétarium, où le spectateur doit obligatoirement tourner la tête pour suivre les mouvements des corps célestes — comme sous le vrai ciel étoilé, d'ailleurs — cette synchronisation entre le mouvement de la tête et l'information du système vestibulaire contribue fortement au sentiment de présence et de réalisme que l'on ressent dans ce type de simulation. Slater, Steed, McCarthy & Maringelli (1998) vont même plus loin en parlant des mouvements naturels de tout le corps qu'un participant devrait pouvoir effectuer dans un environnement virtuel :

« [...] the reported presence of a participant in an immersive VE [Virtual Environment] is likely to be positively associated with the amount of whole body movement (such as crouching down and standing up), and head movements (looking around and looking up and down) appropriate to the context offered by the VE. » (Slater, Steed, McCarthy & Maringelli, 1998, p. 16)

Selon Osberg (1993), même si les stimuli visuels dominent dans un environnement virtuel, leur combinaison avec des données sensorielles auditives est un autre facteur très important pour créer un environnement immersif crédible. La réponse affective aux sons est en effet très forte, comme l'illustre Rheingold (1991) :

« There's nothing like the sound of footsteps behind you to help convince you that you are in a dark ally late at night in a bad part of town—sounds have the ability to raise the hairs on the back of your neck. » (Rheingold, 1991, p. 151)

Jelfs & Whitelock (2000) ajoutent que l'ambiance sonore sera d'autant plus déterminante pour créer le sentiment de présence que les sons seront spatialisés (tridimensionnels) en lien avec les signaux visuels. Winn (1997) rapporte d'ailleurs l'utilisation d'écouteurs stéréophoniques pour spatialiser les sons dans des environnements virtuels, avec pour résultat une augmentation marquée du sentiment de présence rapportée par les utilisateurs. Jelfs & Whitelock (2000) insistent sur l'importance des sons pour augmenter le sentiment de présence dans les environnements virtuels :

« [...] it is the audio feedback which provides the 'feeling of presence' more than any other parameter. Participants did mention representative [visual] fidelity as a salient variable but they did not emphasize its role in the feeling of presence. It is the audio feedback that provides aid to navigation, tells the user they are in a dynamic environment and also provides an emotional response. » (Jelfs et Whitelock, 2000, p. 151)

Enfin, Lin et al. (2002) ont montré que l'augmentation du sentiment de présence dans un environnement virtuel — par les divers moyens visuels, auditifs et kinesthésiques que nous venons de décrire — se traduit à son tour par une plus grande attention de la part de l'utilisateur, une meilleure écoute du message médiatisé par l'environnement virtuel, une amélioration de la rétention des messages et une augmentation de l'efficacité des tâches à accomplir et de la navigation dans l'environnement virtuel. Bricken (1991) a découvert que les environnements virtuels où le sentiment de présence est grand étaient extrêmement motivants, particulièrement pour des élèves qui ont des styles d'apprentissage non traditionnels. Il semble donc que toute augmentation de l'immersion et du sentiment de présence de l'utilisateur aura un impact positif sur les apprentissages réalisés dans un environnement virtuel immersif à vocation éducative.

2.3.2.1.3 *L'importance d'une interface humain-technologie intuitive en réalité virtuelle immersive*

Outre l'immersion et le sentiment de présence au sein d'un environnement virtuel, un autre aspect clé de la réalité virtuelle en éducation est la disparition d'une interface artificielle (clavier, souris, écran, etc.) au profit d'une interface humain-technologie plus intuitive qui permet des interactions naturelles entre les sens de l'utilisateur (vue, ouïe, toucher, etc.) et le monde virtuel, interactions similaires à celles qu'il expérimente dans la réalité. Dans le cas du sens de la vue, cela a pour premier avantage de réduire la charge cognitive de l'utilisateur grâce à la simplification et l'aspect direct de ses perceptions visuelles dans l'environnement virtuel (Psothka, 1995).

Selon Winn (1993), l'utilisation d'une interface plus naturelle entre les sens de l'utilisateur et les contenus présentés par l'environnement virtuel a deux autres avantages très importants. Premièrement, la distinction sujet-objet qui existe entre les humains et l'information affichée par un ordinateur ou toute autre forme de technologie disparaît. On découvre en effet le monde de deux façons : par nos interactions directes et quotidiennes avec le réel (*first-person interactions*, que nous traduirons par interactions directes) ou par la description qui nous en est faite par autrui (*third-person interactions*, ou interactions indirectes). La seconde façon mène à des connaissances indirectes, communes, objectives et toujours explicites, tandis que la première mène à des connaissances directes, personnelles, subjectives et souvent implicites. De plus, les expériences et les actions qui découlent de connaissances acquises de façon directe se caractérisent par l'absence de réflexion délibérée. Les actions découlent alors directement de notre perception du monde, réel ou simulé, sans que la conscience n'intervienne :

« In fact, most of what we accomplish in our daily lives is achieved without our deliberately thinking about it. People do not usually plan ahead about how they will solve day-to-day problems. They simply use what is on hand at the time and attempt to perform the task. » (Winn, 1993, p. 6)

De ce point de vue, nos interactions avec un ordinateur par le biais des interfaces traditionnelles sont des expériences qui mènent à des connaissances indirectes, peu importe

la maîtrise avec laquelle nous manipulons ces interfaces. En effet, l'information que l'ordinateur nous présente demande réflexion avant que nous y réagissions, ce qui n'est pas la marque d'une expérience directe.

Par contre, lorsque l'interface disparaît, comme c'est le cas dans la réalité virtuelle immersive, la frontière sujet-objet disparaît elle aussi, permettant que nos interactions avec le monde virtuel soient exactement les mêmes que nos interactions directes avec le monde réel. Les connaissances ainsi construites sont alors directes, personnelles, subjectives et implicites.

« Immersive VR allows us to create from our experience the kind of knowledge that has hitherto been accessible only through direct experience of the world, never through computer interface, desktop VR, or any of the third-person [indirect] experiences that predominate in school. » (Winn, 1993, p. 7)

Cette expérience directe d'un monde virtuel réaliste médiatisé par la technologie, mais offrant une interaction intuitive, permet donc la construction de connaissances comme dans le monde réel.

Second avantage de l'utilisation d'interfaces intuitives en réalité virtuelle, l'immersion permet une interaction entièrement non symbolique avec l'environnement virtuel. Généralement, les interactions directes entre un individu et le monde réel sont non symboliques, tandis que les interactions indirectes (comme les descriptions, les mots, les images, etc.) sont médiatisées par des symboles formels qui sont le fruit d'une convention apprise par tous. Ces symboles imposent à l'utilisateur une réflexion avant l'action, ce qui empêche une expérience directe et donc la construction de connaissances directes. La réalité virtuelle permet de court-circuiter l'utilisation des symboles :

« [...] immersive VR can allow students to learn concepts and to solve problems non-symbolically. Indeed, the symbol system can be learned subsequently once the concepts have been mastered. However, knowing the symbol system is neither a precondition nor a catalyst for learning, and

eventually that is certain to be beneficial to students who have particular predispositions to learn that are not supported in third-person [indirect] symbol-based classroom activities. » (Winn, 1993, p. 9)

Cette dernière caractéristique de la réalité virtuelle permet en outre à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement virtuel en utilisant « les mots de tous les jours », de façon naturelle et sans *a priori*. L'utilisateur aborde le nouvel environnement avec un esprit vierge, permettant d'en faire l'expérience avant même de devoir utiliser un quelconque formalisme. Pour Jonassen, Mayes & McAleese (1993), la négociation de tout formalisme avant une expérimentation teinte irrévocablement cette expérience et les connaissances qu'elle permet d'acquérir. De ce point de vue, la réalité virtuelle permet à l'utilisateur de faire des expériences et de faire ses propres apprentissages sans devoir au préalable se familiariser avec un formalisme quelconque.

Il apparaît déjà, à la lumière des caractéristiques de la réalité virtuelle que nous venons d'exposer, que les environnements virtuels immersifs en éducation se rapprochent de l'idéal des environnements d'apprentissage dont nous avons exposé les principes de conception à la section 2.3.1. Il reste à asseoir notre prétention que les environnements virtuels en éducation sont bel et bien des environnements d'apprentissage constructivistes en démontrant leur caractère constructiviste, ce que nous ferons à la section suivante.

2.3.2.2 Les environnements virtuels immersifs, des environnements d'apprentissage constructivistes ?

Winn (1993) remarque que le constructivisme est devenu au fil des ans le principal paradigme qui sous-tend le développement de la grande majorité des applications éducatives de la réalité virtuelle :

« [...] I make the case that the characteristics of immersive VR and the axioms of constructivist learning theory are entirely compatible and claim that constructivist theory provides a valid and reliable basis for a theory of learning in virtual environments. » (Winn, 1993, p. 17)

Le constructivisme affirme en effet que notre expérience directe du monde réel est la source d'un grand nombre de nos apprentissages. Ces expériences directes sont personnelles et non réflexives, c'est-à-dire qu'elles se font sans l'aide de la réflexion consciente et des symboles. La réalité virtuelle immersive fournit justement à l'utilisateur un accès direct à un monde virtuel en faisant disparaître l'interface qui crée une frontière entre le participant et la technologie. La réalité virtuelle permet donc à un individu de vivre une expérience directe et personnelle d'un environnement quelconque, expérience semblable à celles qu'il vit dans le monde réel, mais dans un espace contrôlé permettant d'accéder à des lieux autrement inaccessibles (voir plus loin). C'est ce qui nous fait dire que les environnements virtuels en éducation sont bel et bien des environnements d'apprentissage constructivistes.

La réalité virtuelle immersive permet également de placer les utilisateurs dans un contexte où ce qu'ils apprennent peut s'appliquer directement et immédiatement, permettant de retrouver tous les avantages du « *situated learning* », dont on a démontré qu'il est plus pertinent et permet d'obtenir de meilleurs résultats que l'apprentissage hors contexte (Winn, 2002). Par exemple, de nombreuses études, dont celles rapportées par Psocka (1995), ont montré que les apprentissages concernant certaines tâches procédurales précises (opérations d'une console ou navigation spatiale), apprentissages faits dans un environnement virtuel reproduisant tous les aspects du contexte où ces tâches devaient être exécutées, étaient ensuite bien transférés à des situations du monde réel.

De plus, lorsque plusieurs participants font l'expérience du même environnement virtuel en même temps, leur conversation et leur confrontation permet une véritable négociation quant à la signification des expériences personnelles de chacun qui mène à un compromis sur leurs apprentissages. On assiste alors à une co-construction de savoirs. Les environnements virtuels où plusieurs apprenants construisent des savoirs en collaboration sont donc eux aussi des environnements d'apprentissage socioconstructivistes.

La flexibilité des environnements créés par la réalité virtuelle immersive, construits à partir de données générées par un ordinateur ou une autre forme de technologie, permet en outre au participant de vivre des expériences qui favorisent la construction de connaissances dans des situations autrement inaccessibles dans le monde réel. Winn (1993) en donne quelques exemples :

1. Simulation : Un monde virtuel peut contenir un facsimilé d'un objet ou d'un environnement réel, reproduit comme tel parce qu'il serait trop coûteux ou trop dangereux de le rendre accessible à l'utilisateur (par exemple, un réacteur nucléaire, un laboratoire de génétique, un observatoire astronomique construit au sommet d'une haute montagne, la surface de la Lune ou d'une autre planète, etc.);
2. Changements d'échelle : L'immersion dans un environnement virtuel permet des changements d'échelle radicaux dans la taille du participant et celle des objets qui l'entourent. Par exemple, l'on peut s'approcher d'un objet jusqu'à ce que sa structure interne (atomes) devienne perceptible, puis s'en éloigner jusqu'à embrasser du regard tout l'environnement astronomique qui l'entoure;
3. Changements temporels : Un environnement virtuel permet d'accélérer ou de ralentir le passage du temps, donnant ainsi accès à des phénomènes dont la durée est trop brève pour être perceptible (par exemple, la désintégration radioactive d'un atome, une réaction chimique explosive, etc.) ou encore à des systèmes qui évoluent très lentement (tectonique des plaques, saisons, phases de la Lune, etc.).

Ces expériences permettent de vivre des interactions directes autrement inaccessibles dans le monde réel et de construire des connaissances nouvelles dans des environnements virtuels inédits. Certains envisagent même un environnement virtuel qui remplacerait les laboratoires de physique, de chimie et de biologie par un seul espace où chacune de ces disciplines pourrait faire l'objet « d'expériences virtuelles » (Kalawski, 1996). Enfin, un autre avantage de la réalité virtuelle en éducation est la possibilité qu'offrent ces environnements de revenir en arrière et de tester diverses solutions, en plus de la possibilité de « prendre son temps » pour les explorer (Jelfs & Whitelock, 2000).

Ce sont toutes ces caractéristiques qui font, selon nous, des environnements virtuels immersifs des outils tout à fait uniques dans un contexte éducatif, en particulier du fait

qu'ils permettent de faire des apprentissages directs et non symboliques (dans une perspective constructiviste), comme l'utilisateur le ferait dans le monde réel :

« The case is made that immersive VR offers very different kinds of experience than those students normally encounter in school. The psychological processes that become active in immersive VR are very similar to the psychological processes that operate when people construct knowledge through interaction with objects and events in the real world. »
(Winn, 1993, p. 2)

À la lumière de ce qui précède, nous soutenons donc que les environnements de réalité virtuelle offrant à l'utilisateur une forte immersion, un fort sentiment de présence, des interfaces intuitives, une interaction directe et non symbolique et une multiplicité d'environnements à explorer constituent de véritables environnements d'apprentissage constructivistes, au sens où nous l'entendions à la section 2.3.1.

En particulier, les environnements virtuels sont des « théâtres de phénomènes » (Perkins, 1991) qui proposent diverses sources de données et des moyens techniques variés pour représenter l'information. Dans de tels environnements, qui répondent aux injonctions décrites par Honebein (1996) à propos des environnements d'apprentissage constructivistes (voir section 2.3.1), l'apprenant peut expérimenter et s'approprier un processus véritable de construction de connaissances, porter un regard varié et multiple sur une réalité complexe, intégrer ses apprentissages dans des contextes réalistes et pertinents, les représenter de diverses façons et les réinvestir sur-le-champ dans des situations nouvelles. Si l'environnement virtuel permet en outre le travail en groupe, l'apprenant peut y intégrer ses apprentissages dans une expérience sociale basée sur le dialogue et la confrontation des idées.

2.3.3 Le planétarium numérique, un environnement d'apprentissage constructiviste

Le planétarium numérique, un environnement de réalité virtuelle où l'immersion et le sentiment de présence prédominent, où une interface intuitive permet des apprentissages non symboliques, directs, comme l'observation du vrai ciel étoilé ou un voyage dans l'espace interstellaire, peut-il être considéré comme un environnement d'apprentissage constructiviste ? Nous croyons que oui. En effet, toutes les caractéristiques des environnements virtuels éducatifs immersifs que nous avons décrites dans la présente section et qui augmentent l'immersion et le sentiment de présence dans un environnement virtuel — interface intuitive, vaste champ de vision couvert par les images, fidélité et haut taux de rafraîchissement des images, grande distance entre le spectateur et l'écran, coordination des signaux visuels et vestibulaires, spatialisation des sons — se retrouvent *de facto* dans un théâtre de planétarium. Le fait que la distance entre le spectateur et la surface de projection soit généralement assez grande (de l'ordre de dix mètres et plus pour les grands planétariums) et que la salle soit plongée dans la pénombre ou le noir complet ajoute au réalisme de la simulation (Lowry, 1984).

Comme les environnements de réalité virtuelle immersifs, et parfois mieux que de tels environnements, le planétarium numérique est donc un environnement immersif qui isole le spectateur du monde extérieur (on peut y admirer des étoiles en plein jour !), lui permet d'explorer des environnements extrêmement fidèles à la réalité où aucun être humain ne s'est encore jamais rendu (l'espace interstellaire, la surface d'autres planètes, le noyau galactique, etc.) et lui permet d'observer en accéléré divers phénomènes astronomiques en ressentant un fort sentiment de présence. Le planétarium est donc un environnement virtuel éducatif au potentiel énorme pour l'enseignement de l'astronomie. C'est aussi parce que le planétarium offre une immersion si réaliste qu'il est également un environnement d'apprentissage constructiviste.

La principale différence entre le planétarium et d'autres types de simulateurs de réalité virtuelle a trait à la taille de la salle (généralement beaucoup plus vaste dans le cas

du planétarium) et, par conséquent, la possibilité d'y travailler en groupe. Tandis que la petite taille des simulateurs qui utilisent des casques *HMD* ou des systèmes de type *ImmersaDesk* ou *CAVE* ne permettent pas ou peu le travail d'équipe, le planétarium se prête bien à l'apprentissage coopératif, au travail d'équipe et à la co-construction de savoirs dans un contexte social très riche. Il s'agit d'un avantage marqué pour le planétarium : Moore (1995) signale que les environnements virtuels qui favorisent le travail d'équipe sont généralement plus à même de susciter des apprentissages profonds et durables. Cette caractéristique supplémentaire fait donc du planétarium un environnement virtuel éducatif de premier plan, un véritable environnement d'apprentissage socioconstructiviste.

2.3.4 Conclusion

Après avoir défini ce que sont les environnements d'apprentissage constructivistes, montré que les environnements de réalité virtuelle immersifs en éducation en partagent toutes les caractéristiques et établi le parallèle entre ces environnements virtuels et le planétarium, il nous est maintenant possible d'affirmer que le planétarium numérique est véritablement un environnement d'apprentissage constructiviste au fort potentiel éducatif pour l'enseignement de l'astronomie, peut-être même supérieur aux autres systèmes immersifs actuels, puisqu'il permet le travail d'équipe et la co-construction de savoirs. Le planétarium constitue un lieu unique où divers phénomènes astronomiques peuvent être simulés de façon hautement réaliste à toute heure du jour et en accéléré, immergeant l'utilisateur dans l'espace, suscitant un fort sentiment de présence et favorisant la construction de savoirs par les apprenants.

De plus, contrairement au planétarium optomécanique traditionnel, le planétarium numérique est affranchi de la contrainte géocentrique et peut donc multiplier les points de vue à l'infini. Dans les nouveaux théâtres numériques, des images de synthèses hautement réalistes sont générées en temps réel par de puissants ordinateurs (Ruiz & Acker, 2006) et permettent de naviguer à travers d'immenses bases de données tridimensionnelles. Cet

accès direct à l'ensemble de l'Univers connu en temps réel offre des occasions d'apprentissages inédites :

« When astronomy VE software [...] is run immersively in a full-dome theater, the illusion of the artificial reality is further enhanced by the wrap-around projection that surrounds the user with imagery on all sides. [...] the combination of VE and full-dome technologies results in a unique opportunity for astronomy instruction that is not possible in any other milieu. » (Yu, 2005, p. 6)

Le caractère numérique des images permet en outre de contourner la difficulté de ne pouvoir observer un phénomène astronomique à forte composante spatiale que d'un seul point de vue (géocentrique) en offrant d'autres points de vue sur le même phénomène. Une telle approche a déjà donné d'excellents résultats dans un grand nombre d'études utilisant des modélisations ou des simulations d'environnements virtuels tridimensionnels pour enseigner diverses notions astronomiques (voir section 2.4.2).

Il est toutefois nécessaire de s'assurer que les spectateurs qui vivent ce genre d'expérience sous la voûte d'un planétarium soient en mesure de réconcilier ces divers points de vue, une habileté qui peut faire l'objet d'un apprentissage (Bishop, 1978; Sonntag, 1989), mais pas avant que les apprenants aient atteint un certain niveau de développement cognitif (Bishop, 2002). Une véritable évaluation de ce type d'approche éducative dans un planétarium numérique reste cependant à faire (Yu & Sahami, 2007).

Il est également nécessaire de s'assurer que les apprenants sont accompagnés, car le simple fait de laisser des apprenants libres dans un tel environnement ne garantira pas des apprentissages valables ni durables. Comme dans n'importe quelle situation d'apprentissage, les apprenants ont besoin d'être guidés, de recevoir une rétroaction sur leurs actions et de collaborer avec d'autres dans leur co-construction de savoirs. La section suivante sera justement consacrée à la présentation de stratégies visant à accompagner les apprenants dans leur exploration d'un riche environnement astronomique médiatisé par le planétarium numérique.

2.4 Les simulations en astronomie, des outils pour apprendre

« Education is not the filling of a pail but the lighting of a fire. »
Attribué à William Butler Yeats (1865-1939)

Dans cette section, nous donnerons suite à la remarque qui clôturait la section précédente, à savoir comment accompagner au mieux les apprenants dans leur exploration d'un environnement virtuel tridimensionnel immersif afin de s'assurer qu'ils y construiront des savoirs réels et durables. Nous proposerons que l'utilisation d'une simulation astronomique hautement réaliste et immersive, au sein de laquelle les apprenants peuvent naviguer tout en recevant de l'aide sous la forme d'une scénarisation plus ou moins serrée, soit la meilleure façon de leur fournir des situations d'apprentissage riches et variées dans lesquelles ils pourront s'investir dans une véritable construction de connaissances. Nous présenterons ensuite quelques exemples de recherches récentes qui ont démontré l'utilité d'une telle approche pour l'apprentissage de notions astronomiques, mais également mis au jour les besoins de guidage et d'échafaudage des apprenants plongés au cœur de ces simulations. Ces exemples ont été retenus en raison de leur pertinence et parce qu'ils se rapprochent énormément de ce que nous comptons faire dans le cadre de notre propre recherche.

2.4.1 Les simulations en éducation

Du point de vue de la conception d'environnements d'apprentissage constructivistes utilisant des technologies de réalité virtuelle, les outils les plus intéressants sont certainement les simulations (Jonassen, Peck & Wilson, 1999), dont Gredler (2004) dresse la liste des principales caractéristiques :

« (a) an adequate model of the complex real-world situation with which the student interacts (referred to as fidelity or validity), (b) a defined role for each participant, with responsibilities and constraints, (c) a data-rich environment that permits students to execute a range of strategies, from targeted to “shotgun” decision making, and (d) feedback for participant

actions in the form of changes in the problem or situation. » (Gredler, 2004, p. 571)

L'auteure poursuit en donnant des exemples de simulations qui répondent à ces critères, comme les simulateurs de vol pour l'entraînement des pilotes ou des astronautes. Hoffman (s.d.) note, comme Gredler (2004), que les simulations « transportent » souvent les utilisateurs dans un autre univers et les laissent contrôler leurs actions. C'est, en partie, l'approche que nous privilégierons dans notre étude, où le planétarium numérique sera présenté comme un simulateur de vol sophistiqué permettant d'explorer un environnement astronomique tridimensionnel très réaliste.

Ultimement, le but d'une simulation est de permettre à l'utilisateur de découvrir par lui-même les règles qui sous-tendent le système étudié, ce qui en fait des « outils pour penser » (*Mindtools*, voir Jonassen, Peck & Wilson, 1999) très efficaces d'un point de vue constructiviste :

« An educational simulation should not be the reproduction of a system given to students to digest, but rather given to them so that by exploration and manipulation they can “discover” the system's behavior. » (Winer & Vázquez-Abad, 1981, p. 115)

Les simulations présentent de nombreux avantages en éducation, permettant, entre autres, l'exploration du comportement d'un système donné (souvent dangereux, très dispendieux ou inaccessible) et la vérification d'hypothèses et de théories émises par l'apprenant :

« [...] interactive simulations are particularly useful because they enable users to explore and visualize the consequences of their reasoning. They take less effort to set up, are less dangerous and give instant feedback in the form of dynamic graphic or numerical representations of how variables are interrelated. » (Bakas & Mikropoulos, 2003, p. 952)

L'approche de l'apprentissage par la simulation change également profondément la notion d'erreur, non plus perçue comme une faute à punir (Astolfi, Peterfalvi & Vérin, 2001), mais plutôt comme une occasion d'apprendre quelque chose de nouveau à propos

d'un système donné ou à propos des conceptions d'un apprenant : « *Errors actually become a rich source of information, without which a correct solution could not be found.* » (Rieber, 2004, p. 587)

Dans l'esprit de Gil-Perez & Carrascosa-Alis (1994), la simulation est une étape importante dans l'introduction du débat scientifique au sein de l'environnement d'apprentissage. Les simulations permettent aux apprenants d'explorer à fond un système donné, de l'interroger de diverses manières et, finalement, d'en comprendre le fonctionnement. C'est pourquoi nous croyons que de tels outils pour penser doivent être au centre de tout environnement d'apprentissage constructiviste.

Winer & Vázquez-Abad (1981) remarquent toutefois que l'on retrouve trop souvent dans les simulations des représentations sur-simplifiées de situations réelles ou un niveau d'interactivité et de manipulations trop restreint. Les modèles sont alors limités parce qu'ils sont construits avec un nombre restreint de règles trop déterminantes.

« Most simulations use models which are very limited, mainly because they are built with a very restricted set of deterministic rules about the system's elements and operation. As a consequence, the student that uses such a simulation is limited to a narrow range of interaction. Thus exploration and manipulation, and therefore the "discovery" value, are severely constrained. » (Winer & Vázquez-Abad, 1981, p. 116)

De telles simulations éducatives simplifiées ne reproduisent plus la complexité des situations réelles ni ne permettent de réelles interactions entre l'étudiant et le système. Gredler (2004) remarque les mêmes limitations concernant ce que certains auteurs appellent des simulations, mais qui lui apparaissent plutôt comme de simples exercices, dû au fait que l'élève y est mis en présence de problèmes très restreints qui n'ont rien à voir avec les situations complexes que l'on rencontre dans le monde réel.

Dans le cas d'une simulation plus complexe, il existe toutefois un risque de provoquer une surcharge cognitive chez l'apprenant. Dans ce cas, la simulation peut être

conçue de telle manière à lui fournir une représentation du problème qui attire inévitablement son attention sur un aspect particulier de la situation ou sur une relation particulière entre deux variables dans le système étudié (Rieber, 2004). On trouve ici une première mention de l'idée d'échafaudage et de guidage dont l'importance dans un environnement d'apprentissage constructiviste sera soulignée à la section 2.4.3.

Nous verrons dans la section suivante des exemples où la réalité virtuelle a été utilisée pour simuler des environnements virtuels en astronomie et proposer des problèmes complexes à résoudre par les utilisateurs. Nous présenterons d'abord ces études et analyserons ensuite les résultats de ces recherches sur les apprentissages des utilisateurs.

2.4.2 Simulations en astronomie dans des environnements de réalité virtuelle : exemples récents

Youngblutt (1998) a recensé dans son mémoire une quarantaine d'études ayant porté sur les vertus éducatives de la réalité virtuelle dans divers domaines, qu'il s'agisse de la biologie, l'écologie ou la physique, lorsque les élèves étaient amenés à utiliser de tels environnements virtuels dans le cadre de simulations. Il n'entre pas dans les objectifs du présent exposé de refaire une telle recension; nous nous concentrerons plutôt sur quelques études récentes qui ont porté sur des apprentissages en astronomie dans des environnements virtuels plus ou moins immersifs et où les apprenants devaient utiliser des simulations. Les conclusions de ces études jetteront un éclairage très intéressant sur l'utilisation possible du planétarium numérique comme environnement de réalité virtuelle favorisant l'apprentissage en astronomie par le biais de simulations réalistes et immersives.

2.4.2.1 La sphéricité de la Terre

Une équipe de l'Université de l'Illinois à Chicago a conçu des environnements virtuels tridimensionnels et interactifs originaux pour enseigner le concept de la forme sphérique de la Terre à des élèves d'âge scolaire primaire (Johnson, Moher, Ohlsson & Gillingham, 1999; Ohlsson, Moher et Johnson, 2000). Pour faciliter l'apprentissage des

élèves, les chercheurs leur ont proposé un détour conceptuel via un environnement virtuel très différent de la Terre, soit la surface d'un astéroïde d'environ 300 mètres de diamètre.

Les chercheurs ont utilisé un système de réalité virtuelle *ImmersaDesk* dans lequel ils ont présenté un environnement virtuel baptisé *Asteroid World*. Cet environnement recrée l'impression de marcher sur un astéroïde de 300 mètres de diamètre où la courbure du sol est évidente. Au même moment, un autre environnement virtuel, synchronisé au premier et baptisé *Mission Control*, permet d'observer l'astéroïde de même qu'un avatar de l'astronaute marchant à sa surface, le tout depuis un point situé en orbite autour de l'astéroïde. Ce dernier environnement virtuel, de type « fenêtre-sur-le-monde », utilise un écran d'ordinateur de même que des lunettes stéréoscopiques permettant de percevoir l'astéroïde comme un objet tridimensionnel flottant sur un fond d'étoiles. Le passage d'un environnement virtuel à un autre, et donc le changement de point de vue, permet à l'utilisateur de se familiariser avec un environnement courbé (et les nombreuses conséquences que cela implique au niveau de la définition du haut et du bas, de la disparition des objets au-delà de l'horizon, etc.) sans qu'aucun *a priori* conceptuel ne vienne nuire à la construction du concept de surface courbe. La présentation technique au début de l'expérience attirait l'attention des élèves sur les caractéristiques d'un environnement aussi petit qu'un astéroïde, où l'on peut marcher droit devant soi et revenir rapidement à son point de départ et où l'on peut être debout et apparaître « la tête en bas » à un observateur extérieur (salle de contrôle).

Environ 50 élèves de 2^e année de la région de Chicago ont participé à l'étude. Après s'être familiarisés avec l'équipement, les élèves ont participé par groupes de deux à un jeu qui consistait à récupérer des bidons de carburant pour leur vaisseau spatial échoué sur l'astéroïde, l'élève de *Mission Control* guidant vers les réservoirs l'autre élève marchant à la surface. Chaque élève a rempli les deux fonctions à tour de rôle. Une fois le jeu terminé, chaque élève était pris à part pour réfléchir à son expérience à l'aide d'un modèle réduit de l'astéroïde, d'une figurine et d'un globe terrestre. Le but de cette séance de débriefing était

de favoriser l'appropriation de nouvelles connaissances acquises sur l'astéroïde et leur transfert au cas de la Terre.

La méthodologie de recherche consistait en un pré-test suivi d'un post-test 24 heures après l'expérience et d'un autre post-test quatre mois plus tard. Un groupe de contrôle a été interrogé sans vivre l'expérience pour mesurer le degré d'habituation provoqué par le questionnaire lui-même. Les résultats ont montré un réel apprentissage de la notion de Terre sphérique, supérieur chez le groupe traitement par rapport au groupe contrôle.

Le but recherché par les concepteurs de cette étude étant de faire prendre conscience aux utilisateurs de la sphéricité de la Terre, le passage par le monde de l'astéroïde était un détour conceptuel. Il semble toutefois que ce détour ait été utile, puisque les élèves ont effectivement été plus nombreux à construire une notion de la Terre sphérique après l'intervention. Il est cependant difficile de départager l'impact sur les apprentissages de l'activité de débriefing par rapport à la séance dans l'environnement virtuel; il aurait été souhaitable d'effectuer une mesure immédiatement après la séance dans l'environnement virtuel, puis après le débriefing, pour mieux évaluer l'impact de chaque activité sur l'apprentissage des utilisateurs.

Quoi qu'il en soit, les élèves qui ont vécu cette expérience ont vraiment eu accès à un monde inaccessible mais néanmoins crédible où ils ont dû réaliser une activité importante à leurs yeux, soit la recherche de carburant pour réalimenter leur vaisseau. La combinaison du sentiment de présence (surtout pour l'apprenant marchant sur l'astéroïde), de l'interactivité et de la communication entre les participants en a fait une expérience significative pour les élèves. Malgré le fait que le problème à résoudre était relativement simple, l'activité était tout de même plus qu'un simple exercice. Il nous apparaît que ce type d'utilisation d'un environnement virtuel dans le cadre d'une simulation interactive est un très bon exemple de ce que l'on peut attendre de cette technologie pour la conception d'environnements d'apprentissage constructivistes.

2.4.2.2 Prise en compte des conceptions d'élèves pour favoriser la compréhension de phénomènes planétaires

Bakas & Mikropoulos (2003) rapportent une étude qui a impliqué plus de cent étudiants du secondaire âgés de 11 à 13 ans en Grèce. Les auteurs ont d'abord interrogé les étudiants pour révéler leurs conceptions à propos de phénomènes planétaires étudiés, comme les mouvements du Soleil, de la Terre et de la Lune, leurs tailles relatives et la distance qui les sépare, le cycle diurne et le phénomène des saisons.

Les auteurs relèvent un grand nombre de conceptions à propos de ces phénomènes, la plupart déjà constatées par d'autres auteurs avant eux. Dans une perspective résolument constructiviste, les auteurs ont ensuite conçu un environnement virtuel tridimensionnel interactif du système solaire que les étudiants ont pu explorer. Cet environnement permettait de simuler les mouvements planétaires et de varier les points de vue de l'observateur par le biais d'un vaisseau spatial virtuel piloté par les étudiants. Les auteurs poursuivaient l'objectif suivant :

« [The goal is] to provide students with environments which give them the opportunities to experience cognitive conflict and to reject possible misunderstandings and misinterpretations engendered by them. » (Bakas & Mikropoulos, 2003, p. 960)

Les auteurs rapportent une nette amélioration des réponses des étudiants à un test à choix multiple administré avant et après qu'ils aient visité le système solaire virtuel. En particulier, les étudiants ont globalement invoqué un moins grand nombre de conceptions après qu'avant, et ces conceptions étaient beaucoup plus concrètes et scientifiquement justes. Ceci semble valider l'approche des chercheurs qui consistait à créer des conflits cognitifs et ensuite fournir la bonne explication, une approche qui n'est pas sans rappeler celle préconisée par Posner, Strike, Hewson & Gertzog (1982) :

« It appears that curricula and instruction that aim at replacing entrenched beliefs with a different explanatory framework must first create conditions for the students to question their entrenched beliefs. This can be done by putting students in situations where they have to evaluate empirical evidence that is contrary to their beliefs. Second, it is necessary to provide a clear explanation of scientific concepts and phenomena, preferably in the form of conceptual models or analogies. » (Bakas & Mikropoulos, 2003, p. 959)

Les auteurs rappellent à quel point l'utilisation d'environnements virtuels est efficace dans les cas où les phénomènes ou les objets avec lesquels l'on désire que les apprenants interagissent sont impossibles à observer autrement. Ils soulignent d'autre part un point important en ce qui concerne l'accompagnement dont ont besoin les apprenants :

« Technologies have to be applied in a pedagogic framework, so that the educational software involves certain didactic goals, integrated educational scenarios, metaphors with pedagogical meaning, and induces learning outcomes. » (Bakas & Mikropoulos, 2003, p. 965)

En particulier, les auteurs notent que, dans le contexte de leur système solaire virtuel, une navigation guidée par une certaine forme de scénario était préférable à la libre navigation des étudiants laissés à eux-mêmes. Il s'agit d'un bon exemple de ce que nous mentionnions à la fin de la section précédente concernant la nécessité de prévoir un encadrement pour les utilisateurs de ce type d'environnement d'apprentissage constructiviste. Nous verrons à nouveau cette préoccupation apparaître dans la quatrième et dernière étude que nous avons consulté, présentée à la section suivante.

2.4.2.3 Voyage imaginaire dans le système solaire

Yair, Schur & Mintz (2003), Gazit, Chen & Yair (2004) et Gazit, Yair & Chen (2005) présentent le concept du « voyage imaginaire » (*thinking journey*) comme moyen de provoquer des changements conceptuels et de point de vue chez les utilisateurs d'une simulation tridimensionnelle du système solaire, tout en évitant l'apparition de conceptions erronées. Les chercheurs sont en effet d'avis que la surcharge cognitive imposée aux utilisateurs de tels environnements virtuels est telle qu'elle peut favoriser la construction

par l'apprenant de visions erronées de phénomènes à l'étude (voir aussi Harper, Squires & McDougall, 2000). Ils proposent divers moyens pour remédier à cette surcharge, dont le voyage imaginaire, qui n'est rien de plus qu'une séquence éducative (un scénario) conçue avec soin et permettant à l'utilisateur de faire des découvertes et construire ses connaissances dans un ordre logique et raisonné.

Les chercheurs ont proposé à des élèves du secondaire d'interagir avec un environnement virtuel 3D non immersif très réaliste basé sur de vraies images des planètes (le *Virtual Solar System* décrit par Yair, Schur & Mintz (2003)). Les auteurs reconnaissent la complexité de l'étude des relations dynamiques dans le système solaire et croient que l'utilisation d'une simulation tridimensionnelle interactive peut favoriser l'évolution des conceptions des utilisateurs :

« The solar system is a highly complex abstract scientific concept. Its dynamic nature, vast spatial dimensions and different time scales cannot be perceived directly by the senses. In order to understand the basic astronomical concepts such as the day-night cycle, seasonal changes, moon's phases and eclipses, one must visualize the relative motions and positions of the planetary objects in 3D space, as these may appear from different perspectives simultaneously. » (Gazit, Yair & Chen, 2005, p. 459)

Les auteurs ont effectivement mesuré une forte évolution des conceptions des utilisateurs, mais ils ont également remarqué que certaines conceptions n'évoluaient pas dans le sens souhaité ou encore se transformaient pour donner naissance à ces conceptions hybrides très différentes de celles attendues. Ils en arrivent à la conclusion que :

« [...] a high interactive performance by students might not be sufficient for the development of scientific conceptual understanding. [...] alternative dynamic misconceptions regarding the basic astronomical phenomena might result from at least five different reasons:

- 1. Cognitive difficulty in coordinating visual information emanating from different frames of references;*
- 2. Misinterpreting salient features of the [Virtual Solar System]'s visual representation;*

3. *Ignoring the 3D nature of the Moon's relative motion, together with an incorrect perception of the relative sizes and distances of the Moon and the Earth;*
4. *The inability to mentally shift away from the Earth's frame of reference, and*
5. *The student's pre-knowledge regarding the basic astronomical concepts.* » (Gazit, Yair & Chen, 2005, p. 467-468)

Face à de tels résultats, les auteurs sont d'avis qu'il faut accompagner les élèves dans leur exploration et prévoir au minimum une séquence qui met en ordre les concepts à l'étude afin de graduer le niveau de difficulté et servir de guide pour l'exploration.

« This new kind of learning should [...] be accompanied by suitable scaffolding and guided reflection. Indeed, one may infer that the emergence of misconceptions is a direct consequence of the lack of such mentoring. A well-thought-out interaction with a teacher or a built-in smart agent could reduce or prevent them. [...] Thus, it is recommended that the design of virtual environments should include orientation and navigation tools in order to empower learners' perceptual and cognitive system. » (Gazit, Yair & Chen, 2005, p. 468)

Nous développerons davantage cette idée d'échafaudage et d'accompagnement des apprenants dans un environnement virtuel dans la section 2.4.3. D'ici là, nous présentons à la section suivante un dernier exemple d'une recherche à propos des phases de la Lune, privilégiant cette fois l'observation de phénomènes astronomiques depuis plusieurs points de vue différents.

2.4.2.4 Un modèle tridimensionnel du trio Terre-Lune-Soleil pour l'enseignement de des phases de la Lune au primaire

Sun, Lin & Wang (2010) ont conçu eux-mêmes un modèle tridimensionnel du système Terre-Lune-Soleil dans un environnement de réalité virtuelle de type « fenêtre-sur-le-monde » permettant à des élèves taiwanais de 4^e année (10-11 ans) d'explorer, entre autres, le mécanisme des phases de la Lune. Au total, 128 élèves ont participé à l'étude. La moitié d'entre eux ont étudié les phases de la Lune selon l'approche traditionnelle (observation de la Lune pendant quelques semaines, étude d'images bidimensionnelles dans

le manuel scolaire, enseignement magistral), tandis que l'autre moitié complétait ses propres observations de la Lune par des sessions au cours desquelles ils utilisaient un ordinateur pour explorer l'environnement virtuel.

Un questionnaire comprenant des questions à choix multiple et des questions de type « vrai ou faux » a été soumis aux élèves avant, puis après les sessions d'étude. La comparaison des réponses aux pré- et post-tests a montré une progression des apprentissages nettement supérieure du côté des élèves du groupe expérimental (exploration du modèle 3D) par rapport à ceux ayant étudié de manière traditionnelle. De plus, les élèves du groupe expérimental ont répondu à un questionnaire d'appréciation de leur expérience dans l'environnement 3D, ce qui a permis aux chercheurs de montrer à quel point l'utilisation de l'ordinateur et du logiciel de réalité virtuelle a constitué une importante source de motivation, les élèves allant jusqu'à souhaiter que leurs amis puissent vivre une expérience similaire.

L'originalité de cette étude repose sur un aspect en particulier qui a attiré notre attention. Ainsi, l'environnement de réalité virtuelle a été conçu de telle manière à offrir trois points de vue distincts aux utilisateurs : le point de vue géocentrique, semblable à celui que l'on a depuis la surface de la Terre et avec lequel les élèves étaient déjà familiers, du fait, entre autres, de leur observation quotidienne des phases de la Lune; le point de vue d'un satellite en orbite autour de la Terre; et enfin, le point de vue d'un vaisseau spatial qui serait libre de se déplacer en tout point de l'espace à l'intérieur de l'environnement simulé.

La métaphore du vaisseau spatial est, à notre avis, particulièrement puissante : dans le contexte d'un planétarium numérique où la salle devient le vaisseau surmonté d'un vaste hublot (le dôme de projection) « à travers » lequel l'espace nous apparaît, une telle métaphore est susceptible de convaincre les spectateurs que ce qu'ils voient est la réalité, ou du moins une représentation très fidèle de la réalité, et non pas simplement une hypothétique vue de l'esprit, renforçant considérablement la valeur du modèle scientifique

qui leur est ainsi proposé. De plus, la possibilité de passer d'une représentation à l'autre, du point de vue géocentrique à celui du satellite ou du vaisseau spatial, est aussi un outil puissant à mettre entre les mains des apprenants, un outil susceptible à notre avis de les aider à se créer un modèle mental robuste leur permettant d'expliquer les changements quotidiens qu'ils observent dans l'aspect de la Lune vue de la Terre.

2.4.3 Réalité virtuelle, environnements d'apprentissage constructivistes et échafaudage

Comment résoudre le dilemme que créent les besoins d'accompagnement des utilisateurs d'un environnement d'apprentissage constructiviste qui se veut le plus ouvert et non directif possible ? Dans le contexte des micromondes¹², Rieber (2004) note les mêmes besoins d'accompagnement des utilisateurs que ceux évoqués dans les exemples de recherches décrites précédemment. Il souligne en particulier le fait que les représentations, les analogies et les métaphores que proposent les micromondes aux apprenants doivent être conçus avec soin. Il souligne :

« [...] as with the use of any analogy, if the users do not correctly understand the mapping structure of the analogy, then the benefits will be lost and the students may potentially form misconceptions. [...] Just providing a microworld to students, without the pedagogical underpinning, should not be expected to lead to learning. » (Rieber, 2004, p. 598)

On atteint ici la limite des environnements d'apprentissage constructivistes conçus comme des environnements complètement ouverts où l'apprenant est libre de choisir les

¹² Selon Hogle (1995, p. 4) : *« Microworlds are interactive learning environments [...]. Basically, a microworld is a conceptual model of some aspect of the real world. It is usually an idealized and simplified environment, based in a computer or other medium, in which learners (usually children) explore or manipulate the logic, rules, or relationships of the modeled concept, as determined by the designer. A microworld is a cognitive tool. »* On retrouve ici les caractéristiques propres aux simulations que nous évoquions plus tôt.

sujets qui l'intéressent et d'interagir avec les objets et les phénomènes de l'environnement de façon plus ou moins aléatoire, selon ses propres conceptions, les questions qu'il se pose et la compréhension qu'il a de la tâche à accomplir. Comme on l'a déjà noté, ce type d'approche est fortement susceptible de faire apparaître de nouvelles conceptions hybrides qui demeurent loin des conceptions acceptées par les spécialistes et visées par l'enseignement.

Sans retomber dans une approche complètement dirigiste sous la seule responsabilité de l'enseignant ou du concepteur de l'environnement d'apprentissage, nous croyons pouvoir adopter une position mitoyenne qui met les apprenants en contact avec une simulation riche et complexe mais, en même temps, guide leur exploration de cet environnement grâce à des séquences éducatives (scénarios) conçues comme des échafaudages leur permettant de construire des savoirs plus précis. La grande flexibilité des environnements de réalité virtuelle offre une solution immédiate à cette difficulté :

« Because the world can be changed to meet individual users' needs, [virtual reality] is well designed to accommodate instructional scaffolding and to serve as a medium for apprenticeships. » (Schunk, 2004, p. 279)

Cette aide à l'apprentissage doit cependant venir alors que l'apprenant est immergé au sein de la simulation, comme le signale Rieber (2004) :

« [...] information or instructional support needs to come while students are involved in the simulation, rather than prior to their working with the simulation. [...] The research also shows that embedding guided activities within the simulation, such as exercises, questions and even games, helps students to learn from the simulation. » (Rieber, 2004, p. 599)

Cette remarque est également soutenue par Gredler (2004) qui rapporte que des élèves ayant utilisé un logiciel de simulation en biologie baptisé *Tidepools* ont avoué avoir trouvé l'apprentissage plus facile lorsque du personnel compétent était disponible en cours d'utilisation de la simulation pour discuter sur-le-champ des interrogations qui naissaient de leurs expérimentations.

Il reste enfin à réconcilier une approche où la finalité de l'enseignement est dictée de l'extérieur (p. ex. : savoirs essentiels et concepts prescrits du Programme de formation de l'école québécoise) tandis que la construction personnelle et immédiate de savoirs par les apprenants dans une perspective constructiviste demande un certain degré de liberté. À propos de ce dilemme particulier et la façon dont les simulations peuvent aider à le solutionner, Rieber (2004) écrit :

« Though all [microworlds] are defined as exploratory learning environments, all are also goal-oriented to some extent. This implies that microworlds offer a way to bridge the gap between the objectivism of instructional design methods and constructivist notions of learning. In other words, because the boundaries of a microworld are designed with certain constraints that lead and help learners to focus on a relatively narrow set of concepts and principles, microworlds complement any instructional system that requires the use of and accounting for predetermined instructional objectives. » (Rieber, 2004, p. 601)

Cela revient à dire que, pour atteindre les objectifs déterminés par un programme scolaire quelconque, la conception de simulations permet de placer les apprenants dans un environnement d'apprentissage constructiviste tout en leur fournissant l'échafaudage, le guidage, les balises, les analogies et les métaphores qui les dirigeront dans la construction de leurs nouvelles connaissances, en lien direct avec le contenu du programme scolaire.

Dans le cas d'un planétarium numérique, il vaut mieux les guider de manière serrée, attirer leur attention sur les phénomènes les plus révélateurs et échafauder un scénario qui les accompagne dans leur réflexion et la remise en question de leurs conceptions. Cette approche, similaire à celle présentée dans les travaux de Yair, Schur & Mintz (2003), Gazit, Chen & Yair (2004), Gazit, Yair & Chen (2005) et d'autres (voir par exemple Bell & Trundle, 2008 et Trundle & Bell, 2010), pourrait mettre à profit l'immersion d'un théâtre de planétarium numérique et l'échafaudage dont on tant besoin les apprenants. C'est précisément cette approche que nous privilégions dans le cadre de notre propre travail

Ceci nous amène à proposer une forme de contrat didactique (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel & Toussaint, 1997) très particulier qui fait que les élèves demandent

qu'on leur montre ce qu'il faut voir au milieu de la surcharge visuelle que représente une visite au planétarium, et qui impose à l'animateur/concepteur de guider les apprenants à travers le scénario de la séance, scénario imposé aux uns et aux autres par les exigences du programme de formation scolaire. On retrouve ici un concept proposé par Johsua & Dupin (1989), celui de la « monstration », développé d'abord dans le contexte de l'enseignement de la physique :

« La présentation d'une expérience sert [...] à montrer de quoi il s'agit, en présentant en même temps le (ou les) phénomène(s) pertinent(s) à prendre en compte, le cadre (dépouillé et simplifié) où il(s) se manifeste(nt), les éléments les plus saillants qui feront l'objet d'une mise en forme. C'est le mécanisme général que nous appelons "la monstration". "L'expérience" soumise à la réflexion de la classe est une construction didactique fort complexe et sur laquelle s'exercent des contraintes multiples si l'on veut qu'elle joue son rôle dans la proposition d'un problème. » (Johsua & Dupin, 1989, p. 20)

Les auteurs poursuivent en ajoutant que la « monstration » doit être une manifestation du problème que les élèves vont devoir résoudre, ce qui implique que ses traits principaux doivent être familiers aux apprenants. Dans le cas contraire, la monstration risque fort de rater sa cible et de ne pas permettre aux élèves de repérer et d'isoler la nouveauté qui, justement, sera le corps du problème. Mais d'un autre côté, la monstration ne peut se contenter de simplement faire ressortir des traits familiers ou perçus comme tels par les élèves, ceux-ci risquant alors de ne pas repérer la nature du problème à étudier. Enfin, la monstration n'est pas une fin en soi; elle doit servir à dégager les aspects les plus saillants des phénomènes présentés. C'est pourquoi elle doit demeurer simple et établir une bonne correspondance avec les aspects des phénomènes jugés importants, ceux à propos desquels les apprenants vont ultérieurement utiliser une simulation.

2.4.4 Conclusion

Il a été question dans ce chapitre d'une approche susceptible de provoquer des apprentissages intentionnels et durables chez les apprenants dans un contexte d'enseignement des sciences et, plus particulièrement, de l'astronomie : la simulation à l'intérieur d'environnements d'apprentissage constructivistes. Nous avons proposé qu'une telle situation d'apprentissage permette une véritable construction de savoirs par les utilisateurs de simulations éducatives, comme lorsqu'ils ou elles interagissent avec le monde physique qui les entoure au quotidien.

D'un point de vue éducatif, les simulations permettent ultimement aux apprenants de découvrir par eux-mêmes les règles de fonctionnement qui sous-tendent le système étudié, ce qui en fait des outils pour penser très efficaces, du point de vue constructiviste. L'apprenant peut ainsi interagir et explorer des représentations de systèmes coûteux ou dangereux, vérifier des hypothèses et des théories, commettre des erreurs sans conséquence, débattre de ses conclusions avec d'autres dans une véritable co-construction des savoirs et affronter la complexité d'un système donné à l'intérieur d'un environnement balisé et sécuritaire.

L'utilisation de simulations à l'intérieur d'un environnement virtuel réaliste, comme un théâtre de planétarium numérique, offre en outre la possibilité aux apprenants de multiplier les points de vue sur divers phénomènes astronomiques (la « saillance visuelle » dont parlent Shen & Confrey (2007) à propos des modèles physiques) pour ainsi construire une vision réaliste des systèmes et mécanismes astronomiques à l'œuvre derrière leurs manifestations sensibles. Nous avons présenté en appui à cette idée quatre exemples de situations d'apprentissage en astronomie qui ont prouvé leur valeur dans le cadre de recherches menées récemment et qui se rapprochent beaucoup de ce que nous comptons faire dans notre propre recherche.

La principale leçon que nous retenons de ces études est le besoin d'accompagnement que ressentent les utilisateurs de simulations lorsqu'ils sont plongés au

cœur de leur travail de construction de savoirs. Les auteurs consultés insistent tous sur la nécessité de prévoir plusieurs formes d'échafaudage au sein de la simulation, par le biais de diverses balises, aides en temps réel (par un accompagnateur humain ou un tutoriel), l'utilisation de métaphores et d'analogies, etc.

Pour éviter la surcharge cognitive qui pourrait bloquer ou ralentir le processus d'apprentissage, il paraît également approprié de concevoir les situations d'apprentissage de telle sorte que l'attention des apprenants est forcément attirée par quelques éléments saillants du système à l'étude, afin de centrer leur réflexion et la remise en question de leurs conceptions sur des éléments précis, fondamentaux. Il y a donc lieu de prévoir une nécessaire scénarisation de la simulation, une forme de monstration qui définit un contrat didactique particulier entre le concepteur de l'apprentissage, l'accompagnateur et les apprenants.

2.5 Conclusion et questions de recherche

Nous voici parvenus à la fin de ce chapitre qui était consacré à la présentation détaillée des assises théoriques sur lesquelles nous construirons notre intervention didactique à propos des phases de la Lune, présentée et évaluée sous la voûte d'un planétarium numérique auprès d'enfants de 12 à 14 ans (élèves du premier cycle du secondaire).

Le cadre conceptuel de notre thèse repose sur quatre champs d'expertise distincts, mais complémentaires : la recherche en éducation menée dans les planétariums depuis 1970; les différentes théories du changement conceptuel qui irriguent la didactique des sciences depuis 1980; la conception d'environnements d'apprentissage constructivistes et la réalité virtuelle en éducation; et l'utilisation de simulations astronomiques réalistes dans un environnement immersif. Nous avons tiré de chacun de ces champs de recherche des conclusions utiles à notre propre travail et qui seront mises à profit dans l'élaboration de notre intervention didactique, telle qu'elle sera décrite au chapitre 4 de la présente thèse.

Cette intervention didactique cherchera à répondre aux questions de recherche présentées ci-dessous. Ces dernières découlent directement des questions de recherche générales que nous présentions dans le chapitre 1 du présent document, raffinées et davantage circonscrites à la lumière, d'une part, des faits détaillés dans le cadre théorique et, d'autre part, du thème particulier que nous avons décidé d'aborder dans le scénario didactique, c'est-à-dire les phases de la Lune. Ce seront ces nouvelles questions de recherche, et non pas celles présentées dans le cadre de notre problématique, qui feront l'objet d'une opérationnalisation complète dans le cadre de la portion déductive de notre travail (voir chapitre suivant Méthodologie). Ces questions de recherche se présentent comme suit :

1. Quelles sont les principales conceptions des apprenants à propos des phases de la Lune avant l'intervention didactique ?
2. De quelle manière les conceptions des apprenants à propos des phases de la Lune ont-elles évolué pendant l'intervention didactique et après ?
3. Quels aspects de l'intervention didactique ont été les plus appréciés par les apprenants ? Les moins appréciés ?

4. Quelles améliorations peut-on apporter à la simulation, à la lumière des résultats de sa première mise en application et des présupposés théoriques qui la sous-tendent ?

3.0 Méthodologie

« *To a man with a hammer, everything looks like a nail.* »
Mark Twain (1835-1910)

L'objectif de la présente recherche étant de développer et tester une intervention éducative dans un planétarium numérique basée sur les principes théoriques exposés au chapitre deux, nous avons cherché une approche méthodologique qui nous permettrait d'atteindre un tel but. En particulier, nous désirions que le processus de développement de l'intervention éducative soit basé sur un apport théorique solide, mais évolutif et perfectible, et que l'intervention et la théorie puissent évoluer de concert, informées par de multiples itérations (séquences de mise en œuvre, test et retour sur l'intervention et la théorie sous-jacente). Il nous est alors apparu que la recherche de développement (Van der Maren, 1996) ou recherche développement (Harvey & Loiselle, 2009), connue en anglais sous les termes *Design Experiment* ou *Design Science* (Gorard, Roberts & Taylor, 2004), *Design-Based Research* (Design-Based Research Collective, 2003) ou encore *Design Studies* (Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003) et proche de l'ingénierie didactique (Artigue, 1996) constituait la meilleure approche disponible pour atteindre les buts que nous nous étions fixés.

Il sera donc principalement question dans ce chapitre de la recherche de développement. Puisque la recherche de développement articule deux approches complémentaires, l'une, déductive, s'appuyant sur une recension des écrits pour élaborer les bases théoriques de l'intervention éducative et l'autre, inductive, basée sur les résultats de la mise à l'essai de l'intervention en milieu « naturel », une section du présent chapitre sera consacrée à la méthodologie déductive (comment le corpus théorique présenté dans le cadre conceptuel a été rassemblé et analysé) et une seconde à la méthodologie inductive (comment l'intervention didactique que nous développerons plus loin dans la présente thèse sera évaluée *in situ*). C'est la combinaison de ces deux approches méthodologiques qui, dans le cadre d'une recherche de développement, permet d'atteindre l'objectif de recherche visé : développer une intervention éducative efficace dans un contexte naturel tout en

faisant évoluer la théorie sur laquelle cette intervention s'appuie, afin d'informer autant la théorie que la pratique éducative, plus particulièrement dans le milieu des planétariums numériques.

3.1 La recherche de développement

On note depuis longtemps une difficulté, dans le domaine de l'éducation, à concilier la recherche menée en laboratoire et le travail mené en classe ou dans des milieux informels d'éducation (musées, planétariums, etc.). En particulier, il semble toujours périlleux de transposer les résultats de la recherche en laboratoire dans les milieux éducatifs « réels », tant la recherche en laboratoire n'arrive pas à tenir compte de la très grande complexité des milieux naturels de l'éducation. C'est ce que Robinson (1998) appelle le « *research-practice gap* » :

« The research-practice gap arises when theories of researchers do not articulate with theories of practitioners. The gap persists because without an adequate account of practice we do not know the methodological resources that are required to forge such an articulation. » (Robinson, 1998, p. 25)

Pour tenter de jeter un pont entre le laboratoire et les milieux naturels de l'éducation, de plus en plus de chercheurs se tournent vers la recherche de développement (Gorard, Roberts & Taylor, 2004), particulièrement la recherche dite collaborative (Van der Maren, 1996) impliquant chercheurs et praticiens de l'éducation – ou un même individu qui porte les deux chapeaux à la fois, comme dans le cas de la présente recherche. L'idée de mener une recherche de développement n'est pas nouvelle, trouvant sa source, entre autres, dans les domaines du génie et du design pour produire et améliorer des objets techniques ou des processus. Ce qui est relativement nouveau, c'est l'adoption de cette méthode de recherche par un nombre croissant de chercheurs dans le domaine de l'éducation. Aux États-Unis, le *National Research Council* en discute abondamment dans un rapport datant de 2002 et abordant la question des méthodes de recherche scientifiques appliquées au domaine de l'éducation (NRC, 2002). Kelly, Lesh & Baek (2008) ont publié récemment un manuel complet consacré à la recherche de développement et qui présente de nombreux

exemples d'application de cette méthode en enseignement et en éducation. La vaste étude menée par Taasoobshirazi, Zuiker, Anderson & Hickey (2006) pour évaluer l'impact éducatif de l'*Astronomy Village*, un programme informatique éducatif en astronomie dont la conception a été financée par la NASA, constitue un bel exemple de recherche de développement appliquée à l'enseignement de l'astronomie.

3.1.1 Définition

Qu'est-ce que la recherche de développement ? Pour Van der Maren (1996), il s'agit d'une forme de recherche appliquée au développement d'objet qui

« [...] vise la solution de problèmes formulés à partir de la pratique quotidienne en utilisant diverses théories élaborées par la recherche nomothétique. Dans ce cas, la recherche appliquée est efficace dans la mesure où elle apporte des solutions aux problèmes et, pour y arriver, les théories auxquelles on recourt ne font que servir la recherche de solutions. Cette démarche intéresse le champ de la didactique et c'est le domaine, avec la technologie de l'éducation, où l'on rencontre surtout ce type de recherche. » (Van der Maren, 1996, p. 179).

La recherche de développement apparaît déjà comme une approche tournée vers la pratique et l'obtention de résultats concrets, mais basée sur des fondations théoriques solides. Shavelson, Phillips, Towne & Feuer (2003) nous en donnent une autre définition, sous la forme d'une description de ses principaux attributs (itérative, procédurale, interventionniste, collaborative, holistique, utilitaire et théorique) :

« Design Studies are iterative in that they involve tightly linked design-analysis-redesign cycles that move toward both learning and activity or artifact improvement. They are process focused in that they seek to trace both an individual's (or group's or school system's) learning by understanding successive patterns in the reasoning and thinking displayed and the impact of instructional artifacts on that reasoning and learning. They are interventionist in testing theory and instructional artifacts by designing and modifying real-world settings. They are collaborative in that they depend on the knowledge and co-work of practitioners. They are often

multileveled in that they link classroom practices to events or structures in the school, district, and community. They are utility oriented with the intent of improving the effectiveness of instructional tools to support learning. And they are theory driven in the sense of testing (“placing them in harm’s way”) and advancing theory through the design-analysis-redesign of instructional activities and artifacts. » (Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003, p. 26)

Gorard, Roberts & Taylor (2004), quant à eux, décrivent la recherche de développement en établissant une distinction claire entre elle et la recherche « traditionnelle » en éducation :

« Traditionally, in order to determine what strategies are effective in education, educational processes have been subjected to experiments based on made-up situations in laboratory conditions, which isolate the topic from its context, and which rest on the assumption that there is a clear theoretical basis for addressing questions related to the processes being tested. Within a design science approach, on the other hand, currently accepted theory is used to develop an educational artefact or intervention that is tested, modified, retested and redesigned in both the laboratory and the classroom, until a version is developed that both achieves the educational aims required for the classroom context, and allows reflection on the educational processes involved in attaining those aims. » (Gorard, Roberts & Taylor, 2004, p. 579)

Pour Harvey & Loiselle (2009), enfin, la recherche de développement est

« l’analyse systématique du processus de développement de l’objet (matériel pédagogique, stratégies, modèles, programmes) incluant la conception, la réalisation et les mises à l’essai de l’objet, en tenant compte des données recueillies à chacune des phases de la démarche de recherche et du corpus scientifique existant. » (Harvey & Loiselle, 2009, p. 96)

En d’autres mots, l’approche par recherche de développement permet d’étudier le processus d’enseignement et d’apprentissage, le plus souvent dans son contexte propre, tout en créant et en développant de manière systématique des interventions éducatives pratiques et efficaces et en améliorant les théories qui sous-tendent ces interventions. Comme l’a montré Brown (1992) à propos de l’étude des stratégies utilisées par des élèves dans un contexte d’enseignement réciproque (*reciprocal teaching*), l’expérience de développement

permet, à partir de présupposés théoriques plus ou moins bien circonscrits, de développer une stratégie d'intervention en contexte d'enseignement, de l'évaluer, puis d'utiliser ces résultats pour raffiner la théorie qui, à son tour, permettra une révision de la stratégie d'intervention, qui sera à nouveau testée en contexte d'enseignement et réévaluée dans un processus itératif (les membres du Design-Based Research Collective (2003) parlent d'*informing cycles*). Cette démarche devra ultimement mener à un design optimal pour l'intervention éducative, à une meilleure compréhension théorique des processus éducatifs en jeu et à de nouvelles questions de recherche qui feront avancer le travail des chercheurs.

Il existe beaucoup de similitudes entre la recherche de développement et l'ingénierie didactique qui, « vue comme méthodologie de recherche, se caractérise en premier lieu par un schéma expérimental basé sur des “réalisations didactiques” en classe, c'est-à-dire sur la conception, la réalisation, l'observation et l'analyse de séquences d'enseignement » (Artigue, 1996, p. 247). Comme la recherche de développement, l'ingénierie didactique préconise elle aussi de débiter par une analyse préalable (épistémologie des contenus, conceptions des élèves, contraintes du milieu et objectifs de la recherche), suivie d'une phase de conception et d'analyse *a priori* de l'intervention didactique (intervention basée sur des hypothèses issues de la théorie et qui devra être validée par la recherche). Viennent ensuite les phases d'expérimentation, d'analyse *a posteriori* et de validation.

Recherche de développement et ingénierie didactique se ressemblent donc beaucoup, à la différence près que, contrairement à la recherche de développement qui suggère de trianguler des mesures qualitatives et quantitatives (voir section 3.1.3), le paradigme méthodologique de l'ingénierie didactique « se situe, à l'opposé, dans le registre des études de cas et dont la validation est essentiellement interne, fondée sur la confrontation entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori*. » (Artigue 1996, p. 248) Nous reviendrons sur cet aspect méthodologique de l'ingénierie didactique à la section 3.3.

La figure 3 propose une représentation graphique d'une recherche de développement typique, de la première étape consistant à analyser les besoins du domaine éducatif auxquels le chercheur souhaite répondre, jusqu'à la dissémination des résultats de la recherche, tant dans les milieux de la recherche scientifique (versant théorique) que ceux de la pratique éducative.

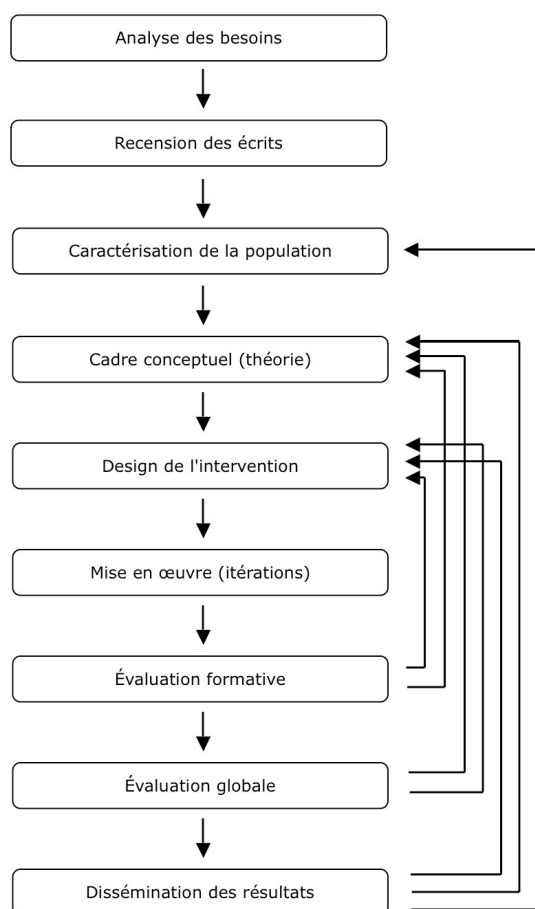


Figure 3 : Processus type de la recherche de développement (d'après Brown (1992), Van der Maren (1996), Bannan-Ritland (2003), Gorard, Roberts & Taylor (2004) et Harvey & Loiselle (2009)).

Van der Maren (1996) signale que l'approche de recherche de développement est particulièrement bien adaptée au travail collaboratif qui réunit chercheurs et praticiens de l'enseignement, approche « privilégiée en didactique, [où l'on] préconise que l'analyse de l'objet et sa préparation s'effectuent en collaboration avec les enseignants, de manière à tenir compte immédiatement de leurs contraintes et de leurs priorités. » (p. 181) Cela signifie, comme le signalait Brown (1992), que « la construction du prototype et ses mises à l'essai s'effectuent non plus en situation expérimentale contrôlée, mais directement en contexte scolaire. » (Van der Maren, 1996, p. 181) Les contraintes, les résistances, mais aussi les possibilités du milieu transforment alors « un modèle idéal en production réaliste. » (Van der Maren, 1996, p. 181)

Cobb, Confrey, diSessa, Lehrer & Schauble (2003) et les membres du Design-Based Research Collective (2003) identifient cinq principales caractéristiques de la recherche de développement qui nous guideront dans notre étude. D'abord, le but de la recherche de développement est de développer une classe de théories « hybrides » concernant à la fois le processus d'apprentissage (théorie) et les moyens pratiques mis en œuvre pour soutenir et favoriser ces apprentissages. Bien que, d'un point de vue pratique, une recherche de développement soit généralement conduite dans un nombre restreint d'environnements d'apprentissage (parfois un seul, comme ce sera le cas dans le présent travail), l'importance accordée au développement de la théorie sous-jacente indique bien la volonté d'appliquer les résultats de la recherche à une classe plus vaste de situations éducatives.

Un second aspect de la recherche de développement est la nature fortement interventionniste de la méthode. Une recherche de développement est généralement un banc d'essai servant à tester et raffiner diverses innovations en éducation. Par conséquent, le chercheur intervient continuellement pour modifier l'écologie éducative du milieu où il agit et supporter la forme particulière d'apprentissage visée par l'intervention, ce qui lui donne bien entendu un grand contrôle sur le processus éducatif et favorise l'émergence de facteurs inédits qui bonifieront l'intervention et feront progresser l'apprentissage.

Troisièmement, la recherche de développement crée des conditions propices pour développer des théories en éducation, mais à conditions de continuelles remises en question de ces mêmes théories (« *placing them in harm's way* », dans les mots de Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003, p. 26). Cela donne à la recherche de développement un aspect double, prospectif et réflexif (nous parlions en introduction de processus déductif et inductif). Prospectif, puisque les interventions mises en place sont basées sur des hypothèses spécifiques (théorie) concernant les apprentissages et les moyens mis en œuvre pour les favoriser, dans le but de mettre à jour les détails du processus éducatif. Un autre objectif tout aussi important est de favoriser l'émergence de nouveaux facteurs inédits propices à l'apprentissage qui pourraient apparaître au cours du processus d'intervention. Réflexif, ensuite, parce que les expériences de développement sont basées sur des propositions concrètes plus ou moins précises à propos de la meilleure façon de susciter et supporter certains apprentissages spécifiques. Au cours de l'expérience, d'autres propositions plus précises pourront apparaître qui seront testées à leur tour, rejetées ou intégrées à l'intervention selon le résultat de ces tests.

Quatrièmement, la recherche de développement est itérative. Ceci découle directement de la place centrale qu'occupent les propositions initiales et émergentes dans le processus de découverte : ces propositions doivent être testées, elles modifient l'intervention, ce qui amène un nouveau test, etc. Il s'agit clairement d'un design fait de boucles d'« essai d'implantation, évaluation, adaptations et modifications » (Van der Maren, 1996, p. 181). Cela exige bien entendu une attention particulière à la façon de mesurer les apprentissages (l'opérationnalisation des questions de recherche, sur laquelle nous reviendrons plus loin) qui évalue et oriente le processus itératif. De plus, à la fin de chaque cycle, un cadre explicatif devrait émerger qui spécifie les centres d'intérêt du cycle suivant.

Finalement, les théories développées dans le cadre d'une recherche de développement sont redevables au processus d'intervention lui-même (la pratique) et s'appliquent donc au domaine spécifique étudié. Mais la théorie sous-jacente doit permettre

une véritable organisation des processus éducatifs dans des environnements de pratique et des domaines de connaissance similaires à celui étudié. De ce fait, ces théories se situent à mi-chemin entre les grande théories éducatives (comme le constructivisme, par exemple) et les théories qui ne s'appliqueraient que dans un seul contexte très précis. Ce sont des théories « pratiques », en quelque sorte, et qui sont d'application immédiate.

3.1.2 Avantages et inconvénients de la recherche de développement

Les principales conséquences de l'application de la recherche de développement dans le domaine de l'éducation concernent la prise en compte plus importante du contexte où se déroule l'enseignement, le caractère itératif et interventionniste de la recherche et l'acceptation d'un certain flou entourant les fondements théoriques de toute intervention éducative. Cela se traduit, de façon pratique, par un certain nombre d'avantages, mais aussi d'inconvénients que nous détaillerons ci-dessous.

Du côté des avantages, Gorard, Roberts & Taylor (2004) notent que la recherche de développement permet de situer le processus d'enseignement et d'apprentissage dans le riche contexte où ces processus ont normalement lieu (la salle de classe, le musée de science, le planétarium, etc.). D'autre part, elle permet de créer et de raffiner des interventions didactiques, même lorsque les bases théoriques sur lesquelles se fondent ces interventions sont mal définies ou peu développées. Le processus itératif sur laquelle elle s'appuie offre en outre la possibilité d'améliorer une intervention qui, dans le contexte d'une autre approche méthodologique plus « traditionnelle », aurait peut-être été simplement rejetée en raison de son apparente inefficacité. Mieux encore, la recherche de développement permet de découvrir en quoi l'intervention était inefficace, jetant un nouvel éclairage sur la théorie et la pratique qui la sous-tendent. Enfin, la recherche de développement s'accommode parfaitement de tous types de données (tests quantitatifs et qualitatifs, entrevues, observations, cahier de bord, etc.) qui permettent, par triangulation, d'en arriver à un design optimal pour l'intervention à l'étude.

Du côté des inconvénients, Shavelson, Phillips, Towne & Feuer (2003) reprochent à la recherche de développement de fournir des résultats moins « nets » que les approches traditionnelles, parce qu'elle mesure plusieurs variables dépendantes à la fois; parce qu'elle est fortement influencée par le contexte particulier de la situation; parce qu'elle révisé ses processus à volonté (itérations); parce qu'elle permet aux participants d'interagir et les implique même dans le design de l'intervention; sans compter la difficulté de collecter et combiner de grandes quantités de données de types différents et de se baser sur ces données pour en tirer des conclusions rigoureuses et fiables. Gorard, Roberts & Taylor (2003) signalent également la difficulté pour le chercheur de déterminer à quel moment il convient de passer d'une étape de la recherche à l'autre et à quel moment terminer les différentes itérations de l'intervention éducative.

Les membres du Design-Based Research Collective (2003) ajoutent que la recherche de développement soulève des questions au niveau de l'objectivité, la fiabilité et la validité de la recherche. En ce qui concerne l'objectivité de la recherche, les chercheurs qui utilisent une approche par recherche de développement se font souvent juges et parties. Il s'agit sans doute d'une tension nécessaire (Brown, 1992), due aux liens étroits qui existent entre le design de l'intervention, son application en contexte naturel et son évaluation par les mêmes personnes, qui travaillent à partir de certains présupposés et postures théoriques.

D'autre part, lors d'une intervention éducative dans une situation complexe en milieu naturel, où des dizaines de décisions doivent être prises sur-le-champ par divers intervenants, il est difficile, sinon impossible, d'attribuer sans ambiguïté les résultats mesurés à un ou des facteurs en particulier, ce qui peut remettre en question la fiabilité et la validité de la recherche. En d'autres termes, la relation causale entre théorie, intervention et résultats demeure le plus souvent floue, impossible à reproduire de façon exacte (même dans un contexte similaire) et soumise aux aléas de propriétés émergentes de l'interaction dynamique entre théorie, intervention et contexte, propriétés qui peuvent apparaître à tout

moment au cours de la recherche et mener à des voies d'exploration inédites, sans parler d'une possible remise en question de la théorie sous-jacente.

La recherche de développement n'est donc pas une méthode parfaite, puisqu'elle suppose de nombreux compromis entre le désir de concevoir une intervention qui « fonctionne » en contexte d'enseignement et celui de développer une approche généralisable globalement :

« There is a trade-off [...] between the refinement of a particular innovation to maximize its success, and the generalization of findings from an ultimately highly refined enactment. The challenge for design-based research is in flexibly developing research trajectories that meet [the] dual goals of refining locally valuable innovations and developing more globally usable knowledge for the field. » (The Design-Based Research Collective, 2003, p. 7)

Cela exige certainement de relativiser la valeur que l'on accorde à ce type de recherche et de mettre davantage de l'avant son aspect concret, à savoir l'amélioration de la pratique éducative qu'elle promet :

« We suggest that the value of design-based research should be measured by its ability to improve educational practice. » (The Design-Based Research Collective, 2003, p. 8)

3.1.3 Recherche de développement et triangulation des données

Nous avons indiqué à la section précédente quels étaient les principaux inconvénients liés à l'utilisation d'une recherche de développement en éducation. Ces inconvénients ont trait, principalement, à la difficulté de combiner des données issues de mesures différentes (qualitatives et quantitatives), à des questions concernant l'objectivité, la fiabilité et la validité de la recherche, de même qu'au choix des critères guidant les décisions du chercheur (quand, quoi et comment évaluer, quand cesser les itérations, etc.). Nous verrons dans cette section que la triangulation des données, des chercheurs et des

méthodes, de même que l'opérationnalisation différenciée des questions de recherche d'une itération à l'autre, offrent des solutions pratiques aux problèmes posés par cette méthode de recherche.

3.1.3.1 Triangulation des données, des chercheurs et des méthodes

Il existe au sein de la communauté des chercheurs en éducation un vaste débat concernant l'utilisation des méthodes qualitatives et quantitatives et la possibilité ou non de les combiner au sein d'une même recherche (De Ketele & Maroy, 2006). Rappelons qu'on définit l'approche quantitative en recherche comme l'ensemble des méthodes (le plus souvent statistiques) qui permettent d'inférer certaines caractéristiques d'une population donnée à partir d'observations recueillies auprès d'un échantillon représentatif de cette population (Howell, 1998). L'approche qualitative est, au contraire, peu intéressée par les inférences statistiques et cherche plutôt à décrire et expliquer le plus précisément possible et en détail les phénomènes à l'étude (Van der Maren, 1996; Poupart, Deslauriers, Groulx, Laperrière, Mayer & Pires, 1997).

Les différences épistémologiques entre méthodes quantitatives et qualitatives font dire à plusieurs auteurs que ces deux approches sont incommensurables tant elles divergent à propos de ce qu'elles considèrent comme des savoirs valides. Mais Bryman (1992) préfère une position plus pragmatique qui consiste à dire que les deux méthodes jouissent d'une liberté certaine vis-à-vis de leurs bases épistémologiques et constituent par conséquent des approches distinctes mais tout aussi valides l'une que l'autre pour l'étude des phénomènes sociaux :

« [...] the two approaches to research can have and do have an independence from their epistemological beginnings. As general approaches to social research, each has its own strengths and weaknesses as an approach to the conduct of social research. It is these strengths and weaknesses that lie behind the rationale for integrating them. » (Bryman, 1992, p. 59)

Les différences entre approches quantitatives et qualitatives sont importantes, mais elles sont surtout complémentaires et offrent par le fait même au chercheur un outil d'investigation au potentiel énorme par le biais de la triangulation, un concept que l'on doit à Denzin (1970) et issu des travaux sur l'approche « multiméthodes » et « multimesures » dont les pionniers furent Campbell & Fiske (1959) (Krathwohl, 1993). Le concept de triangulation est directement emprunté aux sciences géodésiques : pour faire le point, un arpenteur aura recours à plusieurs visées prises d'angles différents, ce qui lui permettra de calculer sa position avec précision (Berg, 2001). Appliquée à la recherche en sciences humaines et sociales, cette approche commande l'opérationnalisation multiple des concepts (Jones, 2000) par le biais de plusieurs méthodes de recueil des données, par plusieurs chercheurs, recueillant divers types de données. Denzin (1978) résume ainsi les nombreux types de triangulation possibles en recherche :

« (1) Data triangulation has three subtypes: (a) time, (b) space, and (c) person. Person analysis, in turn, has three levels: (a) aggregate, (b) interactive, and (c) collectivity. (2) Investigator triangulation consists of using multiple rather than single observers of the same object. (3) Theory triangulation consists of using multiple rather than single perspectives in relation to the same set of objects. (4) Methodological triangulation can entail within-method triangulation and between-method triangulation. »
(Denzin, 1978, p. 295)

La triangulation des données, qui augmente la variété des observations recueillies dans un contexte particulier, est l'approche la plus courante pour valider la véracité des faits (Krathwohl, 1993). On peut par exemple comparer des résultats d'observation avec des données plus anciennes dans le cadre d'études longitudinales, ou encore comparer des données issues de différentes cultures (Eid & Diener, 2006). On peut également comparer les réponses verbales et le comportement non verbal d'un répondant. La triangulation des données peut ainsi être particulièrement utile lorsqu'il s'agit de découvrir le sens caché d'une situation qui diffère fortement de ce qui est exprimé d'autre part.

La triangulation des chercheurs implique de recueillir les perceptions de chercheurs différents à propos du même phénomène (Mathison, 1988), par exemple en demandant à deux chercheurs d'observer simultanément une leçon donnée par un enseignant pour ensuite comparer leurs notes, afin de mettre en évidence les similitudes et les différences dans leurs observations. Un autre exemple courant consiste à demander à deux ou plusieurs chercheurs de coter un même texte pour mesurer ensuite l'accord inter-juges.

La triangulation des méthodes, enfin, utilise diverses méthodes de mesure pour évaluer le même aspect d'un phénomène (par exemple, en comparant les résultats qualitatifs d'entrevues avec les réponses quantitatives à un questionnaire), ou encore utilise la même méthode à plusieurs reprises à des moments et dans des contextes différents (Brannen, 1992).

Comme nous le verrons dans la section suivante, la triangulation des données, des chercheurs et des méthodes offre une solution au problème de l'objectivité, la fiabilité et la validité d'une recherche de développement.

3.1.3.2 Objectivité, fiabilité et validité de la recherche de développement

De nombreuses questions se posent quant à l'objectivité, la fiabilité et la validité d'une recherche de développement, en particulier en ce qui a trait à l'analyse rétrospective du compte-rendu de la recherche (données qualitatives) (Cobb, Confrey, diSessa, Lehrer & Schauble, 2003). En effet, à cause de son immersion dans un contexte naturel riche et complexe et des nombreuses itérations qui sont à la base de son approche, une recherche de développement suscitera généralement l'enregistrement sur le long terme de l'évolution du processus de design de l'intervention, par le biais d'enregistrements audio et vidéo, de diverses traces matérielles ou écrites, d'entrevues et de questionnaires. Ces nombreuses données qualitatives donneront ensuite lieu à une analyse rétrospective de la part du ou des chercheurs. Le véritable défi sera alors de mener cette analyse sur une vaste quantité de données de nature disparate pour en tirer des conclusions objectives et rigoureuses, fondées

empiriquement et pouvant se prêter à une réplique dans un autre contexte ou avec des acteurs différents.

Pour relever ce défi, la théorie sous-jacente à l'intervention sera d'un grand secours au chercheur pour lui permettre de montrer comment son étude est un cas paradigmatique du phénomène étudié, assurant par là même sa validité (en d'autres termes, comment les conclusions de la recherche sont en relation avec le monde réel, voir Maxwell, 1999). La validité d'une expérience de développement découlera également de la participation de nombreux intervenants (chercheur, enseignants, praticiens, etc.) et des nombreuses itérations qui sont typiques de cette approche et qui, à la longue, aligneront la théorie, le design, l'intervention elle-même et la mesure de ses effets (Design-Based Research Collective, 2003).

La triangulation des données (qualitatives et quantitatives), des méthodes et des chercheurs sont aussi des moyens efficaces, si non parfaits, pour assurer un minimum d'objectivité dans la recherche et l'analyse des résultats (Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003). Dans un tel contexte, la fiabilité des résultats peut encore une fois être assurée par la triangulation de données issues de diverses sources, par la répétition des mesures d'un cycle de mise à l'essai à l'autre et l'utilisation d'instruments de mesure standardisés (par exemple, un questionnaire).

La triangulation des chercheurs, dans le cadre d'une recherche d'envergure, permet également d'éviter que le chercheur ne retienne dans les données qualitatives que ce qui va dans le sens de sa théorie, un biais noté par Brown (1992) :

« [...] there is a tendency to romanticize research of this nature and rest claims of success on a few engaging anecdotes or particularly exciting transcripts. One of the major methodological problems is to establish means of conveying not only the selective and not necessarily representative, but also the more important general, reliable, and repeatable. » (Brown, 1992, p. 173)

Brown (1992) propose même, pour diminuer les biais, de demander aux sujets de l'étude de noter les interactions qu'ils ont eux-mêmes trouvés significatives (ce qu'elle appelle les *golden moments*). Shavelson, Phillips, Towne & Feuer (2003) proposent enfin de juger du caractère raisonnable et plausible d'un compte-rendu de recherche (ce qu'ils appellent le *narrative*) par le biais d'une forme d'accord inter-juges :

« *To the extent that the narrative evokes script and scene schema similarly among those well steeped in the phenomena under study, the narrative is claimed to be reasonable, credible, and generalizable.* » (Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003, p. 27)

3.1.3.3 Opérationnalisation des questions de recherche

La question de savoir quoi mesurer, quand, comment, et à quel moment cesser les itérations dans le cadre d'une recherche de développement se résout par la considération de la ou des questions de recherche qui émergent et évoluent en cours de processus (Shavelson, Phillips, Towne & Feuer, 2003; Gorard, Roberts & Taylor, 2004). Il est clair que, dans une recherche de développement, la ou les questions de recherche initiales seront en tout ou en partie modifiées par le processus itératif qui précisera la centration et la portée de l'intervention. Par conséquent, ce sont les questions de recherche qui dicteront, aux diverses étapes de la recherche, les mesures à employer. En d'autres termes, l'opérationnalisation de la recherche aux diverses étapes suivra l'évolution des questions de recherche. La fin de la recherche, quant à elle, dépendra des retombées attendues et mesurables de l'intervention, retombées que le chercheur aura établi dès le départ (phase de design initial) et qui, une fois atteintes, empêcheront un processus sans fin — « *a 'trawl' that will eventually find something* » (Gorard, Roberts & Taylor, 2004, p. 585) — où l'objectif évoluerait avec le travail de recherche.

Ainsi, selon Shavelson, Phillips, Towne & Feuer (2003), la ou les questions de recherche étant généralement plus ouvertes en début de processus, les premières phases exploratoires d'une recherche de développement devraient faire appel à des méthodes majoritairement qualitatives cherchant à décrire ce qui se passe lors de l'intervention

(enregistrement vidéo, étude de cas, étude ethnographique, entrevues, recueil de traces, etc.) afin de créer un compte-rendu détaillé de l'évolution des premières étapes de l'intervention. On retrouve ici l'approche préconisée par l'ingénierie didactique, centrée sur la description qualitative du processus didactique et menant à l'évaluation de l'intervention par la comparaison des analyses *a priori* et *a posteriori* (Artigue, 1996).

Cette exploration préliminaire pourra mener ensuite à une description plus systématique de l'intervention, ce qui fera évoluer les questions de recherche vers des expressions mieux formulées et plus précises se prêtant davantage à une vérification quantitative. Il sera alors possible d'établir d'éventuelles relations de covariance au sein de l'intervention, ce qui sous-entend l'utilisation de groupes aléatoires (traitement et contrôle, lorsque cela est possible) et d'un contrôle plus strict des variables en jeu (traitements expérimental ou quasi-expérimental).

En ce qui nous concerne, dans le cadre restreint du présent travail, puisque notre question de recherche de départ est assez vaste et s'opérationnalisera par le biais d'une approche plus descriptive (qualitative), nous appliquerons l'approche méthodologique de l'ingénierie didactique en ne testant qu'une seule itération de notre intervention didactique et en privilégiant la collecte de données internes et externes qualitatives, comme nous le décrirons plus en détails à la section 3.3.

3.2 Approche déductive de la recherche de développement

Parce qu'elle se fonde sur des présupposés théoriques qui modulent l'intervention didactique et évoluent au gré des itérations, la recherche de développement repose, sur son versant déductif, sur une vaste recension des écrits qui permet d'établir la validité théorique de l'intervention éducative qui est au cœur de la recherche. Dans cette section, nous décrirons la façon dont nous avons sélectionné et analysé les divers textes qui forment le

corpus dont nous avons rendu compte dans le chapitre deux présentant le cadre conceptuel de notre recherche.

3.2.1 Constitution du corpus

Les nombreuses études que nous avons consulté portant sur la recherche en éducation dans les planétariums, les théories du changement conceptuel, la réalité virtuelle, les environnements d'apprentissage constructivistes et la simulation en éducation ont été répertoriées grâce à une multitude de sources documentaires et en faisant appel à diverses techniques de recherche.

D'abord, en ce qui concerne la recherche en éducation dans les planétariums, un certain nombre d'études parmi les plus importantes associées au milieu des planétariums et à l'enseignement de l'astronomie en milieu informel nous ont été révélées par le biais d'une recherche dans la base de données *Current Content* et ses sites associés, tels ERIC, *Academic Search Complete*, *UMI ProQuest Digital Dissertations*, etc. Les mots clés utilisés étaient *astronomy*, *teaching*, *education*, *planetarium*, *planetaria*, *research*, et diverses combinaisons de ces mots. Le champ de recherche en éducation dans les planétariums étant très majoritairement étasunien, nous nous sommes contentés d'utiliser des termes anglais pour constituer cette première phase de notre corpus. Une recherche par mots clés en français a en effet donné peu de résultats, ce qui n'est pas surprenant compte tenu des banques interrogées.

Quelques articles, qui étaient eux-mêmes des recensions d'articles, mémoires et thèses parus à différentes époques entre 1970 et aujourd'hui, nous ont aussi été particulièrement utiles en signalant les articles et thèses importants couvrant ce domaine d'étude : Powers (1973), Wall (1973), King (1974), Reed (1974), Smith (1974b), Sunal (1976), Riordan (1991), Brunello (1992), Albanese, Danhoni-Neves & Vincentini (1997), Marché (1999; 2001), Adams & Slater (2000), Bailey & Slater (2003), Bailey, Prather & Slater (2004), Schroeder (2004), Brazell & Espinoza (2009) et Lelliott & Rollnick (2010).

Nous avons également consulté l'index annuel du magazine *The Planetarian* (aujourd'hui *Planetarian*) de 1970 à aujourd'hui, de même que les comptes rendus des congrès bisannuels de l'*International Planetarium Society*, notant et consultant tous les articles qui abordaient notre sujet d'étude. Ces deux sources sont particulièrement intéressantes puisqu'elles regroupent l'ensemble des praticiens du monde des planétariums à travers la planète.

Cette première recension complétée, nous nous sommes attardé aux bibliographies des articles ainsi identifiés, ce qui nous a mené, via une cascade rétrograde (Van der Maren, 1996) à une seconde série d'articles, thèses et mémoires qui sont venus compléter notre recension. Au total, nous avons ainsi identifié plus d'une centaine d'articles, mémoires et thèses portant sur les phénomènes éducatifs dans les planétariums, ce qui en fait, à notre connaissance, la plus vaste recension dans ce domaine, autant en langue anglaise qu'en français.

Nous avons procédé de manière similaire pour aborder les autres domaines de recherche sur lesquels s'appuie notre cadre conceptuel. Parmi les sources principales à l'origine de notre recension des écrits, citons la thèse de Potvin (2002), le mémoire de Bêty (2009) et l'ouvrage de Vosniadou (2008) pour tout ce qui concerne les modèles du changement conceptuel, l'article de Youngblut (1998) à propos de l'utilisation de la réalité virtuelle en éducation et l'ouvrage de Jonassen (2004) à propos des environnements d'apprentissage constructivistes et de la simulation en éducation. Dans tous les cas, ces sources principales ont été complétées, d'abord par une recherche par mots clés dans les bases de données déjà citées, puis par le biais d'une cascade rétrograde. Nous reconnaissons également l'apport inestimable des Pr Marcel Thouin et Jesús Vázquez-Abad, du Département de didactique de l'Université de Montréal, et du Pr Patrice Potvin, du Département d'éducation et pédagogie de l'Université du Québec à Montréal, qui nous ont signalé des pistes très fructueuses pour compléter notre recension des sources documentaires.

La constitution et l'analyse du contenu d'un tel corpus n'échappe bien sûr pas aux biais du chercheur, issus de sa propre subjectivité (Landry, 2006). La subjectivité peut en effet jouer lors de la constitution du corpus, de la sélection et la catégorisation des unités d'analyse. En ce qui concerne la constitution du corpus, dont nous parlions précédemment, nous nous sommes assurés que notre échantillon soit représentatif en atteignant la saturation des données. Les nombreux documents consultés nous ont permis de trianguler les sources documentaires, une autre façon de minimiser les biais (Karsenti & Savoie-Zajc, 2004). Nous nous sommes également efforcés de consulter des articles ou autres documents qui jetaient un regard critique sur les thèmes que nous abordions, afin de trianguler les perspectives théoriques et méthodologiques, plus particulièrement en ce qui concerne la recherche en éducation dans les planétariums, les modèles du changement conceptuel et l'utilisation de la réalité virtuelle en éducation.

Enfin, vu le nombre élevé de documents recensés, nous nous sommes livrés à une stratification temporelle (Legendre, 2005), ne retenant que les articles les plus récents (1990 et au-delà) en ce qui concerne l'utilisation de la réalité virtuelle, les environnements d'apprentissage constructivistes et la simulation en éducation, les articles datant de 1980 et plus pour les théories du changement conceptuel (rappelons que l'article phare de Posner et al. a été publié en 1982), et les articles, thèses et mémoires datant de 1970 et plus pour ce qui concerne la recherche en éducation dans les planétariums. Dans ce dernier cas, il nous est apparu à la lecture des documents publiés avant 1970 qu'ils n'apportaient rien de particulièrement utile à notre étude, se contentant la plupart du temps de décrire la réalité des grands planétariums (surtout étasuniens) sans analyse critique ou véritable recherche sur les phénomènes éducatifs.

3.2.2 Analyse de contenu

En ce qui concerne l'analyse du contenu des textes sélectionnés dans le cadre de notre étude, nous avons retenu l'approche itérative préconisée par Legendre (2005) :

-
- A. Identification du problème;
 - B. Énoncé des objectifs;
 - C. Constitution du corpus;
 - D. Définition des catégories d'analyse;
 - E. Choix des unités d'analyse;
 - F. Repérage :
 - a. Lecture globale;
 - b. Lecture analytique;
 - c. Relation catégorie - unité d'analyse;
 - G. Classification des éléments d'analyse dans une base de données.

Les deux premières étapes de l'analyse ont été abordées dans le chapitre portant sur la problématique. Quant à la troisième étape, la constitution du corpus, nous l'avons décrite dans la section précédente.

La définition des catégories d'analyse (« sous-ensemble regroupant sans hiérarchie des segments d'information semblables en fonction d'un ou de quelques caractères communs », Legendre, 2005, p. 191) correspond aux mots clés (descripteurs) qui ont été utilisés pour coder les données, issues de la lecture des différentes sources retenues. Les mots clés utilisés découlent bien entendu de la problématique et du vocabulaire propre à chaque champ d'étude que nous invoquons dans le cadre conceptuel. Une liste de départ a été établie pour chaque domaine notionnel et cette liste s'est enrichie en cours d'analyse, certains mots clés disparaissant vu leur peu d'utilité, tandis que d'autres apparaissaient pour refléter un aspect imprévu de notre recherche.

En tant qu'unité d'analyse (« segment d'information qui se rapporte à une catégorie », Legendre, 2005, p. 1425), nous avons retenu les idées principales de chaque texte, considérées comme porteuses d'un concept clé ou d'une idée importante pour la poursuite de notre thèse, et qui avaient un lien avec les mots clés déjà identifiés ou qui suggéraient un mot clé inédit. Avec ces outils en main, nous avons ensuite entrepris le repérage, effectuant une première lecture globale afin de bien saisir l'esprit et les idées maîtresses de chaque texte, avant d'en faire une seconde lecture plus analytique, identifiant

les idées principales et secondaires. Dans un troisième temps, ces idées principales et secondaires ont été associées formellement avec un descripteur issu de notre liste de mots clés.

Nous avons ensuite utilisé le logiciel de traitement de textes Word© pour classer les éléments d'analyse. Chaque élément retenu d'un texte (référence bibliographique, citation, résumé de paragraphe ou de section, tableau ou figure, etc.) était ainsi noté ou retranscrit, précédé du ou des mots clés correspondants. Un tel document nous a permis de rassembler en un même fichier tout ce qui concernait la recherche en éducation dans les planétariums, tout ce qui touchait les théories du changement conceptuel dans un autre, etc. De cette manière, par un processus d'entonnoir, nous avons été en mesure de filtrer et concentrer les idées et concepts utiles en un seul document (par domaine conceptuel) qui nous a ensuite servi de base de recherche et de brouillon pour la rédaction des différentes sections du cadre conceptuel. C'est à cette dernière étape que s'est faite la véritable synthèse qui nous a permis d'en arriver à une proposition originale et pluri argumentée, telle que décrite dans le cadre conceptuel.

3.3 Approche inductive de la recherche de développement

Nous présentions à la section précédente le versant déductif de la recherche de développement, c'est-à-dire la constitution des bases théoriques qui mèneront à l'élaboration d'une intervention éducative. Selon les principes de la recherche de développement, cette intervention devra ensuite être testée dans un milieu éducatif naturel, afin d'en valider l'efficacité et découvrir quels ajustements devront être faits à l'intervention et à la théorie sous-jacente afin d'en améliorer l'efficacité, intervention et théorie qui seront à nouveau testées lors d'une itération subséquente. La méthode utilisée pour tester l'intervention sera à chaque fois dictée par la ou les questions de recherche qu'elle opérationnalisera.

Il n'entre toutefois pas dans le cadre du présent travail, qui demeure une recherche exploratoire dans le domaine encore très nouveau du lien didactique-planétarium, d'aller jusqu'au bout du processus d'évaluation de la recherche de développement dans son ensemble, incluant de multiples itérations et la triangulation des données, des chercheurs et des méthodes. Étant donnée l'ampleur habituelle des démarches de recherche associées à une thèse de doctorat, nous nous limiterons plutôt à l'évaluation d'une seule itération de notre intervention didactique dans un planétarium numérique, en nous inspirant de l'approche méthodologique de recueil de données préconisée par Artigue (1996) dans le cadre de l'ingénierie didactique, approche...

« [...] qui s'appuie sur l'ensemble des données recueillies lors de l'expérimentation : observations réalisées [lors] des séances d'enseignement mais aussi productions des élèves en classe ou hors classe. Ces données sont souvent complétées par des données obtenues par l'utilisation de méthodologies externes : questionnaires, entretiens individuels ou en petits groupes, réalisés à divers moments de l'enseignement ou à son issue. »
(Artigue, 1996, p. 262-263)

L'opérationnalisation de cette approche de recueil de données se fera de multiples façons. Tout d'abord, en ce qui concerne les observations réalisées lors de l'intervention didactique (données internes, Artigue (1996)), la totalité des interventions sous la voûte du planétarium, celles de l'animateur mais aussi les réactions des apprenants, leurs commentaires et leurs questions, seront enregistrées (sans seulement) par le biais d'une enregistreuse numérique. Nous nous inspirons en cela d'exemples tirés de la recherche en éducation muséale, où l'on recueille les réactions des visiteurs en cours de visite (Émond, 2005). L'approche très interactive que nous préconisons sous la voûte du planétarium (discussions de groupe, utilisation de modèles réduits, approche kinesthésique, dessins et croquis, etc.) produira également de nombreuses traces qui pourront enrichir l'analyse de l'intervention.

Outre le recueil de données en cours d'intervention, Artigue (1996) préconise également le recueil de données externes issues de questionnaires et d'entrevues avec les

participants. Pour ce faire, nous nous inspirerons des travaux de Treagust (1988), qui préconise le développement d'outils diagnostiques à la fois quantitatifs et qualitatifs, basés sur les contenus notionnels à l'étude et les conceptions des apprenants (questions à choix multiples avec distracteurs) et cherchant à leur faire expliciter qualitativement les raisons et les motivations derrière leurs choix de réponses (questions à développement).

Ainsi, nous avons développé un questionnaire en cinq parties, comprenant majoritairement des questions à développement avec quelques questions à choix multiples, explorant les conceptions des élèves à propos des phases de la Lune et des divers contenus notionnels dont la maîtrise est nécessaire pour comprendre le mécanisme des phases (visibilité de la Lune de jour et de nuit, taille relative de la Terre, de la Lune et du Soleil, distances relatives dans le système solaire, etc.). Les choix de réponses ont été élaborés en tenant compte des conceptions les plus fréquentes exprimées par des élèves de ce groupe d'âge et servent ici comme éléments distracteurs (Treagust, 1988). Le lecteur trouvera ces questionnaires à l'annexe 3. Les questionnaires ont été remplis par les participants une première fois avant le traitement, puis immédiatement après (notons que les questionnaires pré- et post-traitements étaient rigoureusement identiques).

Nous avons également mené des entrevues de groupe avec les participants avant puis après l'intervention didactique sous la voûte du planétarium numérique. En pré-entrevue, nous leur avons demandé de collaborer pour remettre en ordre une série de photographies plastifiées des principales phases de la Lune, puis leur avons remis des balles de différentes tailles en leur demandant d'illustrer les principaux mouvements de la Lune et de la Terre dans l'espace. En post-entrevue, suite à la séance sous la voûte du planétarium, nous leur avons demandé de produire des commentaires et de donner leurs impressions à propos de notre intervention didactique, puis leur avons demandé de nous dire dans leurs mots de quelle manière ils expliqueraient à leurs parents comment se succèdent les phases de la Lune et comment on explique ce phénomène.

Étant donné que nous travaillerons avec un petit nombre d'élèves, compte tenu de la taille réduite du dôme de planétarium auquel nous aurons accès dans le cadre de notre étude

(six mètres de diamètre), il n'est pas utile de soumettre les réponses des élèves au questionnaire à un test statistique, notre échantillon étant trop restreint. Le lecteur trouvera à l'annexe 3 une description de la manière dont le questionnaire a été élaboré et validé. Le recueil des interactions pré- et post-traitement, de même que les conversations sous la voûte du planétarium numérique et les réponses au questionnaire, seront retranscrits et analysés à l'aide de logiciels d'aide à l'analyse de données qualitatives, comme Atlas-ti ou N'Vivo. Pour chaque participant, les données issues de l'observation de l'intervention, les réponses aux questions de même que les résultats des entrevues de groupe seront croisées afin d'approfondir la compréhension du phénomène d'apprentissage, mettre en évidence des évolutions conceptuelles ou des difficultés particulières et assurer un minimum de validité à la recherche. L'analyse sera par la suite revue par un second chercheur (en l'occurrence, le Pr Marcel Thouin, qui dirige la présente étude) afin d'assurer l'objectivité des conclusions auxquelles l'auteur sera parvenu.

3.4 Conclusion

Nous avons exposé dans les pages précédentes les raisons qui nous ont incité à choisir la recherche de développement comme méthode de recherche pour la conception et l'évaluation de l'intervention didactique qui fait l'objet de la présente thèse. En particulier, il nous paraît très prudent de faire porter le développement d'une telle intervention didactique à la fois sur un volet théorique fort, mais perfectible, et sur un volet expérimental « en contexte » qui permet de faire évoluer la pratique et la théorie par le biais de multiples itérations. Nous avons tout de même prévu de ne mener qu'une seule itération et de ne recueillir que des données qualitatives (internes et externes), puisque notre travail demeure une exploration des liens nouveaux qui se tissent entre la didactique des sciences et le monde des planétariums.

Maintenant que le cadre conceptuel de notre thèse a été exposé (chapitre 2), que la méthode qui a mené à sa constitution et son analyse a été décrite et que nous avons annoncé

de quelle manière nous allons recueillir et analyser les données issues de la mise en place de notre intervention didactique sous la voûte d'un planétarium numérique portatif (chapitre 3), il nous reste à décrire le scénario de cette intervention, qui a été mise à l'épreuve auprès d'élèves du premier cycle du secondaire (12 à 14 ans) à qui nous avons tenté d'expliquer le mécanisme des phases de la Lune. Ce sera l'objet du chapitre 4 de la présente thèse.

4.0 Analyse et discussion

« Il n'y a qu'une façon d'apprendre, répondit l'Alchimiste. C'est par l'action. »
(Paul Coelho, L'Alchimiste, p. 197)

4.1 Introduction

Nous présentons dans ce qui suit une description détaillée d'une séance qui s'est tenue en juillet 2012 au cours de laquelle nous avons mis à l'épreuve une intervention didactique de notre conception visant à enseigner le mécanisme des phases de la Lune à des jeunes âgés de 12 à 14 ans. Nous rapportons ici la séance telle qu'elle s'est déroulée chronologiquement, en y ajoutant notre analyse au fur et à mesure. Nous ajouterons également pour chaque segment des suggestions visant à améliorer la séance, suggestions basées sur nos observations ainsi que sur les commentaires des participants et informées par le cadre théorique qui a guidé la conception de l'intervention didactique elle-même.

La séance a eu lieu le samedi 7 juillet 2012 de 9 h 30 à 12 h 30 au Planétarium de Montréal, 1000, rue Saint-Jacques, à Montréal. La séance a été menée par le chercheur lui-même. Nous avons au préalable recruté les six participants à notre étude en lançant un appel à tous à nos collègues de travail (Biodôme, Insectarium, Jardin botanique et Planétarium de Montréal). Les volontaires qui ont participé à notre séance sont :

- Adam (garçon, 12 ans)
- Benoît (garçon, 13 ans)
- Bernard (garçon, 12 ans) [Note : Benoît et Bernard sont des amis d'enfance]
- Louis (garçon, 12 ans)
- Nadine (fille, 12 ans)
- Maude (fille, 14 ans)

Notons que nous utilisons des pseudonymes afin de dissimuler la véritable identité des participants. La séance a eu lieu en partie dans une salle de réunion du Planétarium de Montréal (séances pré- et post-traitement) et en partie sous un dôme de six mètres de

diamètre, le planétarium, où a eu lieu l'intervention didactique elle-même¹³. Le planétarium utilisé lors de la séance était un dôme gonflable (figure 4) dont la paroi intérieure a servi de surface de projection pour les images projetées par un projecteur vidéo situé en son centre; le projecteur était muni d'une lentille de type *fish-eye* permettant à l'image projetée de couvrir l'ensemble de la voûte. Toutes les images projetées au cours de la séance de planétarium ont été générées par le logiciel DigitalSky2© de la compagnie Sky-Skan inc.

Ce dôme gonflable était installé au centre du théâtre des étoiles de l'ancien Planétarium de Montréal. À l'intérieur du dôme gonflable, les volontaires étaient assis sur des chaises de plage pliantes disposées en ligne de part et d'autre du projecteur central. Le chercheur était assis en retrait, derrière les volontaires et derrière l'ordinateur qui contrôlait le système de projection.

Les activités pré- et post-traitement menées dans la salle de réunion ont été enregistrées à l'aide d'une enregistreuse numérique et, en certaines occasions, filmées à l'aide d'une caméra vidéo. La séance dans le planétarium a été enregistrée (audio seulement) à l'aide de deux micros : un micro casque que portait le chercheur et un micro sur pied installé près de la paroi du dôme gonflable, en face des volontaires. Les enregistrements audio et vidéo des séances pré- et post-traitement, de même que de la séance sous le dôme du planétarium, ont été transcrites par le chercheur lui-même.

¹³ Notons que, dès sa fermeture au public en octobre 2011, les équipements de projection du Planétarium de Montréal ont été démantelés; subsistait toutefois la salle circulaire de 20 mètres de diamètre à l'intérieur de laquelle a été installé le dôme gonflable qui a été utilisé dans le cadre de la présente étude.



Figure 4. Vue extérieure du dôme gonflable à l'intérieur duquel a eu lieu l'intervention didactique. (Photo : Pierre Chastenay)

Notons qu'il a parfois été très difficile de comprendre ce que disaient les participants à cause du bruit de la ventilation sous le dôme, ou encore parce que plusieurs participants parlaient en même temps. Il aurait été plus pratique, dans ces circonstances, de disposer de plus d'un micro pour enregistrer les participants, ou encore d'utiliser des micro cravates sans fil, un pour chaque intervenant, bien que cette dernière solution aurait demandé une infrastructure technique beaucoup plus lourde.

Au cours des séances pré- et post-traitement, le chercheur a utilisé divers moyens (questionnaires, entrevue de groupe, mises en situation) afin de recueillir les conceptions

des participants à propos des phases de la Lune. Au cours de l'intervention didactique, un dialogue constant avec les participants a également permis au chercheur de recueillir un grand nombre de traces documentant leur cheminement et les difficultés rencontrées, mais aussi les avancées conceptuelles. La comparaison des réponses aux pré- et aux post-tests, de même que le recueil et l'analyse des commentaires formulés par les participants tout au long de la séance, permettra ainsi au chercheur de mettre en évidence leur évolution conceptuelle par rapport au phénomène des phases de la Lune et à leur mécanisme.

4.2 Première partie : rencontre prétraitement

4.2.1 Présentation du chercheur et but de la recherche

La séance débute par la rencontre prétraitement dans la salle de réunion. Le chercheur se présente et explique le but de la rencontre, c'est-à-dire aider le chercheur à concevoir des façons nouvelles et efficaces d'enseigner des concepts astronomiques à des jeunes de l'âge des participants, plus particulièrement le concept des phases de la Lune.

Le chercheur filme ensuite les participants pendant qu'ils se présentent à tour de rôle et mentionnent leur âge. Ceci avait pour but d'associer la voix, les intonations et l'accent de chacun avec un nom et une image, ce qui a été fort utile par la suite pour déterminer qui disait quoi sur les enregistrements audio. Avec le recul, le chercheur s'est aperçu que cet enregistrement aurait même pu être un peu plus long, ce qui aurait facilité davantage l'identification des participants sur les enregistrements audio.

Finalement, le chercheur décrit le déroulement de la séance et invite les participants à répondre au meilleur de leurs connaissances aux questions qui leur seront posées et à participer le plus possible aux activités et discussions qui leur seront proposées. Le chercheur insiste sur le fait que « [...] quand je vais vous poser des questions, il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses, il n'y a que des réponses vraies, il n'y a que les choses que vous pensez vraiment... » (Patrice Potvin, communication personnelle). Le chercheur rappelle également qu'il ne s'agit pas d'un exercice scolaire et qu'aucune note ne

leur sera attribuée suite à leur participation. Il insiste finalement sur l'anonymat des réponses. Les participants semblent bien comprendre les consignes, Bernard résumant le but de la séance en disant : « Donc, en fait, [on fait ça] pour vous améliorer ? ».

4.2.2 Distribution des questionnaires prétraitements

Le chercheur distribue ensuite aux participants les cinq questionnaires prétraitements (voir les questionnaires et une courte description de la méthode qui a mené à leur rédaction à l'annexe 3), en leur rappelant à chaque fois d'inscrire leur nom sur la feuille. Les questions ont été réparties sur cinq questionnaires distincts, chaque questionnaire complété étant récupéré par le chercheur avant de distribuer le suivant, afin d'éviter qu'une question pouvant contenir un possible indice concernant une question antérieure ne suscite des retours en arrière de la part des participants pour corriger une réponse initiale. Des questionnaires en tout point identiques seront distribués à nouveau après la séance de planétarium.

Dès le départ, le chercheur mentionne que si des questions ne sont pas formulées suffisamment clairement, il tentera de les clarifier. La situation se présente à propos de la première question du premier questionnaire, lorsque Bernard et Louis s'interrogent à propos de la signification du mot « astre » et que Maude demande de préciser les « frontières » entre le jour et la nuit. Après les éclaircissements nécessaires, le chercheur utilise ces exemples d'incompréhension pour illustrer l'importance pour les participants de dire ce qu'ils pensent vraiment; c'est cela qui permettra d'améliorer toutes les facettes de la séance, y compris les questionnaires. Les autres questions ne semblent pas poser de problème particulier aux participants. Parmi les consignes qu'il aurait tout de même été souhaitable de mentionner, le fait d'écrire « Je ne sais pas » en réponse à une question plutôt que de laisser l'espace vide aurait facilité l'analyse et aurait permis de distinguer une connaissance ou une conception d'une lacune ou d'une simple absence.

4.2.3 Analyse des réponses aux questionnaires prétraitements

Nous présentons dans cette section les réponses des participants aux questions des cinq questionnaires prétraitements, accompagnées d'une description de l'objectif poursuivi par chaque question ainsi que de notre analyse préliminaire. Nous réservons l'analyse comparative des réponses aux questionnaires pré- et post-traitements à plus tard, lorsque nous aurons également détaillé la séance au planétarium. Notons que les fautes d'orthographe ont été corrigées dans les réponses des participants.

Questionnaire no 1

1. Peux-tu nommer des astres que l'on peut voir dans le ciel le jour ? Inscris-en autant que tu veux.

Adam : Oiseaux, nuages, Soleil, le ciel.
 Benoît : Le Soleil.
 Bernard : Le Soleil.
 Louis : Mars.
 Nadine : Il y a la Lune, le Soleil.
 Maude : Le Soleil.

Cette question avait pour but d'évaluer la familiarité des répondants avec l'observation du ciel de jour. Il n'est en effet pas évident pour tous que l'on puisse faire de l'astronomie à un autre moment que la nuit. En analysant les réponses, il est intéressant de constater que seule Nadine a mentionné la Lune parmi les astres visibles le jour. Nous verrons que cette situation évoluera beaucoup après la séance de planétarium, comme en témoigneront les réponses au post-test.

2. Peux-tu nommer des astres que l'on peut voir dans le ciel la nuit ? Inscris-en autant que tu veux.

Adam : La Lune.
 Benoît : Vénus, la Lune, Mars...
 Bernard : La Lune, les étoiles (filantes).
 Louis : Vénus, Mars et Jupiter.
 Nadine : Des étoiles, la Lune, parfois des planètes.
 Maude : Les étoiles, la Lune, météore.

Cette question avait pour but d'évaluer la familiarité des répondants avec l'observation du ciel de nuit, qui semble un moment plus « naturel » pour observer le ciel dans l'esprit de bien des enfants. Nous avons obtenu des réponses variées : Vénus, Mars, Jupiter, la Lune (cinq répondants sur six), les étoiles filantes et les météores, les étoiles, les planètes (également cinq répondants sur six). La présence de la Lune dans de nombreuses réponses (cinq répondants sur six) s'explique sans doute par le fait que le chercheur a mentionné dans son introduction qu'il serait beaucoup question des phases de la Lune au cours de la matinée. Pour la plupart, la Lune demeure un astre visible exclusivement la nuit, du moins à ce stade-ci de la séance. Les réponses au post-test demeureront assez semblables.

Questionnaire no 2

1. As-tu déjà vu la Lune dans le ciel la nuit ? Encerle ta réponse.

Cette question avait pour but d'évaluer la familiarité des répondants avec l'observation de la Lune la nuit, qui semble un moment plus « naturel » pour observer notre satellite dans l'esprit de bien des enfants. Tous les répondants ont répondu oui à cette question, tant en prétest qu'en post-test, un résultat tout-à-fait prévisible et peu surprenant. La Lune est en effet un objet facile à repérer dans le ciel, même par de très jeunes enfants, particulièrement la nuit lorsque le ciel est noir.

2. As-tu déjà vu la Lune dans le ciel le jour ? Encerle ta réponse.

Cette question avait pour but d'évaluer la familiarité des répondants avec l'observation de la Lune en plein jour, qui n'est pas *a priori* un moment idéal pour observer notre satellite. Seul Adam (un répondant sur six) a répondu non. Cette question doit être comparée avec la question no 1 du questionnaire précédent : même si, dans l'ensemble, les répondants n'ont pas pensé spontanément à la Lune comme objet visible le jour en répondant à cette première question, il semble qu'une question plus directe réveille chez eux des souvenirs d'observations diurnes de la Lune.

3. Si tu as répondu OUI à l'une ou l'autre des questions précédentes, dessine ci-dessous de quoi avait l'air la Lune la dernière fois que tu l'as observée.

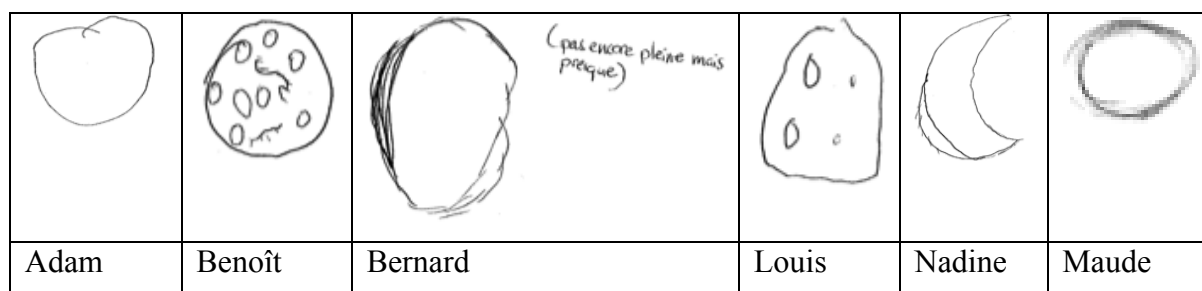


Figure 5. Dessins des participants en réponse à la question 3 du questionnaire prétest no 2.

Cette question avait pour but de connaître l'aspect de la Lune auquel les répondants faisaient référence en songeant à leur dernière observation de notre satellite. Comme on le voit à la figure 5, quatre répondants sur six (Adam, Benoît, Louis et Maude) ont dessiné un simple cercle, deux d'entre eux (Benoît et Louis) ajoutant des petits cercles (des « cratères ») à l'intérieur de leur dessin. Nadine a dessiné un croissant de Lune tandis que Bernard dessinait une Lune gibbeuse croissante avec la mention « pas encore pleine, mais presque », une représentation et une description assez fidèles de cette phase particulière de la Lune.

4. Explique brièvement comment, selon toi, la Lune peut être visible en plein jour ou sinon, pourquoi on ne peut pas voir la Lune en plein jour.

Adam : Parce que le jour la Lune est couchée et le soleil levé.

Benoît : La lune peut être visible en plein jour quand le soleil se lève très tôt.

Bernard : [Pas de réponse.]

Louis : C'est à cause du Soleil. Il illumine le ciel. La nuit il est à l'autre bout du monde. On peut voir la Lune, parce qu'il l'illumine parfaitement.

Nadine : On voit la Lune parce qu'elle reflète la lumière du Soleil.

Maude : Je crois que la Lune est rarement visible en plein jour, mais qu'on peut quand même parfois l'observer en plein jour. Je ne sais pas vraiment pourquoi.

Cette question avait pour but de recueillir l'opinion des répondants quant à la raison pour laquelle il est possible de voir la Lune le jour, malgré la brillance de l'atmosphère

terrestre. Pour Adam, il semble que la Lune soit un objet visible exclusivement la nuit, une conception assez fréquente et en accord avec sa réponse à la question 2 du présent questionnaire. On peut sans doute voir des relents de cette même conception dans la réponse de Benoît, qui invoque lui aussi le lever du Soleil. Bernard n'a pas répondu à la question et nous ne savons pas pourquoi. Quant à Louis et Nadine, leurs réponses ont du sens, bien qu'il faille déchiffrer leurs intentions; notons toutefois que les deux invoquent le fait que la Lune réfléchit la lumière du Soleil, ce qui est exact, sans que ceci puisse toutefois expliquer complètement la visibilité diurne de la Lune. Louis invoque le Soleil qui illumine le ciel, un élément important pour comprendre la visibilité de la Lune le jour. Maude, finalement, avoue ne pas savoir pourquoi on voit parfois la Lune en plein jour. Nous verrons que cette situation évoluera favorablement pour quelques participants après la séance au planétarium.

Questionnaire no 3

1. Est-ce que la Lune a toujours la même apparence dans le ciel ? Est-ce qu'elle nous apparaît toujours sous la même forme ? Encerle ta réponse.

Cette question avait pour but de savoir si les répondants étaient familiers avec le fait que la Lune nous montre des phases, qui se traduisent par un changement d'apparence de notre satellite d'un jour à l'autre. Tous les répondants ont répondu non à cette question, tant en prétest qu'en post-test, un résultat tout-à-fait prévisible et peu surprenant. Les phases de la Lune demeurent un phénomène courant qui apparaît sur les calendriers et est facilement observable en quelques jours à l'œil nu, même par de très jeunes enfants.

2. Si tu as répondu NON à la question précédente, dessine ci-dessous toutes les formes que peut prendre la Lune dans le ciel. Tu peux faire autant de dessins que nécessaire.


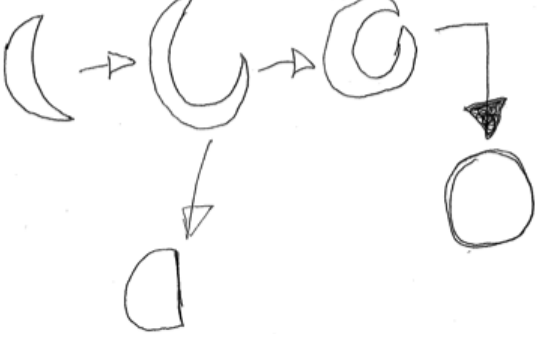




Adam :	 <p>Pleine lune lune croissant demi-lune</p>
Benoît :	
Bernard :	
Louis :	
Nadine :	 <p>pareil de l'autre coté</p>
Maude :	

Figure 6. Dessins des participants en réponse à la question 2 du questionnaire prétest no 3.

Cette question avait pour but d'évaluer la familiarité des répondants avec les différentes phases que nous montre la Lune au cours d'un cycle mensuel. Parmi les réponses données au questionnaire prétest (figure 6), on sent chez la plupart des répondants une volonté de représenter une certaine progression – ou du moins une symétrie – des phases, qui ne semblent pas avoir été dessinées au hasard. Notons par contre que les répondants n'ont à peu près pas utilisé le noircissement de la partie invisible de la Lune pour illustrer les phases (Louis est la seule exception et il n'a noirci qu'un seul de ses quatre dessins). On remarque dans les dessins d'Adam et de Benoît une certaine naïveté, leurs illustrations de croissants rappelant la forme de l'ombre de la Terre projetée sur la Lune lors d'une éclipse de Lune. Chez Nadine et Bernard, la pleine Lune est couverte de cratères. D'autre part, chez Adam, Benoît, Bernard et Louis, les phases décroissantes (des croissants avec les pointes tournées vers la droite) et les derniers quartiers dominent sur toutes les autres phases représentées. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Trundle, Troland & Pritchard (2008) et d'autres études similaires qui montrent une prépondérance des croissants de Lune avec les pointes tournées vers la droite dans les dessins des jeunes, une imagerie héritée des livres pour enfants où cette représentation de la Lune prédomine. Enfin, seuls trois répondants sur six (Bernard, Nadine et Maude) ont dessiné des phases gibbeuses, mais la nouvelle Lune n'a été représentée par aucun des participants. Nous verrons heureusement une nette amélioration (qualitative et quantitative) des dessins des phases de la Lune chez plusieurs participants après la séance de planétarium.

Questionnaire no 4

1. Selon toi, qu'est-ce qui fait que la Lune change d'apparence d'un jour à l'autre ?

Décris ta réponse.

Adam : [Pas de réponse.]

Benoît : C'est que souvent une partie de la Lune est cachée par de la brume.

Bernard : Moi, je pense que c'est la façon dont la lumière frappe la Lune et la position de la Lune.

Louis : Peut-être la façon dont le Soleil se positionne à son coucher.

Nadine : Je ne sais plus trop mais c'est une histoire de Soleil et d'ombre.

Maude : Je crois que c'est parce que la Lune tourne autour d'elle-même et de la Terre donc, puisqu'elle change de position, elle change d'apparence.

Cette question avait pour but de déterminer quel mécanisme les répondants invoquaient pour expliquer les phases de la Lune, un phénomène à propos duquel de nombreuses conceptions bien documentées circulent déjà (voir annexe 1). Pour quatre répondants sur six, l'explication du mécanisme des phases de la Lune semble problématique. Adam n'a malheureusement pas répondu à la question. L'explication de Benoît fait intervenir de la brume qui nous cacherait la Lune (on reconnaît le principe de l'éclipse à l'œuvre, une conception extrêmement fréquente). Louis invoque le coucher du Soleil, mais ne semble pas très sûr de lui. Nadine ne sait pas trop expliquer les phases elle non plus, sauf pour dire qu'il s'agit d'une histoire de Soleil et d'ombre (évoque-t-elle le mécanisme des éclipses, comme Benoît ?). Au contraire, les explications de Bernard et de Maude sont proches de la réalité, ou du moins contiennent-elles des éléments de la réponse. Nous verrons à ce sujet quelques évolutions conceptuelles assez remarquables en comparant ces réponses à celles données au post-test.

2. Selon toi, quelle est la forme réelle de la Lune ? Par exemple, a-t-elle la forme d'un croissant, est-elle plate et ronde comme une assiette ou sphérique comme un ballon ? A-t-elle une autre forme ? Décris ta réponse.

Adam : Elle est ronde.

Benoît : La forme complète de la lune est sphérique comme la Terre mais plus petite.

Bernard : Elle est une grosse boule.

Louis : Je pense qu'elle a une forme sphérique.

Nadine : C'est un ballon juste plus petit que la Terre.

Maude : Elle est ronde, comme la Terre.

Le but de cette question était de connaître l'opinion des répondants à propos d'un élément très important pour expliquer les phases de la Lune, à savoir que la Lune est une sphère. La forme sphérique de la Lune ne semble pas poser problème aux participants, qui

ont répondu de manière adéquate tant en prétest qu'en post-test. Notons tout de même l'hésitation de Louis, qui débute sa réponse par « Je pense... ».

3. Selon toi, d'où vient la lumière de la Lune ? Est-ce que la Lune produit sa propre lumière ? Est-ce qu'elle réfléchit vers nous la lumière de la Terre ? Du Soleil ? La lumière des étoiles ? Est-ce autre chose qui fait briller la Lune ? Décris ta réponse.

Adam : Le Soleil mets de la lumière sur la Lune et la renvoie vers la Terre.

Benoît : [Pas de réponse.]

Bernard : Je crois que la nuit, même si l'on ne voit pas le Soleil, sa lumière frappe la Lune et la Lune la reflète.

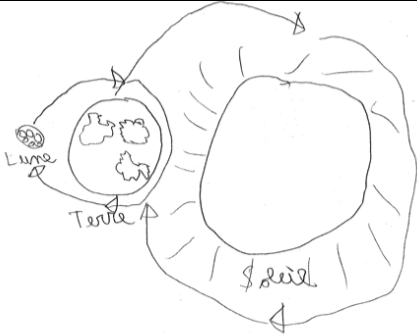
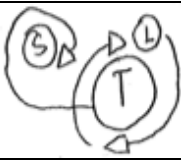
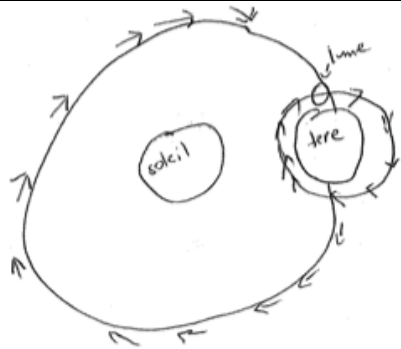
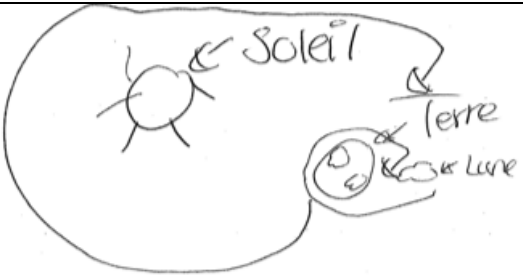
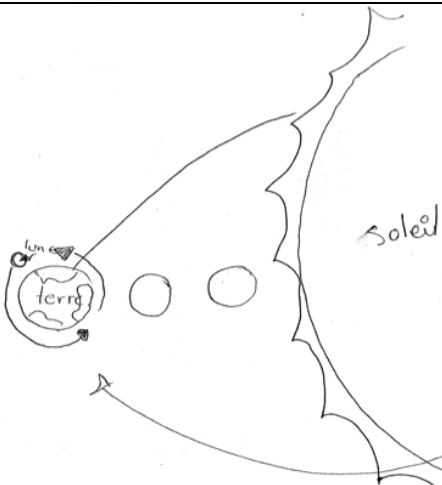
Louis : Je ne sais pas d'où vient la lumière de la Lune, mais je pense qu'elle entre en contact avec le Soleil et les étoiles.

Nadine : C'est la lumière du Soleil. Mais ce qu'il fait qu'elle n'a pas toujours la même forme c'est parce que le Soleil éclaire juste une partie.

Maude : Je crois qu'elle réfléchit vers nous la lumière du Soleil.

Le but de cette question était de connaître l'opinion des répondants à propos d'un élément très important pour expliquer les phases de la Lune, à savoir que la Lune ne produit pas sa propre lumière, mais brille en réfléchissant vers nous la lumière qu'elle reçoit du Soleil. Cette notion semble problématique pour Benoît et Louis, même si ce dernier mentionne le Soleil dans sa réponse (mais également les étoiles...), tandis qu'elle ne pose pas de problème aux autres participants, qui ont tous répondu correctement à la question. Fait à noter, Nadine mentionne que le Soleil éclaire seulement une partie de la Lune et que, par conséquent, la Lune change de forme (d'apparence ?), ce qui est une explication assez juste du mécanisme des phases de la Lune, mais donnée en réponse à la mauvaise question.

4. Selon toi, comment la Lune se déplace-t-elle dans le ciel ? Est-ce qu'elle tourne autour de la Terre, ou du Soleil, ou des deux ? Est-ce plutôt le Soleil et la Terre qui tournent autour de la Lune ? Est-ce autre chose ? Dessine ta réponse ci-dessous en montrant qui tourne autour de quoi. Utilise des flèches pour indiquer le sens des déplacements. Décris ensuite les mouvements de la Lune dans tes mots sur les lignes ci-dessous.

<p>Adam : La Lune tourne autour de la Terre, et la Terre tourne autour du Soleil.</p>	
<p>Benoît : La Lune tourne autour de la Terre et le Soleil reste en place. C'est la Terre qui tourne autour du Soleil.</p>	
<p>Bernard : [Pas de texte accompagnant le dessin.]</p>	
<p>Louis : La Lune tourne autour de la Terre.</p>	
<p>Nadine : On ne voit qu'une face de la Lune.</p>	

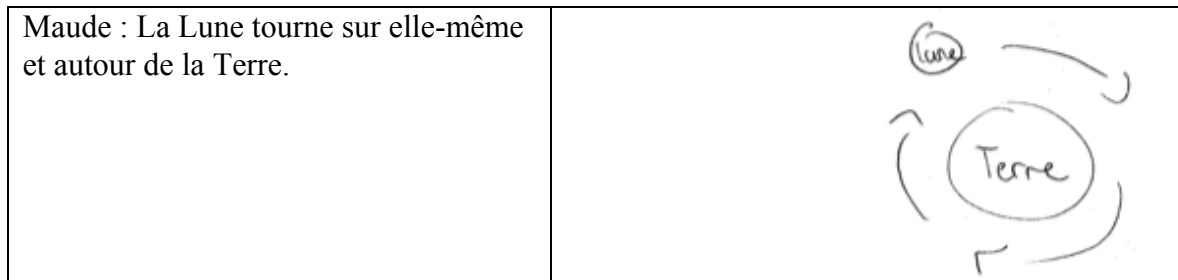


Figure 7. Dessins des participants en réponse à la question 4 du questionnaire prétest no 4.

Le but de cette question était de connaître l'opinion des répondants à propos d'un élément très important pour expliquer les phases de la Lune, à savoir que la Lune est en orbite autour de la Terre. En se basant sur les réponses écrites et les dessins (figure 7), il semble très clair dans l'esprit de cinq des six participants que la Lune tourne autour de la Terre et que la Terre tourne autour du Soleil. Maude, de son côté, n'a signalé que le mouvement de la Lune autour de la Terre. Nous avons obtenu des réponses similaires en post-test. Le sens de révolution (antihoraire pour un observateur situé au-dessus du pôle nord de la Terre) n'est pas respecté par la majorité, mais il s'agit d'un détail somme toute assez mineur.

5. Si tu pouvais placer le Soleil, la Terre et la Lune côte à côte et les classer du plus petit au plus grand, laquelle des listes ci-dessous [voir annexe 3] indiquerait le bon ordre ? Encerle ta réponse. [réponse : B]

Adam : B
 Benoît : D
 Bernard : B
 Louis : B
 Nadine : B
 Maude : B

Le but de cette question était de connaître l'opinion des répondants à propos de la taille relative de la Lune, de la Terre et du Soleil d'un point de vue qualitatif, une notion périphérique à l'explication du mécanisme des phases de la Lune. Les réponses sont demeurées identiques du prétest au post-test. Seul Benoît a répondu incorrectement à cette

question, mais la séquence qu'il a choisie est exactement l'inverse de la bonne réponse, ce qui laisse croire qu'il sait que la Lune est plus petite que la Terre, qui est elle-même plus petite que le Soleil, mais qu'il a simplement mal interprété la question. D'ailleurs, à la question suivante, il a choisi un objet plus gros qu'un ballon de basket ball (représentant la Terre) pour représenter le Soleil et un plus petit pour la Lune. Cette notion de la taille relative des objets ne semble donc pas poser problème.

6. Imagine que tu construis un modèle réduit de la Terre, de la Lune et du Soleil. Si, dans ton modèle, la Terre avait la taille d'un ballon de basket ball, quelle serait la taille de la Lune et du Soleil à la même échelle ? Encerle tes réponses. [réponse : B – E]

Adam : B – D

Benoît : B – D

Bernard : B – D

Louis : B – E

Nadine : B – E

Maude : B – D [E semble avoir été encerclé, puis hachuré]

Le but de cette question était de connaître l'opinion des répondants à propos de la taille relative de la Lune, de la Terre et du Soleil d'un point de vue quantitatif, une notion périphérique à l'explication du mécanisme des phases de la Lune. Les réponses sont demeurées assez semblables entre le prétest et le post-test. Seuls Louis et Nadine ont répondu correctement à cette question. Ceux qui ont répondu B – D sous-estiment le diamètre du Soleil, mais ont tout de même choisi un objet plus gros que celui représentant la Terre. Cette notion de la taille relative des objets ne semble donc pas poser problème.

7. Laquelle des listes suivantes situe les objets par ordre de distance croissante par rapport à toi, du plus proche de toi au plus éloigné ? Encerle ta réponse.

(Note : Alpha du Centaure est une étoile semblable au Soleil.) [réponse : E]

Adam : E

Benoît : A

Bernard : E

Louis : E

Nadine : E

Maude : E

Le but de cette question était de connaître l'opinion des répondants à propos de la distance relative des nuages, de la Lune, du Soleil et d'une étoile proche par rapport à la Terre, une notion périphérique à l'explication du mécanisme des phases de la Lune et une indication de la familiarité des répondants avec l'organisation spatiale du système Soleil-Terre-Lune. Benoît est le seul à avoir répondu incorrectement à cette question, mais sa réponse est presque l'inverse de la bonne réponse et il s'est repris en donnant une bonne réponse en post-test. Faut-il y voir une difficulté de lecture ? Pour les autres, la notion de distances relatives ne semble pas problématique. Les réponses sont d'ailleurs demeurées semblables entre le prétest et le post-test.

Questionnaire no 5

1. À l'aide d'un trait, relie chaque photo de la Lune à gauche avec le nom de la phase correspondant à droite.

Adam : 3 bonnes réponses /7
Benoît : 2/7
Bernard : 2/7
Louis : 3/7
Nadine : 2/7
Maude : 4/7

Le but de cette question était d'évaluer la familiarité des répondants avec les principales phases de la Lune et leur dénomination. Dans le prétest, seule la pleine Lune a été correctement identifiée par tous les répondants, ce qui n'est pas surprenant; les autres phases les plus souvent identifiées correctement étaient la Lune croissante et la nouvelle Lune. Maude constitue une exception, ayant correctement identifié les phases gibbeuses croissantes et décroissantes, ce qui était plus difficile. Pour le reste, au vu des piètres résultats obtenus par les participants, on constate que la reconnaissance des phases et l'utilisation du vocabulaire adéquat pour les désigner constituait un gros défi. On verra par contre des progrès significatifs dans les réponses au même questionnaire post-traitement.

4.2.4 Mise en ordre des phases de la Lune

Une fois les questionnaires complétés, le chercheur propose aux participants de remettre les phases de la Lune en ordre chronologique. Cette activité collective avait pour but de vérifier si les répondants connaissaient la séquence des phases de la Lune. Les participants se rassemblent autour d'une série de huit photographies plastifiées des principales phases de la Lune (figure 8). Nous reproduisons ci-dessous la transcription d'une partie des échanges qui ont eu lieu entre les participants à cette occasion.



Figure 8. Photographies plastifiées des principales phases de la Lune. (Photo : Pierre Chastenay)

Bernard : Ma première idée à moi c'est que si on voit ici, c'est noir [pointe vers la nouvelle Lune], on peut tout de suite savoir que c'est soit le début ou la fin. Parce que ça ne peut pas commencer par ça [pointe vers une autre phase], puis après aller là [pointe vers la nouvelle Lune], puis après à ça

[pointe vers une autre phase]. Ça commence par ça [pointe vers la nouvelle Lune]. Ça commence ou ça se termine, c'est assuré.

Bernard prend les devants en établissant d'entrée de jeu un critère raisonnable concernant les phases de la Lune, à savoir que la nouvelle Lune doit être le début ou la fin d'un cycle, ce avec quoi la plupart des participants semblent d'accord, sauf Benoît.

Benoît : Bien moi je dirais que ça [pointe vers la pleine Lune], c'est la... La pleine Lune, ça c'est la Lune complète. Bien, dans le fond, c'est la Lune quand elle est complétée... Peut-être que ça va en ordre décroissant ou croissant, ça veut dire que peut-être que ça commence par la Pleine Lune, peut-être que ça commence par le trou noir [nouvelle Lune]... Bien, c'est vide, là, y'a du noir ! [En parlant de l'image complètement noire représentant la nouvelle Lune]

On comprend de la remarque de Benoît que ce dernier considère les phases de la Lune comme un processus de « remplissage » où la Lune commence soit pleine, soit nouvelle, mais où ces deux phases constituent les extrémités du cycle, et non pas le début et le milieu. Il s'agit pour Benoît d'une déduction « raisonnable » dans la mesure où il associe le mot « pleine » à la fin d'un processus de remplissage. Le dialogue entre Bernard et Benoît se poursuit dans la même veine.

Bernard : Non mais ce que je veux dire, en même temps, c'est que... La nouvelle Lune, vous êtes d'accord avec moi que ça peut être le début ou la fin.

Benoît : Puis la pleine Lune, c'est le début ou la fin.

Bernard : La pleine Lune peut être le début ou la fin, mais moi je le mettrais plus au milieu. Ça fait que ça commence avec la nouvelle Lune, puis ça fait ça...

Benoît : Oui, mais si c'est la pleine Lune ? Ça fait que dans le fond, c'est la fin, parce qu'elle est complète, la pleine Lune !

On retrouve encore l'idée maîtresse de Benoît, à savoir que la pleine Lune est le résultat du processus de « remplissage » de la Lune, donc elle doit constituer la fin du cycle, la complétion de la Lune. Pour Bernard, la pleine Lune peut bien constituer la fin du cycle, mais certainement pas dans le sens où Benoît l'entend, et il propose un argument qui va ébranler Benoît (jusqu'à un certain point) et rallier les autres participants, en particulier Nadine, Adam et Maude : « Non mais Benoît, ce que tu ne comprends pas, c'est qu'après la pleine Lune, elle [la Lune] décroît pour redevenir petite. » La Lune est d'abord croissante jusqu'à la pleine Lune, puis décroissante jusqu'à la nouvelle Lune. C'est ce postulat qui leur permet de mettre les phases dans l'ordre assez rapidement par la suite.

Nadine : De chaque côté que tu l' observes [montre des croissants de Lune], c'est comme si ça partait... [Elle fait le geste d'étendre les croissants de part et d'autre de la pleine Lune]

Benoît : Donc la pleine Lune, c'est pas le début ou la fin ?

Nadine : Non, c'est plutôt le milieu.

Adam : Puis après, ça devient une Lune décroissante.

Maude : C'est comme... Ici... Tu as cette image-là [croissant], c'est comme, ça croît [elle dessine un croissant plus épais avec son doigt], ensuite ici, c'est encore plus, genre, de lumière [montre le quartier].

Bernard : La moitié.

Maude : Oui, ensuite c'est encore plus [montre la gibbeuse], puis là, ça devient au complet [montre la pleine Lune]. Ensuite, ça décroît. Mettons que tu les mets comme ça, ça décroît, t'as comme un plus gros [gibbeuse], ensuite le plus petit [croissant], genre.

À ce stade-ci, les participants sont arrivés à une séquence à peu près correcte, mais Benoît a encore des doutes.

Benoît : Mais la nouvelle Lune, ça sert à quoi ?

Bernard : Bien ça, c'est quand c'est vide. Quand c'est la nouvelle Lune, c'est quand c'est vide.

Benoît : Donc c'est ça, bien, il faudrait la mettre là [il déplace la nouvelle Lune au début de la séquence].

La suggestion de Benoît poursuit son idée que la Lune se remplit de la nouvelle Lune à la pleine Lune. D'ailleurs, il déplace aussitôt les autres photos des phases pour les remettre dans un ordre qui illustre sa vision des phases de la Lune, c'est à dire croissant de la nouvelle Lune à la pleine.

Benoît : Moi, j'ai l'impression que ça fait un peu comme ça, là, c'est comme si la Lune grossissait. Ici, ça grossit, ça grossit... [Il place toutes les phases en ordre croissant, les pointes tournées dans la même direction, de la nouvelle Lune à la pleine]

Maude : Bien ça [montre le mince croissant], c'est plus la dernière...

Adam : L'avant-dernière [avant la nouvelle Lune].

Maude : ...parce qu'ici [montre la pleine Lune], après, il faut que ça décroisse.

Benoît : Bien moi, j'aurais pensé à un quartier d'orange !

Encore l'idée de Benoît d'une Lune qui se remplit de la nouvelle Lune à la pleine, comme si on lui ajoutait des croissants et des quartiers jusqu'à ce qu'elle soit « complète ». Mais les autres participants replacent vite les photos dans l'ordre et présentent le résultat de leurs délibérations au chercheur (figure 9). Notons que, même si la séquence est inversée (elle débute par le dernier croissant et se termine par le premier croissant, et la pleine Lune est à l'envers), elle illustre tout de même une séquence « logique » d'une Lune croissante jusqu'à la pleine Lune et décroissante par la suite. L'extrait ci-dessous constitue la description de la séquence faite par les participants à la demande du chercheur tandis qu'il filme le résultat. Les chiffres entre parenthèses carrées renvoient à ceux de la figure 9. Le dialogue illustre le fait que le vocabulaire associé aux phases (nomenclature) demeure

difficile à utiliser, comme l'illustraient également les réponses au questionnaire prétraitement no 5.



Figure 9. Résultat du classement des photographies plastifiées des phases de la Lune par les participants. (Photos : Pierre Chastenay)

Chercheur : Si vous permettez, je vais juste filmer la séquence que vous avez faite, pour m'en souvenir plus tard. Ça fait que ce que vous me dites, là, si vous me réexpliquez [votre séquence]...?

Bernard : C'est que, le noir [1], c'est soit le début ou la fin.

Maude : C'est cyclique, ça continue.

Bernard : Oui, c'est comme un cercle, alors on peut le mettre au début ou à la fin. L'autre [2], c'est le premier quartier. Le... non, ça, c'est pas le premier quartier, euh, je me mélange...

Adam : [Pointe vers 2] Ça, c'est le croissant.

Bernard : Ah oui, ça c'est le croissant [2], ça c'est le premier quartier [3], ça...

Maude : Lune gibbeuse croissante [4].

Bernard : Oui, gibbeuse. Pleine [4]...

Bernard et Maude : Gibbeuse décroissante [6].

Bernard : Demi [7].

Maude : Dernier quartier [7].

Bernard : Dernier croissant [8], puis après ça retourne au noir [pointe vers 1].

La tâche de remettre en ordre les photographies des phases de la Lune a été relativement bien réussie par les participants. Sous l'impulsion de Bernard, tous ont contribué à son élaboration, sauf Louis, qu'on a malheureusement très peu entendu. Quant à Benoît, il avait une vision des phases de la Lune tout en contraste avec celle des autres. Alors que la majorité concevait les phases de la Lune comme un cycle de croissance et de décroissance, Benoît semblait plutôt croire que les phases consistaient en un « remplissage » de la Lune de la nouvelle à la pleine, avec un retour abrupt à la nouvelle Lune par la suite. Il faut peut-être y voir l'influence du langage, puisque l'expression pleine Lune peut en effet laisser croire que la Lune se « remplit » d'une phase à l'autre jusqu'à ce qu'elle soit pleine. Quoiqu'il en soit, il s'agit d'une conception originale, mais qui évoluera de manière remarquable, comme nous le verrons par la suite.

4.2.5 Modélisation du système Soleil-Terre-Lune

Le chercheur remet aux participants des ballons, des balles de tennis et des balles de golf en leur demandant d'illustrer les mouvements orbitaux de la Lune, de la Terre et du Soleil à l'aide de ces objets. Cette activité avait pour but de vérifier si les participants connaissaient les mouvements de la Lune et de la Terre dans l'espace. La transcription qui suit est approximative, les participants parlaient fréquemment tous en même temps.

Benoît : Ça [la balle de tennis], c'est le, la, la Terre...

Maude : Le Soleil [montre le ballon de basket ball]...

Adam : Ça [la balle de tennis], c'est la Terre et ça [la balle de golf], c'est la Lune.

Bernard : Bien, déjà là, on sait que la Terre tourne autour du Soleil.

Maude : ... La Lune tourne autour [montre la Lune en révolution autour de la Terre], puis la Lune tourne sur elle-même en même temps [montre la Lune en rotation]. La Terre tourne sur elle-même aussi [montre la Terre en

rotation], puis genre, elle tourne autour du Soleil [révolution de la Terre] et sur elle-même, genre.

Adam : Ça tourne en tournant [manipule la Lune en rotation et en révolution autour de la Terre].

Bernard : ... Ça fait que ça tourne de même, puis de même en même temps [manipule la balle de golf en rotation et en révolution autour de la balle de tennis, elle même en rotation et en révolution autour du ballon de basket ball]. La Lune, elle va aller plus vite, puis la Terre, elle tourne autour du Soleil.

Aucune difficulté majeure ici, tout comme l'ont également montré les réponses aux questions pré-tests à propos des mouvements de la Lune, de la Terre et du Soleil et de la taille relative des trois astres. La révolution de la Lune autour de la Terre et celle de la Terre autour du Soleil sont donc deux notions parfaitement maîtrisées par les participants. Plusieurs ont également mentionné la rotation de la Lune sur elle-même, un concept qui n'a pas été abordé dans la présente séance, malgré son importance pour comprendre l'origine du fait que la Lune nous montre toujours la même face¹⁴. Nous verrons toutefois cette notion de la rotation de la Lune sur elle-même venir contaminer la réflexion de Benoît à propos du mécanisme des phases de la Lune.

4.2.6 Utilisation de la fiche d'observation des phases de la Lune (le calendrier lunaire)

Le chercheur explique ensuite aux participants qu'ils vont se rendre sous peu dans le planétarium et que la première chose qu'ils y feront sera d'observer et de noter systématiquement l'apparence des phases de la Lune d'un jour à l'autre pendant un mois. Pour ce faire, il leur distribue une fiche d'observation des phases de la Lune (le calendrier

¹⁴ Rappelons que, puisque la rotation de la Lune sur elle-même et sa révolution autour de la Terre se font dans le même sens et prennent le même temps, la Lune nous présente toujours la même face. Ce phénomène de résonance gravitationnelle est courant dans le système solaire.

lunaire, voir annexe 4), ainsi qu'un crayon et une lampe frontale. Le chercheur explique aux participants comment noter la phase de la Lune sur leur calendrier : en noircissant la partie de la Lune qui est invisible (noire) et en laissant en blanc la partie visible. Le chercheur s'assure que ces consignes ont été bien comprises en demandant aux participants de dessiner la Lune telle qu'elle apparaît sur la photographie du premier quartier (dans un cercle, il fallait noircir la moitié de gauche et laisser blanche la moitié de droite). Enfin, le chercheur invite les participants à le suivre en direction du planétarium.

4.3 Deuxième partie : Séance dans le planétarium numérique

4.3.1 Entrée sous le dôme et présentation des équipements

Après avoir présenté de l'extérieur le dôme ainsi que le système de ventilation qui le maintient gonflé, le chercheur expose quelques consignes de sécurité et invite les participants à entrer à sa suite dans le planétarium. Les premières réactions des participants en entrant sous le dôme sont plus qu'enthousiastes...

Benoît : Ah, c'est donc bien super !

Participant : Cool !

Maude : C'est donc bien cool !

Le chercheur présente ensuite les équipements utilisés (la paroi intérieure du dôme comme surface de projection, le projecteur vidéo au centre et sa lentille spéciale, l'ordinateur qui génère et contrôle tout ce que les participants verront, etc.) dans le but de démystifier la technologie utilisée. Il invite enfin les participants à gagner leurs places afin de débiter la séance.

4.3.2 Observation des phases de la Lune

La toute première activité menée dans le planétarium consiste à observer et noter les phases de la Lune de manière systématique à chaque jour pendant un mois. Le but de cette activité était double : d'abord, familiariser les participants avec leur nouvel environnement (processus de démystification du planétarium et des aspects techniques de la simulation), et ensuite, démontrer que les phases de la Lune se succèdent de manière ordonnée et prévisible. La réalisation par les participants que la séquence des phases de la Lune suit un ordre logique est la fondation sur laquelle sera construite toute l'explication du mécanisme que nous démontrerons par la suite.

Après avoir allumé les points cardinaux (les participants sont assis face au sud) ainsi que les indicateurs de date et d'heure, le chercheur fait la démonstration de son pointeur laser qui va lui permettre d'attirer l'attention des participants sur certains éléments visuels particuliers en cours de séance.

Le chercheur met ensuite le ciel en mouvement diurne pour amener le Soleil sous l'horizon ouest (au coucher) et faire apparaître un croissant de Lune dans le ciel au sud-ouest (figure 10), croissant que les participants dessinent sur leurs calendriers lunaires. Cette première démonstration du mouvement diurne est l'occasion pour le chercheur de vérifier que les participants savent que le mouvement diurne est en réalité dû à la rotation de la Terre sur elle-même.

Une fois le croissant lunaire dessiné par tous, le chercheur fait tourner le ciel d'une journée complète en quelques secondes pour observer et noter la phase de la Lune le lendemain à la même heure. Avant de lancer le mouvement diurne, le chercheur demande aux participants de s'imaginer quelle va être la phase de la Lune le lendemain. Une fois le mouvement diurne quotidien complété, les participants sont invités à noter à nouveau l'aspect de la Lune sur leur calendrier lunaire. Cette séquence est répétée à quelques reprises pour les phases croissantes. À ce stade, selon ce qu'a constaté le chercheur, l'observation de l'évolution des phases de la Lune d'une journée à l'autre ne semble pas

poser de problème pour les participants, même si la différence entre l'apparence de la Lune d'un jour à l'autre n'est, somme toute, pas très grande.

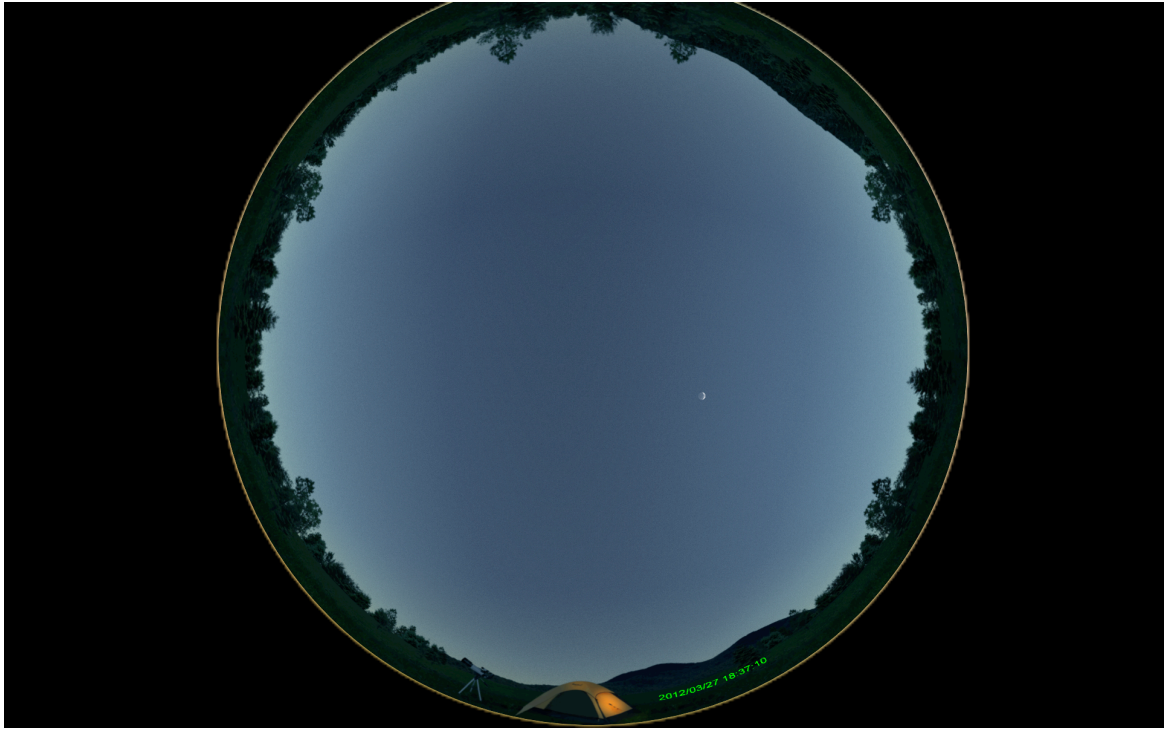


Figure 10. Première scène de l'intervention didactique montrant un mince croissant de Lune au coucher du Soleil. Comme pour les images suivantes, le sud est au bas de l'image et l'ouest est à droite. Pour des raisons purement techniques, le système de projection tronque une partie de l'image, au nord. (Source : Sky-Skan Inc.)

Au bout de quelques « jours », le chercheur fait remarquer aux participants que la Lune croît, mais aussi qu'elle s'éloigne du Soleil, ce dernier revenant toujours à la même position sous l'horizon ouest. Le chercheur propose alors que, plutôt que de faire tourner tout le ciel en un long mouvement diurne pour avancer d'une journée, on fasse simplement avancer la Lune jusqu'à sa position du lendemain. Ceci veut toutefois dire que, plutôt que de se déplacer vers l'ouest (mouvement diurne) pour réapparaître à l'est le lendemain et traverser le ciel, la Lune va plutôt se déplacer d'environ quinze degrés vers l'est, dans la

direction opposée à son mouvement diurne, sans que le ciel ne bouge. Un tel changement de direction du mouvement de la Lune aurait pu s'avérer problématique pour les participants (Patrice Potvin, communication personnelle), mais en pratique, il semble qu'ils ont bien négocié ce passage et accepté d'emblée la nouvelle procédure. D'autant plus que le chercheur a pris la peine d'illustrer à l'aide de marqueurs fixés sur la position de la Lune que même avec le mouvement diurne, la Lune ne revenait pas à sa position d'origine, mais s'arrêtait bel et bien quinze degrés plus à l'est (figure 11). À partir de ce moment, le chercheur guide les participants dans la poursuite de leurs observations quotidiennes des phases de la Lune en faisant se déplacer la Lune vers l'est de quinze degrés à chaque fois.

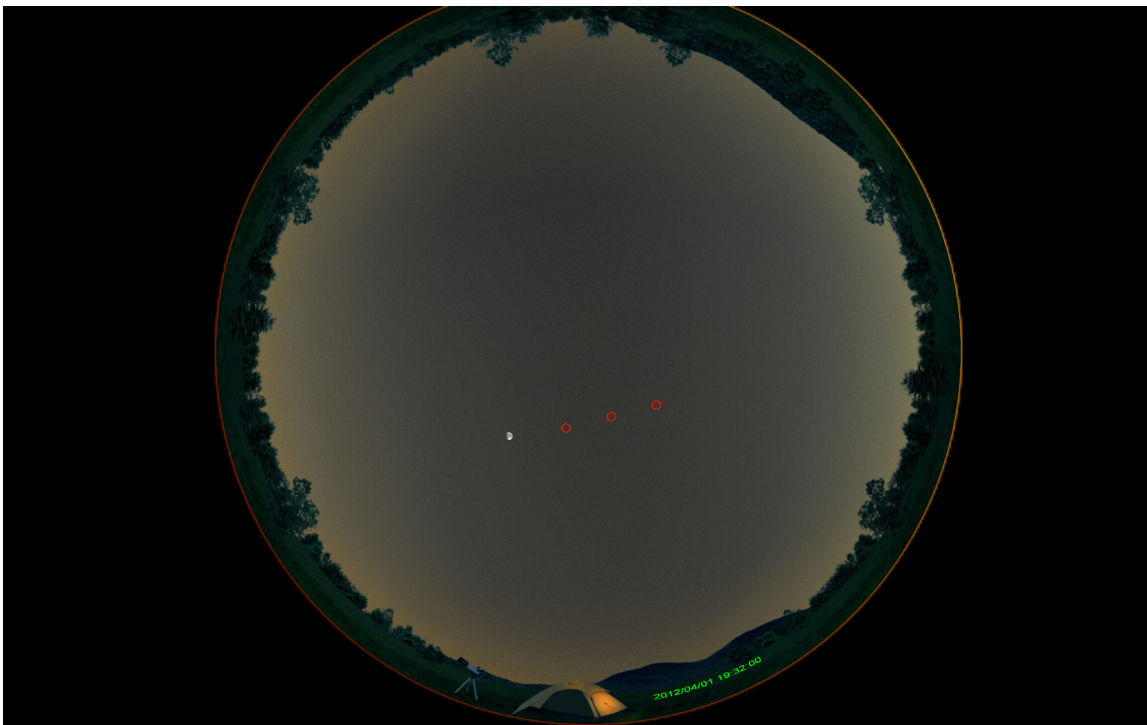


Figure 11. Positions successives de la Lune à la même heure d'un soir à l'autre marquées par des cercles rouges et illustrant le déplacement quotidien de la Lune vers l'ouest. (Source : Sky-Skan Inc.)

La Lune est alors croissante et il s'agit d'un bon moment pour faire remarquer aux participants que la Lune est visible le jour, ce qui fait dire à Benoît : « Bien moi, à mon

école, quand je me levais, je me levais à six heures du matin, puis je voyais souvent la Lune ». Ce commentaire de Benoît est bienvenu en ce qu'il fait référence à une expérience vécue par un participant. Le chercheur poursuit en expliquant pourquoi on peut voir la Lune en plein jour.

La séquence d'observation nous amène ensuite au premier quartier. Le chercheur propose alors le truc du « p » : il s'agit de tracer une ligne imaginaire sur la Lune passant par le terminateur, qui est la frontière entre la partie éclairée et la partie sombre de la Lune. Si cette ligne forme la lettre « p », il s'agit du premier quartier (figure 12). Si cela forme plutôt un « d », c'est le dernier quartier. Le chercheur ajoute que le premier quartier est généralement visible en après-midi et en soirée, tandis que le dernier quartier est plutôt visible en fin de nuit et en matinée.

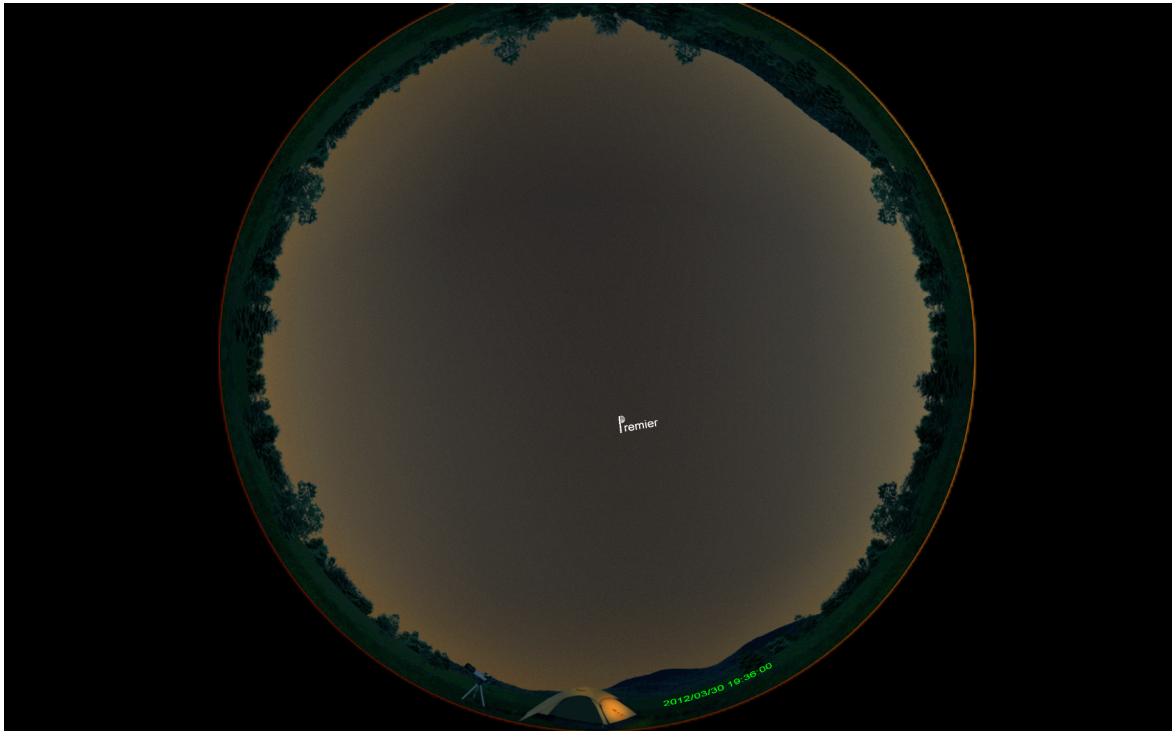


Figure 12. Le truc du « p » pour reconnaître le premier quartier et le distinguer du dernier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)

La séquence d'observation se poursuit et le chercheur fait remarquer que le terminateur, qui était incurvé vers la droite pendant les phases croissantes et droit au premier quartier, est maintenant incurvé vers la gauche. On aborde alors les phases gibbeuses croissantes, que l'on continue à observer systématiquement chaque jour. Pour faciliter la tâche des participants qui pouvaient avoir du mal à distinguer la phase de la Lune dans le ciel, le chercheur ajoute près de l'horizon une image agrandie de la Lune en utilisant la métaphore d'un télescope pointé vers la Lune et nous en montrant une image magnifiée (figure 13). Cette image nous suit jusqu'à la fin de la séquence d'observation et sera à nouveau utilisée une fois rendu dans l'espace.

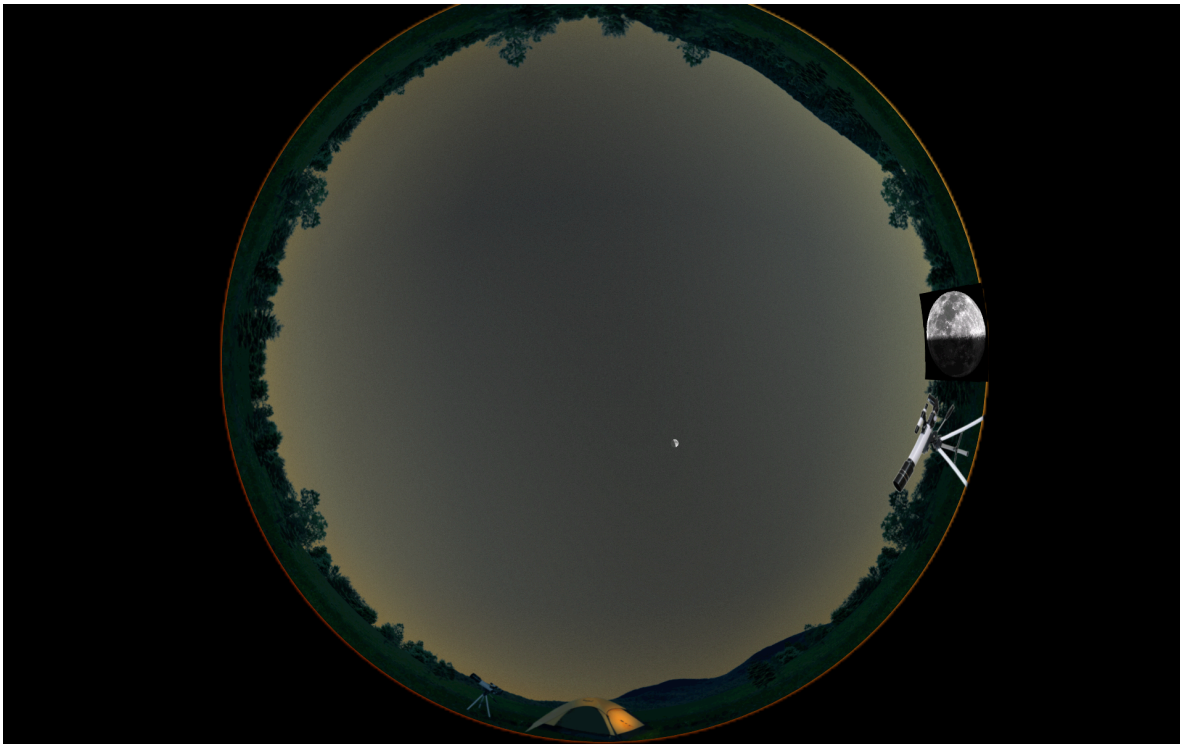


Figure 13. Le télescope et l'image agrandie de la Lune près de l'horizon ouest. (Source : Sky-Skan Inc.)

L'observation de la Lune se poursuit, le Soleil étant toujours sous l'horizon ouest et la Lune s'en éloignant de plus en plus. Près de la phase de la pleine Lune, la Lune est tout juste au-dessus de l'horizon est et disparaît sous l'horizon en passant au jour suivant la

pleine Lune. La disparition de la Lune derrière l'horizon provoque une réaction très intéressante de la part de Benoît :

Chercheur : On va aller à la journée suivante... Oh, là, j'ai un problème, par contre : la Lune vient de disparaître derrière les arbres...

Benoît : Ah, c'est la plei... c'est la nouvelle !

Benoît associe la disparition soudaine de la Lune à la phase de la nouvelle Lune suivant immédiatement la pleine Lune. Benoît s'inspire toujours de sa vision où la Lune se « remplit » de la nouvelle à la pleine Lune, puis disparaît ensuite presque instantanément en devenant nouvelle. C'était sa conception originale, qui aurait bien pu être renforcée par inadvertance par cet épisode de la pleine Lune disparue sous l'horizon. Heureusement, le chercheur fait tourner le ciel de quelques heures (jusqu'à minuit) par le mouvement diurne pour montrer que la Lune n'avait pas changé de phase, mais était simplement cachée par l'horizon, ce qui, espérons-le, a pu ébranler la conception naïve de Benoît.

À partir de là, l'observation quotidienne se poursuit avec une série de phases gibbeuses décroissantes. Le chercheur fait remarquer la courbure du terminateur et le fait que la Lune se rapproche maintenant du Soleil, alors qu'elle s'en éloignait durant les phases croissantes. Au dernier quartier, le chercheur rappelle le truc du « d » pour identifier le dernier quartier. L'observation se poursuit ensuite dans le ciel du matin avec une série de phases décroissantes de plus en plus minces, jusqu'à disparaître dans les lueurs du Soleil; c'est la nouvelle Lune.

Pour gagner du temps, le chercheur propose alors d'avancer en accéléré de quatre jours pour retrouver la Lune dans le ciel du soir. Il demande aux participants d'imaginer de quoi aura l'air la Lune dans quatre jours :

Chercheur : Si je vous pose la question, qu'est-ce que vous pensez que la Lune va avoir l'air quand on va la voir réapparaître après trois, quatre jours ?... Est-ce que vous avez une idée ?

Bernard : Elle va être au premier, euh, croissant ?

Chercheur : Elle va être un croissant ?

Bernard : Oui. Ouais, croissant.

Cette réponse correcte de Bernard indique qu'il a bien saisi le caractère cyclique des phases de la Lune. L'observation se poursuit encore quelques jours jusqu'au premier quartier, ce qui permet de boucler la boucle et de montrer un cycle complet des phases de la Lune. Finalement, en guise de récapitulation, le chercheur propose d'avancer dans le temps d'un mois supplémentaire en moins de deux minutes pour revoir en accéléré le déroulement de la séquence des phases de la Lune. Notons qu'au cours de cette récapitulation, la Lune est passée brièvement devant le Soleil, provoquant une éclipse totale de Soleil que le chercheur a promis de revoir depuis l'espace un peu plus loin durant la séance.

4.3.3 Analyse des fiches d'observation des phases de la Lune (calendrier lunaire)

Une analyse détaillée des calendriers lunaires utilisés dans le planétarium par les participants (voir annexe 4) montre que la majorité a bien suivi les instructions données dans la salle de réunion avant l'entrée sous le dôme pour noter l'aspect de la Lune (noircir la portion de la Lune invisible et laisser en blanc la partie visible). Contre toute attente, un participant a par contre fait le contraire (noircir les parties claires et laisser en blanc les parties sombres), tandis qu'un autre a alterné (noircir au lieu de laisser en blanc et vice-versa) sur deux dessins des phases gibbeuses croissantes. D'ailleurs, les principales difficultés des participants quant aux dessins de la Lune semblent liées aux phases gibbeuses : quelques participants n'ont pas dessiné le terminateur incurvé vers la gauche, mais ont simplement maintenu la courbe des phases croissantes d'avant le premier quartier (courbure vers la droite) en l'étendant sur une portion toujours plus grande du cercle. Un autre participant a dessiné tous ses terminateurs parfaitement droits, quelque soit la phase.

Malheureusement, le chercheur est incapable de dire quel calendrier lunaire a été rempli par qui, les participants n'ayant pas inscrit leur nom sur les feuilles.

Nous verrons toutefois que le « noircissement » des cercles du calendrier lunaire pour dessiner les différentes phases de la Lune sera adopté par une majorité de participants dans leurs réponses aux questionnaires post-tests, alors qu'ils n'ont à peu près pas utilisé cette technique en réponse aux questionnaires pré-tests (seul Louis l'a utilisé, et dans un dessin seulement).

4.3.4 Observation des phases de la Lune : améliorations à apporter

Après analyse des différentes traces recueillies au cours de la séance d'observation des phases de la Lune (transcription et calendriers lunaires), il nous semble que cette partie pourrait être améliorée de multiples façons, que nous détaillons dans ce qui suit.

Lors de la première démonstration du mouvement diurne du ciel, on pourrait projeter deux flèches au-dessus de l'horizon, une pointant vers le bas à l'est et l'autre pointant vers le haut à l'ouest, pour bien appuyer notre explication que c'est tout l'horizon qui se déplace, entraîné par la rotation de la Terre, et non pas le ciel qui tourne au-dessus de nos têtes. Une activité kinesthésique consistant à placer ses mains en œillères de chaque côté de la tête pour observer le Soleil tout en tournant sur soi-même vers la gauche serait également utile pour illustrer l'origine « terrestre » (rotation) du mouvement diurne. Bien que, de façon générale, les répondants n'aient eu aucune difficulté à décrire le mouvement diurne en invoquant la rotation de la Terre, l'utilisation de supports visuels pourrait tout de même répondre aux besoins d'élèves plus jeunes ou moins aux faits des mouvements de notre planète dans l'espace.

Au cours de cette séance, le Soleil était systématiquement placé sous l'horizon (est ou ouest) et il était par conséquent invisible lorsque venait le temps de dessiner la phase de la Lune. Il serait au contraire souhaitable de garder le Soleil visible dans le ciel (à quelques

degrés au-dessus de l'horizon) et ce, pour au moins trois raisons : d'abord, établir clairement le lien entre le côté éclairé de la Lune et la source de son illumination (c'est-à-dire le Soleil); deuxièmement, rendre plus saillant le fait que d'un jour à l'autre, la Lune s'éloigne du Soleil d'une quinzaine de degrés (ou s'en rapproche, lors des phases décroissantes); et troisièmement, renforcer le fait que la Lune est facilement observable en plein jour, un fait souvent méconnu ou simplement oublié par les participants. L'observation de la Lune en relation avec Soleil permettrait ainsi de systématiser davantage les observations des phases.

Rappelons que le calendrier lunaire utilisé par les participants leur permettait de noter, outre l'apparence de la Lune, la date et l'heure de leur observation. Bien qu'aucune observation précise recueillie en cours de séance ne nous permette de l'affirmer, nous croyons tout de même qu'il serait utile de noter également le nom de la phase de la Lune (Lune croissante, premier quartier, Lune gibbeuse croissante, etc.) afin d'associer l'apparence de la Lune au vocabulaire adéquat (et souvent méconnu des participants, comme le démontrent les réponses au questionnaire prétest no 5), de même que d'autres informations pertinentes, comme l'angle entre la Lune et le Soleil (voir commentaire au paragraphe suivant) et le moment de la journée où l'observation est faite (le jour ou la nuit, le soir ou le matin, etc.). Il serait également pertinent de demander aux participants d'indiquer leur nom sur le calendrier lunaire et de le recueillir à la fin de l'activité pour en faire une analyse individualisée. Enfin, pour faciliter la tâche des participants dans un environnement de faible luminosité, on pourrait refaire le calendrier lunaire pour qu'il comporte des cercles plus gros, afin qu'il soit plus facile d'y dessiner les phases de la Lune. Pour assurer l'uniformité des dessins, le chercheur devrait aussi jeter un coup d'œil aux premiers essais des participants et corriger le tir au besoin.

On pourrait fournir aux participants un instrument simple (à mi-chemin entre le rapporteur d'angles et le sextant) permettant de mesurer l'angle entre la Lune et le Soleil, instrument qu'ils et elles pourraient utiliser à tour de rôle avec un minimum de pratique. Une telle information, recueillie par les participants et notée sur leur calendrier lunaire, les

convaincrait selon nous davantage de l'éloignement systématique de la Lune du Soleil (ou de son rapprochement, lors des phases décroissantes) d'un jour à l'autre. Le chercheur a mentionné ce fait à quelques reprises en cours de séance, mais il aurait été préférable que cette observation découle de mesures prises par les participants eux-mêmes.

Le peu de traces recueillies durant la phase d'observation des phases de la Lune a constitué un frein important à l'analyse de l'évolution des conceptions des apprenants. Pour multiplier de telles traces, on pourrait fournir aux participants des feuilles supplémentaires, soit vierges, soit comportant des cercles à noircir (comme le calendrier lunaire qu'ils utilisent pour noter leurs observations), afin de leur permettre de dessiner leurs prédictions quant à l'aspect futur de la Lune, plutôt que de simplement y réfléchir. Cela mettrait à la disposition du chercheur des traces supplémentaires pour documenter l'évolution de leurs conceptions et permettrait aussi aux participants de mieux évaluer après coup la justesse de leur prédiction.

Il serait aussi utile de faire apparaître en toutes lettres sur le dôme les noms des différentes phases de la Lune au fur et à mesure qu'on les observe et d'en expliquer l'origine étymologique, selon le cas (par exemple, gibbeuse vient du bas latin gibbosus qui signifie bossu¹⁵) afin de répondre au besoin évident de certains participants d'apprendre le nom des différentes phases.

Un autre aspect de l'évolution des phases de la Lune a été passé sous silence et c'est seulement *a posteriori* qu'il nous est apparu important de faire remarquer aux participants que le terminateur se déplace toujours de la droite vers la gauche sur la face de la Lune (dans l'hémisphère nord). Il nous semble également important de leur faire remarquer que le terminateur est d'abord incurvé vers la droite lors des premières phases croissantes, droit au premier quartier, puis incurvé vers la gauche durant les phases gibbeuses jusqu'à la pleine Lune (l'ordre est le même pour les phases décroissantes). Cela découle directement

¹⁵ <http://www.cnrtl.fr/etymologie/gibbeux> (page consultée le 26 juillet 2012).

de la forme sphérique de la Lune et de son éclairage par le Soleil. Il nous semble que ces faits devraient impérativement être portés à l'attention des participants afin qu'ils les intègrent dans leurs observations des phases de la Lune. Une démonstration à l'aide d'une lampe de poche et d'un ballon blanc pourrait aussi être mise à profit sous le dôme du planétarium.

L'approche qui consistait à faire avancer la Lune d'un jour sans faire faire un tour complet au ciel comportait un certain risque de créer de la confusion chez les participants entre le mouvement diurne vers l'ouest (vers la droite) et le mouvement annuel de la Lune vers l'est (vers la gauche), confusion qui ne semble heureusement pas s'être matérialisée au cours de cette séance. Le chercheur s'interroge tout de même sur la pertinence d'une telle façon de faire et se demande s'il ne serait pas plus judicieux de continuer à faire tourner le ciel de 24 heures à chaque fois, quitte à accélérer considérablement le mouvement diurne afin de ne pas perdre trop de temps. Cela pourrait faire l'objet d'un test auprès d'un nouveau groupe de participants.

Autour de la pleine Lune, qui est un moment charnière entre les phases croissantes (Lune s'éloigne du Soleil) et décroissantes (Lune se rapproche du Soleil), le recours au mouvement diurne d'un jour à l'autre permettrait en outre d'illustrer le fait que la pleine Lune, qui se trouve alors à 180 degrés du Soleil dans le ciel, se lève au coucher du Soleil et se couche au lever du jour. L'observation de la Lune à minuit (comme nous l'avons proposé dans notre séance) masque ce fait, qui nous semble important. De plus, nous réalisons après coup que peu de participants ont eu l'occasion d'observer la Lune au milieu de la nuit; leurs observations, volontaires ou fortuites, ont vraisemblablement toujours lieu le matin, l'après-midi ou le soir, comme nous le rappelle un commentaire de Benoît concernant son observation de la Lune le matin en se rendant à l'école. Il serait donc préférable que la séance d'observation des phases de la Lune se colle davantage à l'expérience vécue par les participants dans leur quotidien.

De plus, notons qu'il est difficile à l'œil nu de déterminer à quel moment précis la Lune atteint sa phase pleine. Par contre, la mesure de la distance angulaire entre la Lune et

le Soleil, quoi que plus difficile à cette période du mois lunaire, devrait convaincre les participants que la Lune cesse alors de s'éloigner du Soleil et commence à s'en approcher durant les phases décroissantes.

Enfin, après avoir complété la séquence d'observation des phases de la Lune et dans le but de systématiser encore davantage les données recueillies par les participants, il serait intéressant de prendre une pause pour faire avec eux une récapitulation de ce que l'on vient de voir, afin de bien faire ressortir les faits saillants de leurs observations. Idéalement, il faudrait que les participants eux-mêmes analysent leurs calendriers lunaires et mentionnent les faits suivants (avec l'aide du chercheur et de questions incitatives appropriées) :

1. L'apparence ou l'aspect de la Lune change de façon progressive et cyclique. C'est ce qu'on appelle les phases de la Lune;
2. La Lune est croissante pendant la moitié du mois lunaire, puis décroissante pendant l'autre moitié du mois;
3. Les deux moments charnière entre les phases croissantes et décroissantes sont la pleine Lune et la nouvelle Lune;
4. L'angle entre la Lune et le Soleil est croissant de la nouvelle Lune à la pleine Lune, puis décroissant de la pleine Lune à la nouvelle;
5. Les phases croissantes de la Lune sont visibles en après-midi et en soirée, tandis que les phases décroissantes sont visible en fin de nuit et en matinée;
6. Durant les phases croissantes, la Lune est majoritairement éclairée à droite, tandis que durant les phases décroissantes, elle est majoritairement éclairée à gauche;
7. Les principales phases de la Lune sont, dans l'ordre : premier croissant, premier quartier, Lune gibbeuse croissante, pleine Lune, Lune gibbeuse décroissante, dernier quartier, dernier croissant, nouvelle Lune;
8. Le terminateur se déplace toujours de droite à gauche sur la face de la Lune;
9. Le terminateur est d'abord incurvé vers la droite pendant les premières phases croissantes, droit au premier quartier, puis incurvé vers la gauche jusqu'à la pleine Lune. C'est la même chose pour les phases décroissantes, de la pleine Lune à la nouvelle;
10. La Lune nous montre toujours la même face.

En appui à ce sommaire de nos observations, plusieurs éléments visuels projetés sur le dôme pourraient être mis à contribution comme autant d'échafaudages au profit des apprenants : d'abord, une série d'images tapissant le dôme montreraient les principales

phases de la Lune réparties le long d'un arc de cercle s'étirant de l'ouest vers l'est en passant au-dessus de l'horizon sud, d'abord en soirée (phases croissantes, de croissant à pleine Lune), puis en matinée (phases décroissantes, de pleine Lune à dernier croissant). Pour les raisons que nous avons invoquées plus haut, chaque phase devrait être accompagnée de sa dénomination et le Soleil devrait être bien visible dans tous les cas, à l'ouest pour les phases croissantes, puis à l'est pour les phases décroissantes. Ces illustrations serviraient à rappeler les points nos 1 à 7 ci-dessus.

D'autre part, la simulation en accéléré de la séquence des phases de la Lune qui conclue cette section devrait permettre d'attirer l'attention des participants sur le mouvement du terminateur et son orientation d'une phase à l'autre, de même que sur le fait que la Lune nous montre toujours la même face (points nos 8 à 10). Cette simulation devrait en outre permettre des arrêts à certains moments clé (pleine et nouvelle Lune, quartiers) pour favoriser une observation plus attentive et l'expression de commentaires de la part des participants.

En ce qui concerne le point no 10 (la face visible et la face cachée de la Lune et sa rotation sur elle-même), les quelques commentaires et questions des participants que nous rapportons dans le présent compte-rendu (voir par exemple la mention de la rotation de la Lune lors de la séance prétraitement) nous ont convaincu de l'importance d'aborder cette question, qui semble être une source de confusion dans l'esprit des jeunes, ou du moins constitue une source d'interrogation qui semble « polluer » leur réflexion à propos des phases de la Lune. Le chercheur n'a pas du tout abordé cette question au cours de cette séance, ce qui pourrait être fait dans une version ultérieure.

La réflexion du chercheur concernant la séance du 7 juillet l'amène également à s'interroger sur le bien-fondé de montrer une simulation d'éclipse de Soleil au beau milieu d'une séquence d'observation des phases de la Lune. Il suffirait simplement de choisir une autre date de départ pour éviter d'assister à un tel phénomène. Nos doutes viennent de notre crainte que l'éclipse aperçue puisse constituer une source de distraction pour les participants, qui risquent de ne pas bien saisir le lien entre les phases et les éclipses (lien qui

a beaucoup plus à voir avec leurs conceptions naïves concernant le mécanisme des phases de la Lune qu'avec un quelconque rapport fonctionnel entre les deux phénomènes). D'autre part, cela nous oblige à reparler des éclipses plus tard en cours de séance, ce qui prend un temps précieux qui pourrait au contraire être consacré à l'observation plus détaillée des phases de la Lune, ou encore à l'observation des phases de certains satellites de Jupiter, observations qui seraient sans doute beaucoup plus « payantes » sur le plan didactique en permettant un réinvestissement immédiat, dans des situations similaires à celle de la Terre et son satellite, de nos connaissances nouvellement acquises à propos du mécanisme des phases en général.

Finalement, il serait utile que, durant la phase de récapitulation, le chercheur demande aux participants de dire dans leurs mots comment ils expliquent les phases de la Lune que nous venons d'observer. Ce serait une bonne façon de multiplier les traces et de documenter une éventuelle évolution de leurs conceptions depuis leurs réponses aux questionnaires pré-tests. Il serait en effet surprenant que l'observation systématique des phases n'ait pas modifié leurs conceptions (vers le modèle scientifique ou autrement), même légèrement, ne serait-ce qu'en donnant aux participants accès à de nouvelles images mentales et à un nouveau vocabulaire.

Terminons par un bémol : si toutes les améliorations que nous venons d'évoquer sont mises en pratique, il existe un danger réel que cela n'alourdisse indûment une séance déjà longue et assez complexe pour les participants. Ce sera donc la responsabilité du chercheur, lors d'une mise à l'essai subséquente, de hiérarchiser les améliorations proposées pour, peut-être, ne retenir que celles qui bonifient l'expérience sans trop l'allonger ou l'alourdir. Cela pourrait aussi mener à la scission de l'intervention didactique en deux ou trois séances présentées à quelques jours d'intervalle.

4.3.5 Le mécanisme des phases de la Lune « démonté »

Une fois complétée la section consacrée à l'observation des phases de la Lune, et avant de s'élancer dans l'espace pour observer la Lune et ses mouvements depuis un autre point de vue que celui que nous avons depuis la surface de la Terre (géocentrique), le chercheur rappelle ce qu'il faut expliquer – la séquence des phases de la Lune telle que l'on vient de l'observer – et fournit trois clés pour comprendre l'explication qui sera proposée par la suite : la Lune est une sphère, elle est éclairée par le Soleil et elle tourne autour de la Terre. La coordination adéquate de ces trois faits (avec lesquels les participants ne semblaient pas avoir de difficulté dans leurs réponses aux pré-tests) devrait leur permettre de construire une explication adéquate des phases de la Lune.

Du point de vue des améliorations possibles à apporter à cette courte section, des éléments visuels – illustrations, icônes, photos ou autres – en appui aux trois idées phares décrites précédemment, projetés sur le dôme au moment où le chercheur les évoque, seraient sans doute bénéfiques en créant chez les participants des images mentales associées au discours du chercheur. Ces éléments visuels pourraient également être repris plus tard lorsque ces trois grandes idées seront à nouveau évoquées.

4.3.6 Décollage et vers la Lune

Le chercheur annonce ensuite que le planétarium va se transformer en un vaisseau spatial à bord duquel nous allons nous rendre dans l'espace observer la Lune de près et tenter de comprendre comment se produisent les phases que nous avons observé de la Terre. L'objectif de ce voyage virtuel dans l'espace était d'observer le mouvement orbital et les phases de la Lune d'un autre point de vue que celui, géocentrique, qui était le nôtre lorsque nous avons observé la Lune en début de séance. Ce second point de vue allocentrique devrait, en théorie, permettre aux participants de construire une image mentale forte du mécanisme à l'œuvre derrière le phénomène des phases de la Lune.

Le décollage simulé nous amène d'abord en orbite basse au-dessus de la Terre. Le chercheur fait remarquer que la Terre est une sphère et qu'elle est éclairée par le Soleil, visible au loin, ce qui explique le côté jour et le côté nuit de la Terre (où transparaissent des points de lumière qui indiquent la présence des villes et de leur pollution lumineuse).

En tant qu'objet sphérique éclairé par le Soleil, la Terre constitue un excellent exemple que l'on aurait intérêt à exploiter davantage dans une version améliorée de notre séance. On pourrait par exemple se mettre en orbite autour de la Terre pour l'observer pendant une à deux minutes, puis montrer en accéléré une rotation complète de notre planète, quitte à ajouter un marqueur à la position de Montréal pour bien illustrer l'origine du phénomène du jour et de la nuit.

Notre vaisseau se tourne ensuite vers la Lune et s'y dirige à grande vitesse, jusqu'à frôler la surface pour nous placer en orbite autour de la Lune. C'est l'occasion d'observer que la Lune est elle aussi une sphère, comme la Terre, et que la lumière du Soleil n'en éclaire qu'une moitié. Il y a donc toujours une moitié de la Lune éclairée et une moitié sombre.

La notion de face cachée de la Lune surgit ici pour la première fois dans une question de Benoît (« Est-ce qu'on voit la face cachée ? »), mais rappelons qu'il en avait été question indirectement plus tôt en séance prétraitement lorsque les participants avaient évoqué la rotation de la Lune sur elle-même à l'aide de balles et de ballons. Il en sera fait mention également plus tard, toujours par Benoît. Il nous semble que cette question de la face cachée de la Lune devrait être abordée au sein d'une séance à propos des phases de la Lune pour bien la dissocier du mécanisme des phases lui-même. L'évocation des montagnes lunaires et des mers, que l'on voit clairement en orbite autour de notre satellite, pourrait être l'occasion de parler de la face visible et de la face cachée de notre satellite.

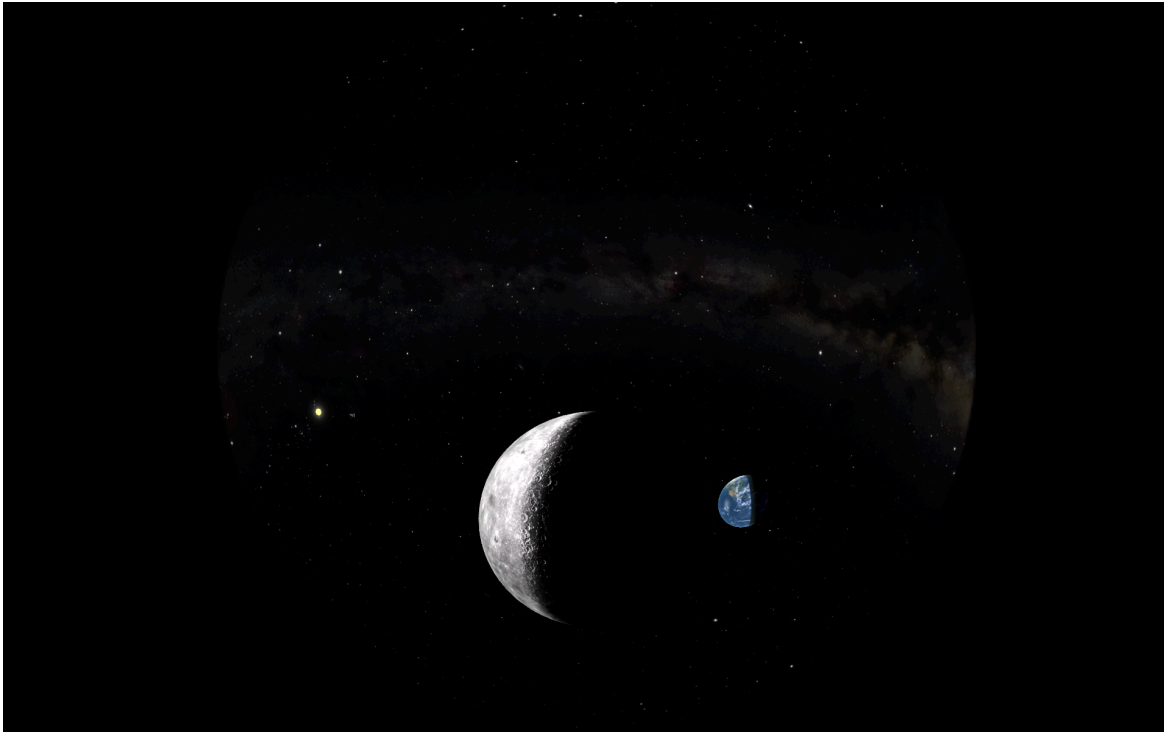


Figure 14. La Lune et la Terre vues de l'espace et éclairées par le Soleil, à gauche.
(Source : Sky-Skan Inc.)

En orbite autour de la Lune, nous apercevons côte-à-côte notre satellite et la Terre située plus loin, mais toutes deux éclairées par la gauche par le Soleil (figure 14), ce qui renforce les idées que la Terre et la Lune sont deux sphères éclairées par le Soleil. Cela donne lieu à un échange intéressant :

Benoît : Ça fait que dans le fond, le Soleil éclaire les deux en même temps, la Terre puis la Lune ?

Chercheur : Absolument ! En fait, tout les objets dans le système solaire, ils sont éclairés par une chose, c'est le Soleil, le Soleil est la seule source de lumière dans le système solaire.

Bernard : Bien, y'en a d'autres, mais c'est la plus proche...

Chercheur : Bien, c'est à dire que dans le système solaire, c'est la seule !

Bernard : Ah, oui !

Chercheur : Parce que les autres étoiles ne sont pas dans le système solaire, elles sont loin, loin, loin !

Benoît : Mais admettons qu'il y avait une étoile qui atterrissait juste à côté de la Terre, ça ferait comme un deuxième Soleil ?

Chercheur : Exactement !

Le commentaire incrédule de Benoît concernant le Soleil qui éclaire à la fois la Terre et la Lune est révélateur du fait qu'il n'a jamais considéré le Soleil comme l'unique source de lumière dans le système solaire. Son évocation des autres sources de lumière (les étoiles, croit-on dans ce cas-ci, le Soleil étant la plus proche) ou d'un second Soleil qui « atterrissait » près de la Terre, soutiennent notre interprétation.

Une amélioration possible qui répondrait à l'interrogation de Benoît consisterait à « éteindre » simultanément le Soleil, la Terre et la Lune, puis à les « rallumer » pour les voir réapparaître, renforçant le lien de causalité entre le Soleil, source de lumière, et l'illumination de la Terre et de la Lune. Il serait également souhaitable d'indiquer que les autres étoiles qui forment l'arrière-plan de la scène sont situées à des distances astronomiques et ne contribuent donc pas à l'illumination de la Terre et de la Lune. Cela pourrait se faire en « éteignant » brièvement le ciel étoilé pour ne conserver que le Soleil, la Terre et la Lune.

4.3.7 L'orbite lunaire

Après avoir complété une orbite autour de la Lune, le chercheur rappelle ce que nous venons de constater, à savoir la forme sphérique de la Lune et son éclairage par le Soleil. On aurait pu ici réutiliser les icônes ou illustrations avec lesquelles on a déjà souligné les trois notions principales pour expliquer les phases de la Lune, peut-être avec

un crochet vert sur les deux premières pour bien montrer que le cas de la Lune sphérique éclairée par le Soleil est « réglé ».

Il reste maintenant à aborder la troisième clé pour comprendre le mécanisme des phases de la Lune, c'est-à-dire le fait que la Lune est en orbite autour de la Terre. Pour cela, le chercheur annonce que nous allons nous éloigner de la Terre et de la Lune suffisamment pour embrasser du regard l'orbite la Lune autour de la Terre (figure 15).

Une fois arrivé, le chercheur fait avancer la Lune sur son orbite et propose aux participants de s'imaginer sur Terre (au pôle nord, par exemple) et d'essayer de deviner de quoi la Lune aura l'air et comment son apparence changera au fur et à mesure qu'elle avance sur son orbite. Il rappelle que la Lune est toujours éclairée par le Soleil, ce qui fait que la moitié visible de la Lune est toujours tournée vers notre étoile. Mais vue de la Terre, cette moitié visible nous apparaît sous différents angles... Pour aider les participants, le chercheur ajoute à la scène une image qui montre l'aspect de la Lune vue depuis la Terre en temps réel (voir figure 15) et il leur fait remarquer que l'aspect de la Lune change exactement comme quand ils avaient observé les phases de la Lune en début de séance.

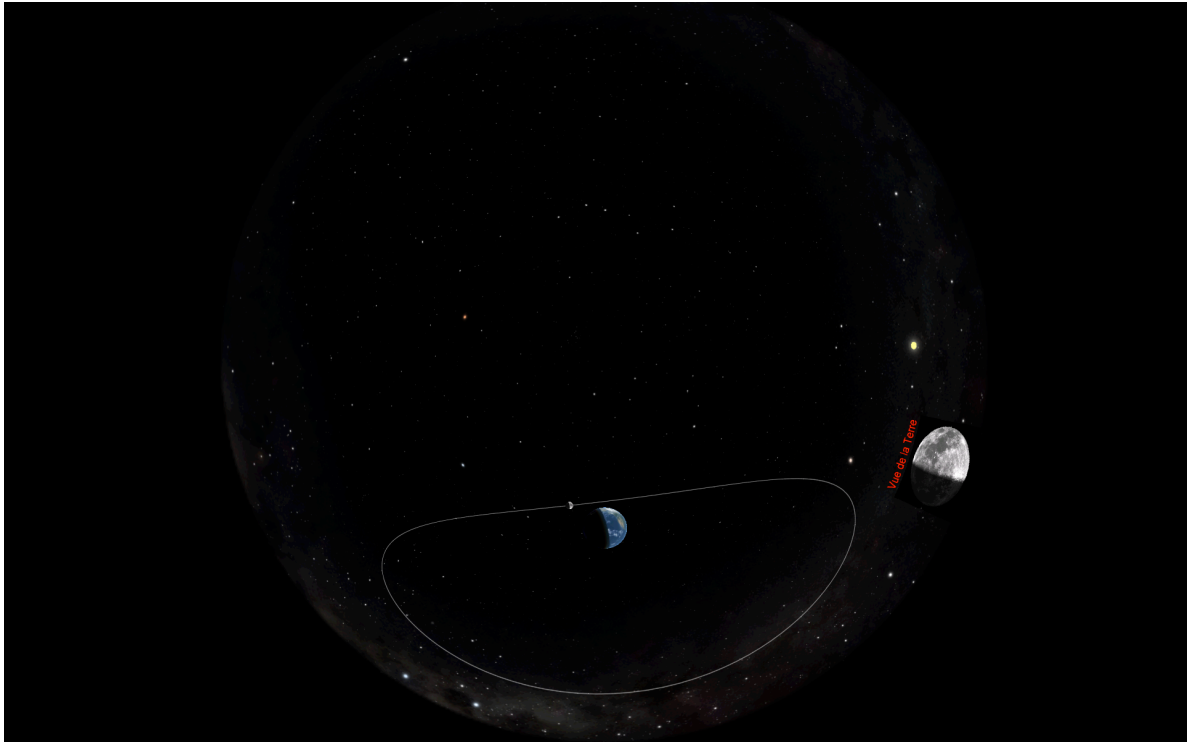


Figure 15. L'orbite de la Lune autour de la Terre, avec l'incrustation de l'image de la Lune telle que vue de la Terre. La Lune est au premier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)

À deux reprises durant cette section, Benoît fera des commentaires à propos du fait que la Lune tourne sur elle-même tandis que le Soleil l'éclaire :

Benoît : Bien dans le fond, c'est comme si la Lune « faisait le bacon », ça fait que dans le fond, elle se faisait tourner.

Puis, un peu plus tard :

Benoît : Puis là, elle se laisse griller, en « faisant le bacon », puis elle se tourne d'un bord [suite inaudible, on entend les mots « la façon dont elle... sa rotation »].

Ces évocations de la rotation de la Lune par Benoît (l'expression « faire le bacon » faisant référence au fait de se faire bronzer en se retournant de temps à autres) nous font

croire qu'il cherche à établir un lien entre les phases de la Lune et la rotation de notre satellite sur lui-même... Benoît reviendra d'ailleurs à la charge plus tard, lorsque les participants simuleront les phases à l'aide d'une boule blanche représentant notre satellite. Ces commentaires nous indiquent qu'il serait important de démystifier le phénomène de rotation de la Lune et de montrer que la rotation de notre satellite sur lui-même n'a rien à voir avec le mécanisme des phases de la Lune.

Selon le point de vue spatial particulier choisi par le chercheur pour observer la révolution de la Lune autour de la Terre (à l'extérieur et légèrement au-dessus du plan de l'orbite lunaire, « derrière » la position du dernier quartier et avec le Soleil à droite), il persiste une difficulté importante pour les apprenants dans leur tentative de réconcilier ce que l'on voit de l'espace et l'aspect de la Lune vue de la Terre. Cela ne pose pas de problème pour la Lune au premier quartier, qui a exactement la même apparence vue de l'espace que l'image vue de la Terre (voir figure 15). À la nouvelle et à la pleine Lune, on voit une partie suffisamment grande de la portion de la Lune tournée vers la Terre pour deviner l'apparence de la Lune vue de la surface terrestre. Mais le dernier quartier est certainement problématique, puisqu'à cette phase particulière et à notre position précise dans l'espace, la partie tournée vers la Terre nous tourne le dos et cela rend difficile pour les apprenants le fait de deviner son aspect, d'autant plus que de notre point de vue spatial, la Lune ressemble toujours à un premier quartier (figure 16).

Idéalement, il faudrait laisser dériver le Soleil à travers le dôme de droite à gauche au cours de trois à quatre révolutions lunaires pour que notre point de vue sur les phases change, ou encore observer la révolution d'un point de vue, puis nous déplacer de 180 degrés autour de l'orbite lunaire pour observer le mouvement orbital « de l'autre côté » de la Terre. Dans une perspective de recherche de développement, les deux scénarios pourraient faire l'objet de tests comparatifs pour déterminer l'approche la plus fructueuse.

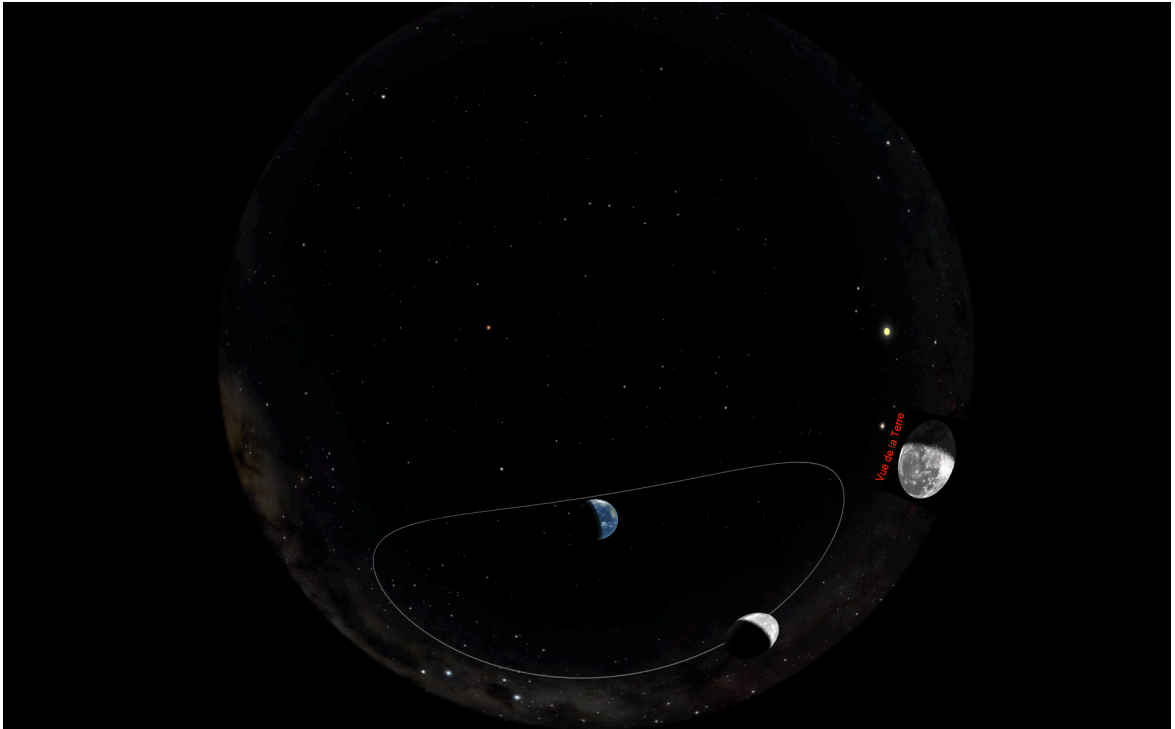


Figure 16. Au dernier quartier, selon le point de vue choisi, la Lune vue de l'espace ressemble à un premier quartier, tandis que son aspect vu de la Terre est bien celui du dernier quartier. Cette situation a semblé confondre les participants. (Source : Sky-Skan Inc.)

4.3.8 Vue polaire

Le chercheur propose ensuite de déplacer le vaisseau spatial pour aller se placer loin au-dessus du pôle nord de la Terre, afin d'observer le mouvement orbital de la Lune depuis ce point de vue particulier (figure 17). L'objectif était d'offrir un autre regard sur la Lune et son mouvement orbital autour de la Terre afin de voir à l'œuvre le mécanisme des phases de la Lune. Dans cette séquence, le mouvement orbital de la Lune est régulièrement interrompu afin que la Lune s'arrête d'abord à ses positions de quartiers, de pleine et de nouvelle Lune, puis à ses positions de croissants et de Lune gibbeuse. À chaque fois, les participants sont invités à choisir parmi les photos plastifiées des phases de la Lune laquelle

représente l'aspect de la Lune vue de la Terre (sa phase), après quoi une « photographie » prise par un observateur terrestre apparaît sur le dôme, permettant de déterminer si les répondants ont fait le bon choix. Pour aider les participants à s'imaginer sur la Terre en train de regarder la Lune, le chercheur fait apparaître sur la Terre une image du même télescope qui était pointé vers notre satellite lors de la phase d'observation systématique des phases de la Lune.



Figure 17. Vue polaire de l'orbite de la Lune autour de la Terre avec la Lune au premier quartier. La lettre N sur la Terre indique la position du pôle nord terrestre et le télescope pointe en direction de la Lune au premier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)

Ici, le chercheur utilise abondamment son pointeur laser pour attirer l'attention des participants sur la portion de la Lune qui est visible de la Terre, c'est à dire essentiellement la partie du périmètre de la Lune inscrite à l'intérieur de l'orbite lunaire. Mais étant donné des problèmes d'échelle liés au fait que le diamètre de la Terre et de la Lune ont été artificiellement agrandis (de six à sept fois) sans que la distance Terre Lune ne soit

modifiée, et aussi à l'utilisation d'une image du télescope trop grande par rapport au diamètre de la Terre et dont l'angle d'inclinaison pouvait être trompeur, il était probablement difficile pour les participants de bien comprendre ce qu'ils devaient regarder. Il aurait peut-être été plus intéressant d'utiliser un demi-cercle coloré ceinturant la portion du périmètre lunaire tournée vers la Terre, ou encore un triangle ayant sa pointe sur Terre et sa base sur la partie de la Lune visible de la surface terrestre, pour bien montrer quelle portion de la Lune est visible de notre planète.

Malgré ces difficultés, les participants n'ont pas eu trop de mal à reconnaître le premier quartier de Lune. Il faut dire qu'en vue polaire, avec le Soleil à droite, la Lune à cette position sur son orbite a exactement l'apparence d'un premier quartier... Pas de problème non plus pour reconnaître la pleine Lune (toute la surface éclairée de la Lune tournée vers la Terre) et la nouvelle (toute la surface sombre tournée vers la Terre).

La reconnaissance du dernier quartier est toutefois plus problématique. S'imaginer en train d'observer cette phase depuis la Terre dans notre position spatiale actuelle (vue polaire, Soleil à droite de l'orbite lunaire) pose clairement un problème aux participants (figure 18). Il faut non seulement s'imaginer sur Terre et tourner notre regard dans le plan de l'orbite lunaire, mais en plus, il faut s'imaginer observant la tête en bas... Il aurait peut-être été plus instructif de changer momentanément de perspective en déplaçant notre vaisseau spatial pour aller se placer de l'autre côté de la Terre et ainsi réconcilier la vue de la Lune au dernier quartier que nous avons depuis l'espace avec ce que l'on en voit de la Terre... et montrer que ce serait alors le premier quartier qui nous semblerait à l'envers !

Après l'observation des quartiers et de la pleine et de la nouvelle Lune en vue polaire, le chercheur fait avancer la Lune de sa position de nouvelle Lune à un mince croissant et met au défi les participants de reconnaître de quelle phase il s'agit. La réponse correcte ne se fait pas attendre, confirmant que les participants commencent à saisir le mécanisme des phases de la Lune. La Lune gibbeuse croissante et la décroissante sont

également bien reconnues. Benoît a par contre du mal à se souvenir de la nomenclature, parlant de Lune « nébuleuse » croissante et décroissante...

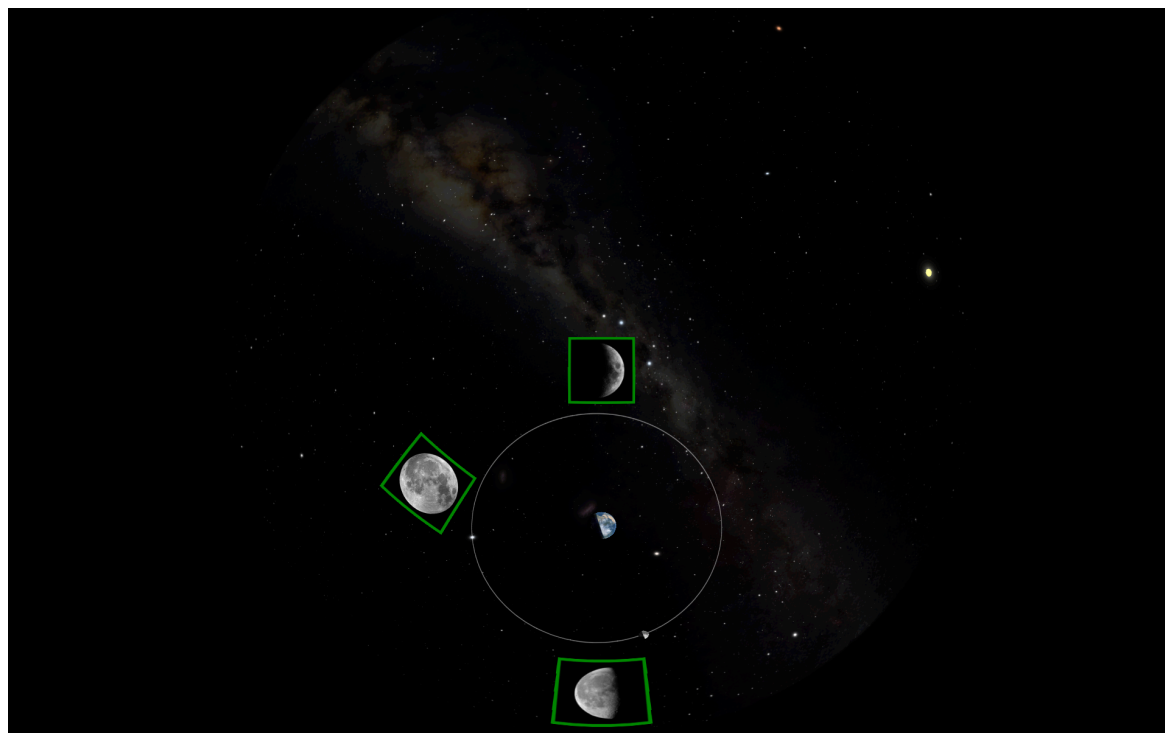


Figure 18. Vue polaire de l'orbite de la Lune autour de la Terre avec la Lune au dernier quartier. On remarque que, vue de l'espace, la Lune ressemble encore à un premier quartier, tandis que, vue de la Terre (image encadrée en vert au bas de l'écran), il s'agit bien du dernier quartier. (Source : Sky-Skan Inc.)

Avec le recul que permet l'analyse des réactions et des difficultés vécues par les participants durant cette section de notre séance, il nous apparaît que la vue polaire de l'orbite lunaire est source de confusion chez les participants et présente une difficulté à laquelle nous ne nous attendions pas. En effet, dans la scène précédente, il était relativement simple de s'imaginer sur Terre regardant la Lune tourner autour de notre planète, puisque le mouvement orbital se faisait à peu près dans le même plan que celui où nous nous trouvions (une simple translation était alors suffisante pour s'imaginer sur Terre regardant la Lune). Mais en vue polaire, il faut non seulement s'imaginer sur Terre, mais

aussi imaginer que l'on tourne notre regard de 90 degrés pour se retrouver dans le plan de l'orbite lunaire (qui est alors perpendiculaire à notre ligne de visée). À cause de cela, le passage de la vue en plan à la vue polaire demande sans doute des précautions supplémentaires. Par exemple, une transition entre la vue en plan et la vue polaire, utilisant la simulation de la rotation et de la révolution de la Lune pour démystifier la face cachée de la Lune, constituerait peut-être une solution efficace.

De plus, l'utilisation des photographies plastifiées montrant les principales phases de la Lune a créé beaucoup de confusion chez les participants à cause de la grande ressemblance entre les quartiers, les croissants et les phases gibbeuses, surtout dans un environnement sombre où il était difficile de déterminer la bonne orientation des photos (orientation qui n'a jamais été mentionnée par le chercheur ou les participants). Il aurait été plus adéquat de demander aux participants de dessiner la Lune telle qu'ils croyaient qu'elle apparaîtrait à un observateur sur Terre, pour ensuite comparer leur dessin avec la « photo » prise par l'observateur terrestre. En outre, ceci aurait créé des traces utiles à l'analyse du chercheur. Sinon, l'utilisation de feuilles plastifiées montrant de simples silhouettes des principales phases (un croissant, un quartier, etc.) aurait créé moins de confusion.

Dernier point à mentionner, l'observation du mouvement orbital de la Lune en vue polaire serait l'occasion idéale pour faire remarquer aux participants que la Lune tourne autour de la Terre dans le sens inverse des aiguilles d'une montre...

4.3.9 Récapitulation

Avant de poursuivre, le chercheur propose aux participants une rapide récapitulation des trois notions clés pour comprendre les phases de la Lune (Lune sphérique, éclairée par le Soleil et en orbite autour de la Terre) et tente de rendre explicite la manière dont ces trois éléments se combinent pour donner naissance au phénomène des phases de la Lune : il y a toujours une moitié de la Lune éclairée par le Soleil et une moitié sombre; tandis que la Lune tourne autour de la Terre, nous voyons la moitié éclairée de la Lune sous différents

angles; puisque la Lune est une sphère, la frontière entre la moitié éclairée et la moitié sombre, le terminateur, est la plupart du temps incurvé. En s'avancant sur son orbite, la Lune est d'abord croissante (la moitié éclairée se révèle de plus en plus à nous) jusqu'à la pleine Lune, puis décroissante (la moitié éclairée se dérobe) jusqu'à la nouvelle Lune.

Ici, le chercheur aurait eu avantage à être moins pédagogue et laisser aux participants le soin de décrire dans leurs mots le mécanisme des phases de la Lune, ce qui aurait créé de nouvelles traces pour suivre leur évolution conceptuelle. On aurait aussi pu afficher à nouveau les icônes rappelant les trois facteurs à l'origine des phases de la Lune.

4.3.10 Les éclipses

Le chercheur annonce qu'avant de retourner sur Terre, nous allons observer deux autres phénomènes qui sont reliés au fait que la Lune tourne autour de la Terre, les éclipses de Soleil et de Lune. Notre vaisseau spatial se met alors en position pour observer les éclipses, à commencer par une éclipse de Soleil (figure 19).

Le chercheur fait remarquer à quel point la Terre, la Lune et le Soleil sont parfaitement alignés et demande quelle est la phase de la Lune à ce moment précis. La réponse ne se fait pas attendre : « C'est la nouvelle Lune, celle où il n'y a rien ! ». Le chercheur souligne que la Lune est un objet solide et opaque qui projette une ombre derrière elle et que si cette ombre touche la Terre, cela produit une éclipse de Soleil, ce qui est précisément ce que l'on observe.

Une fois l'éclipse de Soleil terminée, le chercheur annonce qu'il se produira deux semaines après une éclipse de Lune et que l'on va donc avancer dans le temps de deux semaines tout en se positionnant pour observer l'ombre de la Terre recouvrir notre satellite. Lorsque le chercheur demande à quelle phase de la Lune une éclipse de Lune peut se produire, Maude répond spontanément : « Euh... euh, la pleine ! », une réponse que d'autres reprennent en écho. Encore une fois, on voit que l'identification des phases pleine et nouvelle ne pose plus de problème aux participants.

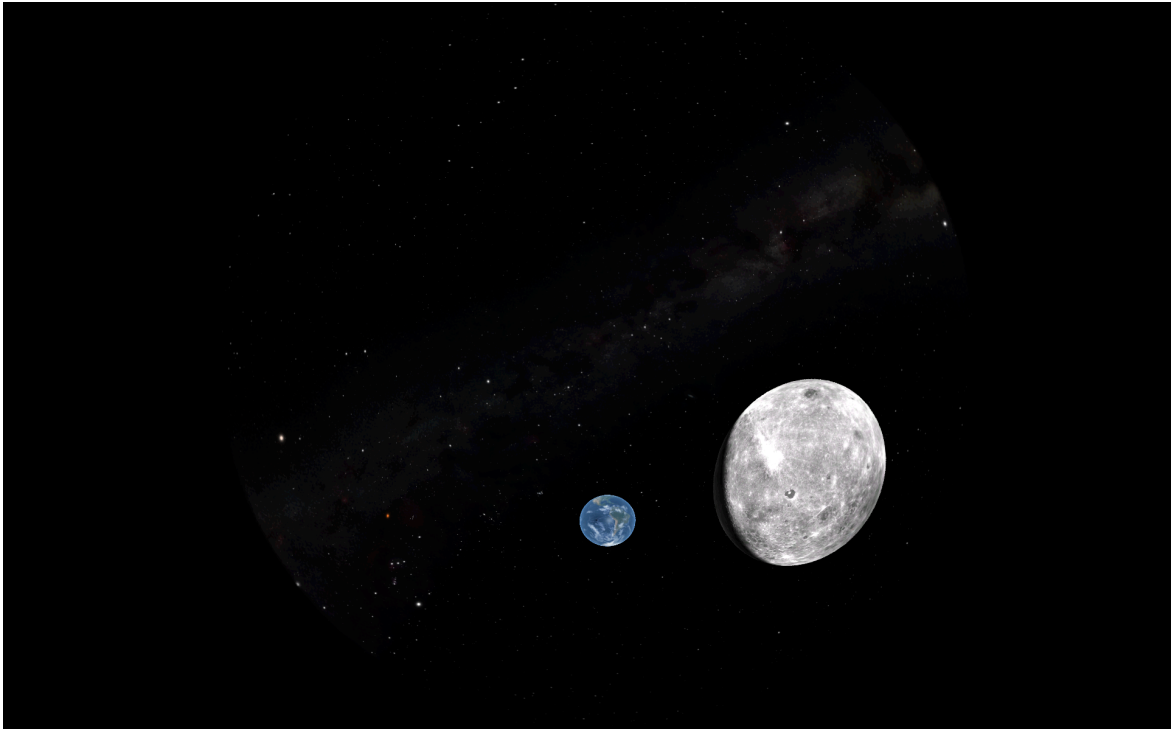


Figure 19. Lors d'une éclipse totale de Soleil, la Lune projette son ombre sur la Terre, qui apparaît comme un petit point noir à gauche du centre du disque terrestre. Le Soleil est derrière nous, hors de l'image. (Source : Sky-Skan Inc.)

Avec le recul de l'analyse, il nous semble que cette section consacrée aux éclipses crée peut-être plus de confusion qu'elle ne clarifie les concepts concernant les phases et les éclipses. De toutes façons, il nous semble superflu d'observer les éclipses alors que ce temps serait mieux employé à illustrer le mécanisme des phases des satellites de Jupiter ou celles de Vénus ou de Mercure, par souci de réinvestissement de ce qui vient d'être appris à propos de la Lune.

4.3.11 Retour sur Terre

Le chercheur annonce que l'on va retourner se poser sur Terre pour observer les phases de la Lune en accéléré une dernière fois. Ce retour a pour but de permettre aux

participants de revoir la séquence des phases afin de réconcilier ce que l'on voit sur Terre avec ce que nous savons désormais à propos du mouvement orbital de la Lune, de sa forme sphérique, du fait qu'elle est éclairée par le Soleil et du mécanisme qui combine ces trois facteurs pour donner naissance aux phases.

Une fois posé sur Terre, le chercheur propose de regarder encore une fois les phases de la Lune pendant un mois en accéléré. De la pleine Lune, on voit la Lune décroître, ce qui est dû au fait que la Lune se rapproche du Soleil et que l'on voit une fraction de plus en plus petite de la moitié de la Lune éclairée par le Soleil. À la nouvelle Lune, toute la moitié éclairée nous tourne le dos, ce qui fait que la Lune est invisible. Puis, la Lune s'éloigne à nouveau du Soleil, elle croît au fur et à mesure que l'on voit une portion plus grande de sa moitié éclairée, jusqu'à la pleine Lune.

4.3.12 Modélisation des phases de la Lune

Le chercheur propose ensuite de modéliser le mécanisme des phases de la Lune sous le dôme à l'aide de boules blanches, qui représentent la Lune, et d'une puissante lampe de poche qui représente le Soleil. La tête des participants représente bien sûr la Terre. En tenant la boule devant eux à bout de bras et en tournant sur eux-mêmes vers la gauche tandis que la boule est éclairée par la lampe, les participants devaient voir se succéder sur la boule les mêmes phases qu'ils ont observées à plusieurs reprises depuis le début de la séance.

En cours d'activité, Benoît a eu ce commentaire intéressant, en parlant de sa boule blanche : « Mais j'ai beau la tourner, ça fait rien ! » En effet, si on faisait tourner la Lune sur elle-même sans la bouger par rapport à la lampe, sa phase ne changeait pas. Benoît semble encore se questionner à propos du lien entre les phases de la Lune et la rotation de notre satellite. Si le chercheur avait capté ce commentaire au vol, ç'eût pu être l'occasion de démystifier cet aspect du mouvement de la Lune et de démontrer qu'il n'y a pas de lien entre les phases et la rotation de la Lune sur elle-même.

Malheureusement, avec le recul, le chercheur se rend compte que cette modélisation des phases à l'aide des boules blanches a souffert du fait qu'il y avait deux sources de lumière sous le dôme, la lampe tenue par le chercheur (représentant le Soleil) et le projecteur vidéo central. Le problème était déjà apparu lors d'un test précédent en compagnie de Patrice Potvin, mais le chercheur avait mis la difficulté sur le compte de l'utilisation à l'époque d'une lampe de plus faible intensité. Il s'avère que même avec une lampe plus puissante, il est difficile de remarquer la phase sur la boule blanche, éclairée de deux côtés à la fois. Toute cette section aurait donc avantage à se dérouler dans la salle de réunion, ce qui permettrait de consacrer tout le temps passé sous le dôme à observer le mécanisme des phases, celles de la Lune et d'autres astres comme Vénus, Mercure et les satellites de Jupiter.

4.3.13 Les phases de Vénus

Le chercheur propose ensuite de décoller à nouveau pour retourner dans l'espace, cette fois en direction de la planète Vénus, qui montre elle aussi des phases vues de la Terre. Le but de cette section est de réinvestir les connaissances nouvellement acquises à propos du mécanisme des phases de la Lune dans un contexte différent, dans ce cas-ci la planète Vénus. Parce que Vénus est une sphère éclairée par le Soleil et que son orbite est inscrite à l'intérieur de l'orbite terrestre, elle nous présente sa moitié éclairée sous différents angles, selon sa position par rapport à la Terre et au Soleil, et donc des phases, comme notre satellite.

Pour observer les phases de Vénus, le chercheur a choisi de se positionner loin au-dessus du pôle nord du Soleil, suffisamment loin pour englober du regard les orbites de Mercure, Vénus et la Terre (figure 20). Des positions spécifiques de Vénus et de la Terre sur leurs orbites respectives ont été programmées à l'avance pour observer Vénus en conjonction inférieure et supérieure (Vénus entre la Terre et le Soleil et derrière le Soleil, respectivement) et en élongation maximale est et ouest (Vénus à angle droit à gauche et à

droite du Soleil, respectivement). À chaque fois, le chercheur demande aux participants de déterminer la phase de Vénus vue de la Terre. Pour les aider, le chercheur utilise à chaque fois son pointeur laser pour mettre en évidence la portion de la moitié éclairée de Vénus visible de la Terre et la portion de sa moitié sombre. Pour faciliter l'observation, le chercheur a également grossi les diamètres de Vénus et de la Terre de 600 fois.

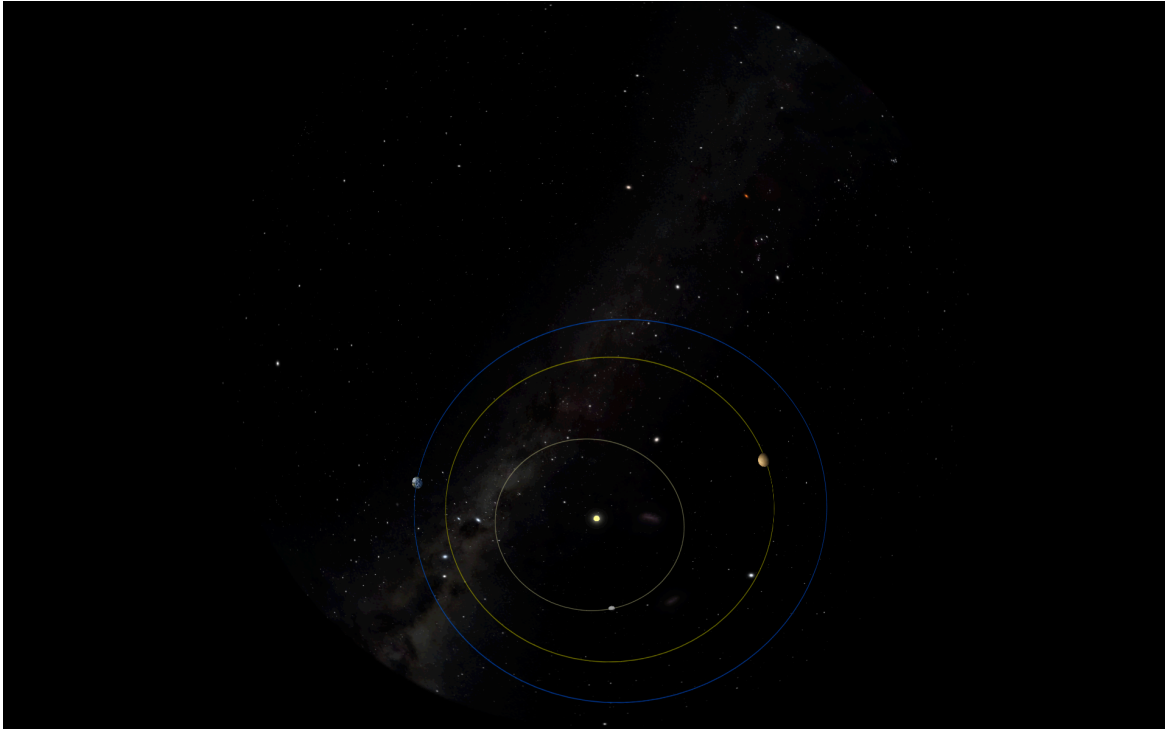


Figure 20. Vue polaire des orbites des planètes inférieures et de la Terre pour l'observation des phases de Vénus et de Mercure. (Source : Sky-Skan Inc.)

Les participants n'ont pas eu trop de mal à reconnaître les différentes phases de Vénus, ce qui témoignait de leur familiarité croissante avec le phénomène des phases et son mécanisme. La pleine Vénus (conjonction supérieure) et la nouvelle (conjonction inférieure) ont été reconnues d'emblée, tandis que les croissants et les quartiers (élongations est et ouest et positions intermédiaires) leur ont donné un peu plus de fil à retordre, surtout pour déterminer quel côté de Vénus était éclairé et quel côté était sombre. Le chercheur s'est même permis d'arrêter Vénus à des positions moins évidentes où elle

apparaissait gibbeuse sans que cela ne pose de grandes difficultés aux participants. Le chercheur a même assisté à un réinvestissement spontané de la part de Bernard :

Bernard : Mais est-ce que ça marche aussi pour euh... Pour Mercure ?

Chercheur : Ça marche absolument pour Mercure, d'ailleurs regarde, je viens de l'agrandir [d'un facteur 600, comme Vénus et la Terre], là, imagine que tu es sur Terre et que tu regardes vers Mercure, tu vois une bonne partie de la surface éclairée, puis tu vois un petit bout de la partie qui n'est pas éclairée, ça fait que ça donnerait une Mercure gibbeuse. C'est exactement la même chose !

Bernard a fait ici preuve d'une véritable avancée conceptuelle lorsqu'il a réinvesti lui-même ce qu'il sait du mécanisme des phases de la Lune et de Vénus au cas de Mercure, qui montre elle aussi des phases.

Pour illustrer cette section, le chercheur n'a malheureusement pas eu accès à temps à un programme qui aurait permis de pointer une caméra virtuelle vers Vénus, comme on l'avait fait pour la Lune vue de la Terre, afin de voir les phases de Vénus telles qu'elles apparaissent à un observateur terrestre. Le chercheur a donc dû faire appel à l'imagination des participants sans pouvoir montrer l'apparence réelle de Vénus vue de la Terre tandis que les deux planètes avançaient sur leurs orbites respectives. Ce script est maintenant disponible et fonctionne très bien, ce qui permettra son utilisation lors d'un éventuel test subséquent. Ceci étant dit, les participants se sont très bien tirés d'affaire, leurs réponses étant toujours justes, ce que nous pouvons sans doute attribuer à leurs nouvelles connaissances des phases de la Lune et leur expérience d'observateurs. Toujours dans le but de récolter des traces pour l'analyse de l'évolution de leurs conceptions, on pourrait aussi concevoir un calendrier des phases de Vénus, à l'image du calendrier lunaire, et demander aux participants d'anticiper et de dessiner chaque phase avant qu'elle n'apparaisse sur le dôme.

4.3.14 En route vers l'objet mystère... les phases de la Terre

Pour cette dernière section, avant de retourner sur Terre, le chercheur propose aux participants d'aller observer un objet mystère qui nous montrera lui aussi des phases, comme la Lune, Vénus et Mercure. Il s'avère que cet objet mystère est notre propre planète, que nous observerons depuis la surface de la Lune, et qui nous montrera des phases tandis que la Lune avancera pendant un mois sur son orbite autour de la Terre (figure 21). Au départ de cette section, la Lune était pleine, ce qui fait que la phase de la Terre visible de notre satellite était nouvelle (toute la moitié éclairée tournée vers le Soleil).

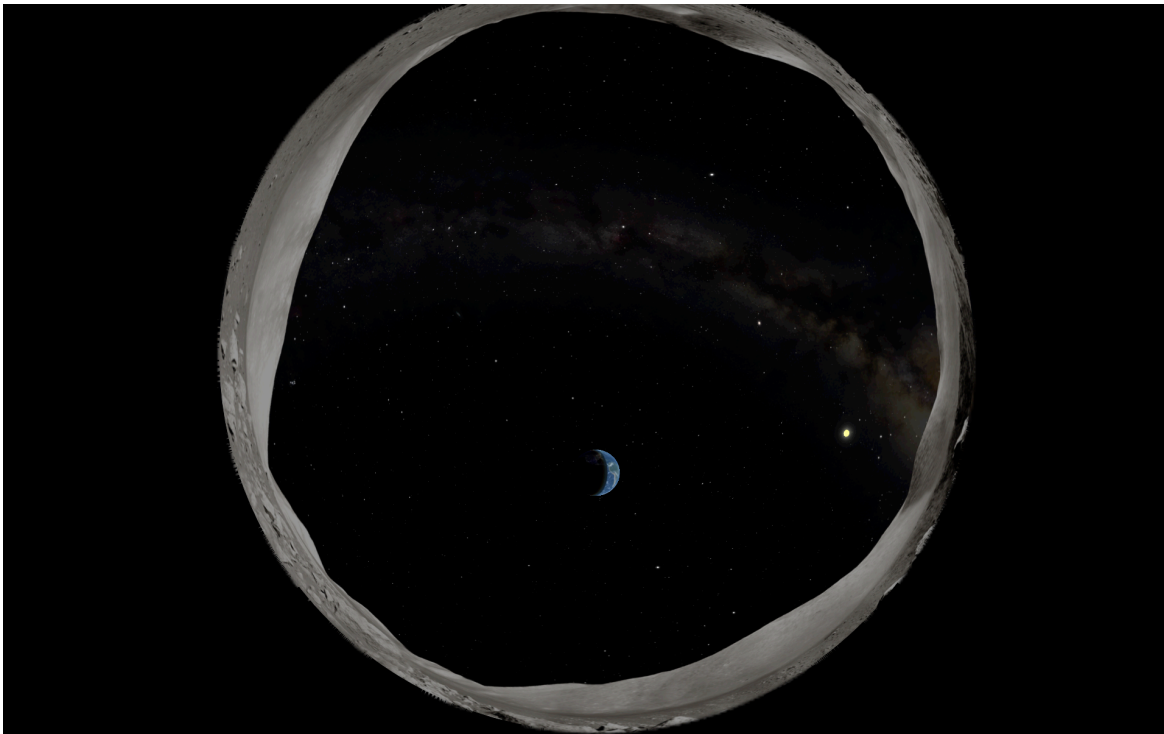


Figure 21. Les phases de la Terre vues de la surface de la Lune. (Source : Sky-Skan Inc.)

Le chercheur a d'abord demandé aux participants ce qui allait se passer lorsque la Lune avancerait sur son orbite. Les participants ont répondu que la Terre allait devenir toute sombre, toute éclairée, mais il a fallu que le chercheur suggère des phases pour qu'enfin ils réalisent que la Terre pouvait elle aussi montrer des phases. La difficulté des participants à répondre à la question initiale, de même que leur surprise en réalisant que la

Terre présente des phases vue de la Lune, montre bien l'importance de leur présenter ce point de vue particulier sur notre planète pour réinvestir à nouveau les connaissances acquises à propos des phases à cette situation inédite. Le dialogue qui suit est révélateur, à notre avis, d'une meilleure compréhension du mécanisme des phases, du moins chez certains des participants.

Chercheur : La Terre montre des phases aussi, tout simplement parce que la Terre est une sphère éclairée par le Soleil, donc il y a toujours une moitié éclairée et une moitié sombre, puis vu qu'on est sur la Lune et qu'on tourne autour de la Terre, on voit la moitié éclairée sous différents angles, ça fait des phases de la Terre ! [Met la Lune en mouvement, on passe au premier quartier de Terre, donc à la position du dernier quartier de Lune.]

Bernard : Ça fait que là, ce serait comme, presque le premier quartier ?

Chercheur : Ce serait comme le premier quartier de Terre... Maintenant, imaginez que vous êtes sur Terre et que vous regardez vers la Lune, ce serait quoi, la phase ?

Bernard : Euh... le premier, parce que le Soleil...

Participant : Non !

Participant : Euh, non... Ce serait le dernier quartier.

Benoît : Non, c'est tout le temps le contraire, je pense.

Bernard : Oui, oui, c'est ça.

Benoît : C'est le contraire.

Malgré la difficulté conceptuelle qu'exige cette décentration, pour imaginer l'apparence de la Lune vue de la Terre alors que nous sommes sur la Lune, Benoît et Bernard s'en tirent fort bien et répondent correctement à la question.

Chercheur : Là, on s'en va vers une phase qu'on appellerait la pleine Terre. Si on voit une pleine Terre et qu'on est sur la Lune, les gens qui sont sur la Terre et qui regardent vers la Lune, ils verraient quoi ?

Participants : Nouvelle Lune. Une nouvelle.

Chercheur : Une nouvelle Lune ! Est-ce que tout le monde est d'accord avec ça ?

Participants : Oui.

Benoît : Ça fait que dans le fond, c'est tout le temps le contraire !

Ici non plus, la tâche n'était pas facile, mais les participants ont très bien répondu à la question qui leur était posée. La remarque de Benoît à propos du fait que la phase de la Terre est toujours l'inverse de la phase de la Lune correspondante est très juste et peut même devenir un moyen mnémotechnique simple et efficace pour s'en souvenir¹⁶.

Chercheur : C'est tout le temps le contraire, effectivement... Comme là, on s'en va vers un dernier quartier de Terre, donc si c'est le dernier quartier de la Terre et qu'on est sur la Terre en regardant vers la Lune, on verrait quelle phase de la Lune ?

Participant : Euh... Là, on verrait le premier quartier ?

Chercheur : Premier quartier, exactement...

Benoît : Est-ce que ça se peut une nouvelle Terre ?

Chercheur : Bien oui ! Regarde, on s'en va vers ça, là !

Benoît : Ah bien oui, c'est comme la Lune !

Les commentaires des participants nous indiquent que plusieurs d'entre eux ont développé la capacité de passer d'un point de vue à l'autre en ce qui concerne les phases de

¹⁶ Le chercheur confesse n'y avoir jamais pensé lui-même avant que Benoît n'en fasse mention...

la Lune et les phases de la Terre vue de la Lune. Dans le cas de l'observation des phases de la Terre, on aurait pu là aussi demander aux participants d'anticiper et de dessiner la phase de la Lune vue de la Terre et analyser ces traces par la suite...

Du point de vue des améliorations possibles, il aurait été intéressant de reprendre les icônes soulignant la sphéricité de la Terre et son éclairage par le Soleil, dans le style de celles utilisées pour la Lune, afin de renforcer la similitude entre les deux situations.

4.3.15 Retour sur Terre (bis)

Finalement, le chercheur propose de décoller de la surface lunaire pour retourner se poser sur Terre. Une fois de retour, nous attendons que le Soleil se lève, ce qui met fin définitivement à la séance au planétarium. Après avoir répété les consignes de sécurité, le chercheur invite les participants à sortir du planétarium pour retourner dans la salle de réunion pour la séance post-traitement.

4.4 Troisième partie : rencontre post-traitement

4.4.1 Questionnaires post-traitement

De retour dans la salle de classe, le chercheur annonce qu'il distribuera à nouveau des questionnaires (sans mentionner qu'il s'agit des mêmes que ceux utilisés en pré-tests). Nous présentons dans ce qui suit les réponses des participants aux seules questions pour lesquelles des différences importantes et significatives sont apparues entre le prétest et le post-test. Les réponses aux autres questions sont regroupées à l'annexe 5. Le lecteur est invité à se référer à la section 4.2.3 pour retrouver les réponses aux pré-tests.

Questionnaire no 1

1. Peux-tu nommer des astres que l'on peut voir dans le ciel le jour ? Inscris-en autant que tu veux.

Adam : Le ciel, nuages, Soleil.
 Benoît : Le Soleil, la Lune.
 Bernard : Le Soleil et la Lune.
 Louis : Lune.
 Nadine : La Lune, le Soleil.
 Maude : Le Soleil, la Lune.

Sur le questionnaire post-traitement, Adam a écrit sensiblement la même chose que sur le prétest, mais sans mentionner la Lune, tandis que Benoît, Bernard et Maude ajoutaient systématiquement la Lune en réponse au post-test. Louis a changé sa réponse initiale (Mars) pour la Lune, tandis que Nadine écrivait la même chose que sur le prétest, soit le Soleil et la Lune. Un tel résultat montre bien qu'après la session sous la voûte du planétarium, les répondants ont majoritairement intégré la notion que l'on peut voir la Lune en plein jour, notion qui a fait l'objet d'une mention explicite de la part du chercheur avec de nombreux exemples durant la session sous le dôme.

Questionnaire no 2

2. As-tu déjà vu la Lune dans le ciel le jour ? Encerle ta réponse.

Seul Adam (un répondant sur six) a répondu non à cette question, tant en prétest qu'en post-test. Ce résultat (surtout en post-test) nous laisse croire que ce participant ne considérait peut-être pas la session au planétarium comme une représentation suffisamment réaliste du ciel pour « compter » comme une occasion de voir la Lune en plein jour – ce qui fût pourtant le cas au cours de la simulation ! Peut-être est-ce aussi à cause de la formulation de la question, qui fait appel de manière implicite à une expérience passée sous le « vrai » ciel, et non celui, simulé, du planétarium. Malheureusement, les réponses des cinq autres répondants ne permettent pas de savoir s'ils faisaient référence à des expériences d'observation passées ou à la récente session sous la voûte du planétarium. Une question plus explicite (incluant, par exemple, la mention que la Lune observée au

planétarium « compte ») pourrait clarifier la situation. On pourrait aussi demander où l'observation de la Lune en question a eu lieu afin de contrôler la réponse.

3. Si tu as répondu OUI à l'une ou l'autre des questions précédentes, dessine ci-dessous de quoi avait l'air la Lune la dernière fois que tu l'as observée.

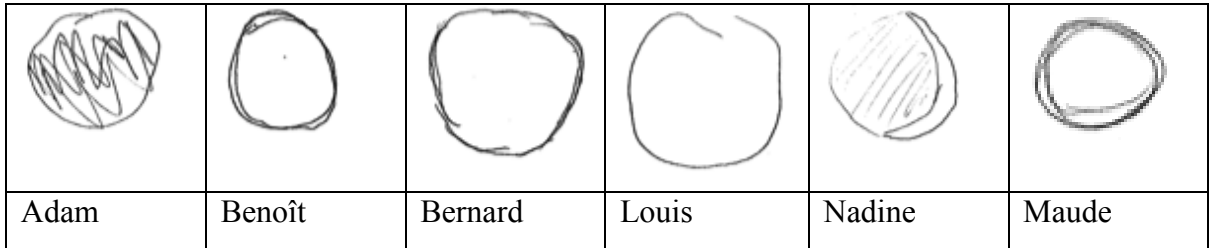


Figure 22. Dessins des participants en réponse à la question 3 du questionnaire post-test no 2.

Sur le questionnaire post-test (voir figure 22), les quatre répondants qui avaient dessiné un simple cercle en prétest (Adam, Benoît, Louis et Maude) ont refait un dessin similaire, sauf que les « cratères » avaient disparu et que le cercle dessiné par Adam était « rempli » ou noirci à l'intérieur (la nouvelle Lune, selon les instructions données pour remplir le calendrier lunaire). On peut peut-être voir dans la disparition des cratères le développement d'une vision moins « naïve » de la Lune et la volonté de représenter les phases de la même manière que sur le calendrier lunaire que les participant ont utilisé durant la séance sous le dôme. La Lune décroissante de Nadine est devenue un croissant de Lune avec la partie non-éclairée noircie, tandis que la Lune gibbeuse croissante de Bernard est devenue pleine, un simple cercle.

De tels résultats au post-test soulèvent la question de savoir à quelle expérience d'observation les répondants font référence : la dernière fois qu'ils ont vu la vraie Lune dans le ciel, ou l'expérience simulée sous la voûte du planétarium ? Dans les faits, la dernière représentation de la Lune que les répondants ont vue sous la voûte du planétarium était une pleine Lune; de ce point de vue, dessiner un cercle est une réponse tout-à-fait adéquate et cinq répondants sur six ont donc « bien » répondu à la question post-test. La

disparition des « cratères » nous convainc également que les répondants faisaient référence en post-test à la Lune simulée du planétarium, qui apparaît plus « lisse » que la vraie Lune, en bonne partie à cause de la faible résolution du projecteur vidéo utilisé.

4. Explique brièvement comment, selon toi, la Lune peut être visible en plein jour ou sinon, pourquoi on ne peut pas voir la Lune en plein jour.

Adam : [Pas de réponse.]

Benoît : J'ai eu un blanc de mémoire.

Bernard : On voit la lune en plein jour car la Lune n'est pas cachée par l'atmosphère, la lumière du Soleil est ainsi reflétée par la Lune.

Louis : La Lune réfléchit la lumière du Soleil. On peut même voir la Lune en plein jour

Nadine : La Lune réfléchit la lumière du Soleil et de temps en temps la lune apparaît en plein jour.

Maude : Elle peut être visible en plein jour car elle est plus lumineuse que le ciel.

En post-test, Bernard et Maude ont chacun donné une réponse qui reprenait presque mot pour mot l'explication fournie par le chercheur. Quant aux autres, seul Louis et Nadine ont fourni des réponses dignes d'analyse, bien que celles-ci ne fassent que réaffirmer que la Lune brille en réfléchissant la lumière du Soleil, ce qui nous permet de la voir en plein jour. Cela ne constitue bien sûr pas une explication de la visibilité de la Lune le jour, à proprement parler. Ce phénomène continue donc à représenter un défi pour de nombreux participants, ce qui ne devrait pas nous étonner, étant donné le peu de temps que nous avons consacré à sa présentation et à son explication.

Questionnaire no 3

2. Si tu as répondu NON à la question précédente, dessine ci-dessous toutes les formes que peut prendre la Lune dans le ciel. Tu peux faire autant de dessins que nécessaire.

Adam :	
--------	--

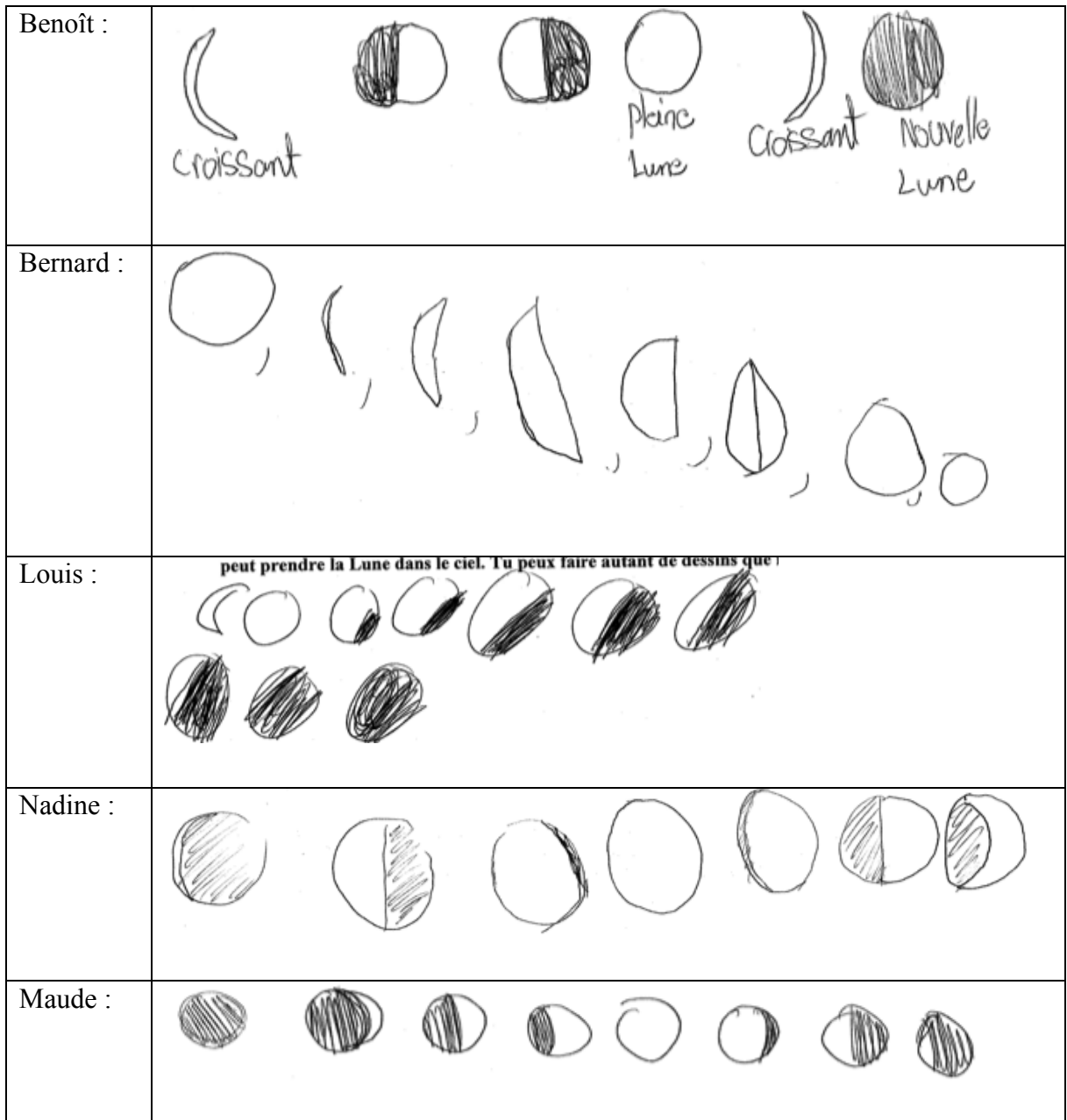


Figure 23. Dessins des participants en réponse à la question 2 du questionnaire post-test no 3.

En post-test, on constate que l'usage du noircissement de la partie invisible de la Lune s'est répandu, tous les participants sauf Bernard l'utilisant abondamment (figure 23).

Cela découle sans doute directement des instructions qui ont été données aux répondants concernant la façon de dessiner la Lune sur leur calendrier lunaire lors de la séance sous le dôme du planétarium; du point de vue du chercheur, cela rend également les dessins beaucoup plus précis. Les représentations naïves des croissants de Lune ont disparu et on constate que la nouvelle Lune a fait son apparition dans les dessins d'Adam, Benoît, Louis, Nadine et Maude, alors qu'elle était absente en prétest. La pleine Lune de Nadine et de Bernard s'est débarrassée de ses cratères, indiquant peut-être le développement d'une vision moins naïve de la Lune chez ces deux participants. Les dessins de Bernard sont toutefois encore dominés par les phases décroissantes (pointes tournées vers la droite), mais il s'agit de l'exception, les autres participants démontrant une meilleure répartition du nombre de dessins représentant les phases croissantes et décroissantes.

Ceci illustre selon nous leur meilleure compréhension du fait que la Lune est croissante durant la première moitié du mois lunaire et décroissante l'autre moitié, un fait abondamment illustré durant la session sous le dôme du planétarium. Tous les répondants, sauf Benoît, ont dessiné des phases gibbeuses (rappelons que Benoît a eu de la difficulté avec le mot gibbeuse, parlant en cours de session de la Lune « nébuleuse » croissante ou décroissante). On sent également que la volonté de montrer une progression des phases (ou du moins une meilleure symétrie entre les phases croissantes et décroissantes) s'est affermie, même si le résultat est parfois loin de la progression chronologique des phases. Maude s'est toutefois distinguée en illustrant une séquence presque parfaite de la nouvelle Lune jusqu'à une mince Lune décroissante, tandis que Louis a illustré une séquence parfaite de la pleine Lune à la nouvelle Lune en passant par sept phases gibbeuses décroissantes et derniers croissants. Nadine a dessiné une progression parfaite si on la lit de droite à gauche, ce qui illustre peut-être simplement une confusion entre les phases croissantes et décroissantes. La volonté d'utiliser correctement le vocabulaire associé aux phases apparaît également chez Benoît.

La comparaison des réponses au prétest et au post-test pour chacun des participants démontre une nette amélioration de la connaissance des différentes phases de la Lune, tant

en nombre de phases différentes illustrées qu’au niveau de la précision des dessins et la progression des phases. Il s’agit à notre avis d’améliorations qualitatives et quantitatives des connaissances des participants à propos des phases de la Lune, améliorations qui semblent avoir été induites par la session sous le dôme du planétarium, en particulier lors de l’observation systématique des phases en accéléré durant l’équivalent d’un mois lunaire.

Questionnaire no 4

1. Selon toi, qu’est-ce qui fait que la Lune change d’apparence d’un jour à l’autre ?

Décris ta réponse.

Adam : Le Soleil

Benoît : C’est qu’une partie de la Lune est éclairée par le Soleil et que, quand elle tourne autour de la Terre, la partie éclairée change de place.

Bernard : C’est la façon dont la Lune réfléchit la lumière du Soleil.

Louis : C’est la position de la Lune qui change tout. C’est aussi à cause de la position de la Terre. C’est aussi à cause des éclipses.

Nadine : C’est que la Lune ne nous montre pas toujours sa face éclairée. Selon sa position et la position de la Terre, une ombre se crée.

Maude : Elle tourne autour de la Terre et change de position vis-à-vis le Soleil, donc depuis la Terre, selon sa position, on la voit de différente forme.

La comparaison des réponses au prétest et au post-test semble révéler une évolution conceptuelle chez au moins cinq participants sur six. Benoît passe d’une explication faisant intervenir de la brume qui nous cacherait la Lune à celle où c’est la fraction de la moitié de la Lune éclairée par le Soleil visible de la Terre qui est responsable des phases. Idem pour Louis, qui invoquait le coucher du Soleil en prétest et écrit maintenant que la position de la Lune [autour de la Terre] change tout. Nadine ne savait pas trop expliquer les phases avant la session sous le dôme, et voici qu’elle invoque le fait que l’on ne voit pas toujours toute la face éclairée de la Lune. L’ombre à propos de laquelle elle écrit pourrait faire penser au mécanisme des éclipses, mais aussi peut-être au terminateur qui sépare la partie éclairée de la partie sombre, et dont la position sur le disque lunaire distingue les différentes phases. L’explication de Maude au prétest était déjà proche de la vérité, mais ce qu’elle écrit en post-test est encore plus précis. Quant à Bernard, son explication initiale était plus précise

que sa réponse au post-test. Par contre, durant l'entrevue de groupe, Bernard était beaucoup plus proche de l'explication correcte des phases de la Lune que ses camarades. Sa réponse au post-test est peut-être le signe d'une certaine fatigue, ou d'une difficulté de sa part à s'exprimer par écrit. Adam invoque le Soleil, mais sa réponse trop courte nous interdit toute interprétation.

Quoi qu'il en soit, ces résultats sont encourageants. À plusieurs reprises au cours de la session sous le dôme, le chercheur a expliqué que pour comprendre les phases de la Lune, il fallait savoir que la Lune est sphérique, qu'elle est éclairée par le Soleil et qu'elle tourne autour de la Terre. Comme le démontrent les réponses aux trois questions qui les interrogeaient à ce sujet en prétest, ces trois faits étaient déjà assez bien connus de la plupart des participants avant le début de la séance. Restait à les mettre en commun dans une explication rationnelle des phases de la Lune, ce que semblent avoir réussi au moins quatre des six répondants.

Il reste tout de même quelques incertitudes dans la tête des jeunes. Louis invoque les éclipses et la position de la Terre dans sa réponse au post-test, ce qui semble indiquer une certaine confusion entre le mécanisme des phases et celui des éclipses. Le cas d'Adam est intéressant : est-ce par paresse qu'il a été si succinct dans sa réponse ou parce qu'il ne savait vraiment pas quoi répondre ? Le chercheur a remarqué tout au long de la séance un certain manque d'intérêt de sa part. À plusieurs reprises, le chercheur a dû le rappeler à l'ordre tandis qu'il s'amusait à éclairer le dôme ou le plancher à l'aide de sa lampe frontale. Ceci explique peut-être cela...

3. Selon toi, d'où vient la lumière de la Lune ? Est-ce que la Lune produit sa propre lumière ? Est-ce qu'elle réfléchit vers nous la lumière de la Terre ? Du Soleil ? La lumière des étoiles ? Est-ce autre chose qui fait briller la Lune ? Décris ta réponse.

Adam : Le soleil reflète sur la Lune et les rayons vont sur la Terre.

Benoît : Non, la Lune ne produit pas sa propre lumière, ce sont les rayons du Soleil qui éclairent la Lune qui ensuite reflètent vers la Terre.

Bernard : C'est la lumière du Soleil qui se réfléchit sur la Lune car elle est très brillante.

Louis : Elle réfléchit avec la lumière du Soleil.
Nadine : C'est le Soleil qui éclaire la Lune.
Maude : Elle réfléchit la lumière du Soleil.

La source de lumière qui nous permet de voir la Lune semblait problématique pour Benoît et Louis avant la séance sous le dôme du Planétarium, mais cela ne semblait plus poser problème aux participants après la session sous le dôme, puisqu'ils ont tous répondu correctement à la question sur le post-test.

Questionnaire no 5

1. À l'aide d'un trait, relie chaque photo de la Lune à gauche avec le nom de la phase correspondant à droite.

Adam : 7 bonnes réponses /7
Benoît : 5/7
Bernard : 7/7
Louis : 5/7
Nadine : 5/7
Maude : 7/7

On constate que les résultats du post-test sont bien meilleurs que ceux du prétest et nous indiquent une bien meilleure connaissance des phases de la Lune et de leur dénomination. La présentation explicite de la nouvelle Lune dans le planétarium, ainsi que les trucs du « p » et du « d » pour reconnaître le premier et le dernier quartier, ont sans doute beaucoup aidé. Il faut cependant remarquer que la moitié des répondants ont obtenu une note parfaite, tandis que les trois autres ont interverti la Lune gibbeuse croissante et la décroissante. Si on part de l'hypothèse que les répondants ont correctement identifié toutes les phases sauf ces deux-là (qui sont plus difficiles à départager, avouons-le) et qu'ils ont ensuite choisi au hasard la gibbeuse croissante et la gibbeuse décroissante, il est normal d'obtenir le résultat que nous présentons ici. Cela indique tout de même que les répondants ont pu sans difficulté reconnaître les autres phases, ce qui n'était pas le cas avant la séance de planétarium. On voit donc l'influence positive qu'a eue la présentation systématique des phases de la Lune sur les connaissances des participants.

4.4.2 Les phases de la Lune dans les mots des participants

Pour conclure l'activité, une fois de retour dans la salle de réunion, le chercheur a demandé aux participants de lui dire comment ils expliqueraient les phases de la Lune dans leurs mots s'ils devaient les décrire à leurs parents. Les participants ont répondu à tour de rôle et nous en présentons des extraits ci-dessous.

Benoît : Ah, bien, pour expliquer à mes parents comment les phases de la Lune se déroulent, bien moi je dirais que, pour commencer, la... on commence avec un croissant de Lune, ensuite, c'est le premier quartier, je pense...

Bernard : Oui.

Benoît : Là ensuite, euh...

Bernard : La pleine...

Benoît : La pleine Lune, parce que la pleine Lune est au milieu, et là ensuite, bien là je me situe un peu, la dernière c'est la nouvelle Lune, donc, euh, après la pleine Lune c'est la... la... la dernière... la dernière...

Chercheur : Le dernier quartier ...

Benoît : Oui le dernier quartier, là ensuite c'est la Lune nébu... c'est pas une nébuleuse...

Chercheur : Gibbeuse.

Benoît : Gibbeuse croissante, puis là ensuite c'est la Lune gibbeuse décroissante, [rires] puis là, ensuite, c'est la nouvelle Lune, puis ça se termine. C'est le cycle de la Lune.

On perçoit chez Benoît, malgré quelques hésitations, une véritable évolution conceptuelle à propos des phases de la Lune. Lui qui insistait avant la séance pour décrire un modèle de « remplissage » des phases, de la nouvelle Lune à la pleine, le voici qui décrit maintenant une Lune croissante, puis pleine, puis décroissante, en insistant sur le fait que la pleine Lune « est au milieu ». Il subsiste tout de même quelques imprécisions et problèmes

de vocabulaire dans sa description (nébuleuse au lieu de gibbeuse), on sent que sa vision est encore mal assurée, mais il s'est clairement passé quelque chose chez lui entre avant et après la séance sous le dôme, quelque chose dans le sens d'une meilleure compréhension du phénomène des phases de la Lune.

Chercheur : Puis si tu voulais expliquer à tes parents c'est quoi le mécanisme, pourquoi est-ce que la Lune change de forme comme ça, ou change d'apparence...

Benoît : Bien c'est le, le Soleil qui, qui... plombe sur la Lune, puis là, vu que la Lune tourne autour de la Terre... bien là, la partie éclairée change, puis là, ça, ça... dans le fond, elle change, là, ça fait que les parties se diffèrent entre elles...

Sur le questionnaire prétest, Benoît invoquait de la brume cachant le Soleil pour expliquer les phases de la Lune. On observe bien l'évolution conceptuelle chez lui, maintenant qu'il évoque la Lune éclairée par le Soleil qui tourne autour de la Terre et dont la partie éclairée change. Sa réponse au questionnaire post-test allait elle aussi dans le sens de l'explication scientifique du mécanisme des phases. Il s'agit, d'après nous, d'un bel exemple d'évolution conceptuelle chez un participant à notre séance.

Bernard : Moi, je vais y aller. Donc, comment j'expliquerais à mes parents, euh, bien je leur dirais que premièrement, moi je débiterais par la nouvelle, après je leur dirais ça va au, euh, croissant, la mince, mince, mince affaire, là, après ça... ça augmente pour aller jusqu'au premier quartier, après ça augmente pour aller à la pleine, après ça va diminuer tranquillement pour euh, l'ombre, elle va en fait, elle va gagner de plus en plus de terrain pour aller à la gibbeuse, là... la croissant... la Lune croissante gibbeuse, pour aller après au premier quar... au dernier quartier, pour après aller à la... au comme... au dernier croissant, puis après à la nouvelle. C'est tout le cycle.

Décrire la séquence des phases de la Lune n'a jamais constitué un problème pour Bernard, qui a joué un rôle de premier plan dans la mise en ordre des photos des différentes phases avant la séance. Il subsiste encore des problèmes de vocabulaire, particulièrement en

ce qui concerne les phases gibbeuses (encore elles !), mais dans l'ensemble, sa description est fort correcte.

Bernard : Puis, pour le fonctionnement, bien je dirais que c'est comme un peu la façon dont les rayons [du Soleil] vont se refléter sur la Lune. Comme si la Lu... si le Soleil est là, puis... Bien je, attend, comment le visualiser... Admettons que le Soleil est là...

Chercheur : Imagine que tes parents et toi vous avez ça [le chercheur lui donne une boule blanche et la grosse lampe de poche], comment tu leur expliquerais les phases de la Lune avec ça ?

Bernard : Donc ça [lampe de poche] c'est comme si c'était le Soleil, ça fait que là, ce serait la pleine [il place la boule blanche devant la lampe], parce que tout est éclairé [il montre la moitié éclairée], puis là, bien la Lune va tourner [fait décrire un demi-cercle par la boule] pour finalement, un moment donné, être nouvelle, puis elle va revenir avec les quartiers, puis pleine, nouvelle, pleine, nouvelle, et ainsi de suite...

Chercheur : La Terre, elle est où dans ton modèle ?

Bernard : Bien elle serait ici [pointe au centre de l'orbite de la Lune].

Chercheur : Puis la Lune tourne autour. Ok, parfait !

Bernard nous offre une description modélisée du mécanisme des phases de la Lune, utilisant la boule blanche et la lampe de poche de manière inusitée en plaçant une Terre imaginaire au centre de l'orbite dessinée par la boule blanche, orbite tracée dans le rayon de lumière de la lampe de poche. Son modèle est à l'image de ce que nous avons vu sous le dôme, lorsque nous observions la Lune tourner autour de la Terre depuis un point de l'espace situé en dehors de l'orbite lunaire.

Maude : Bien moi, comment j'expliquerais à mes parents, dans le fond, c'est que, c'est comme la Lune, qu'est-ce qu'on voit, c'est la lumière du Soleil que la Lune reflète. Puis, dans le fond, puisque la Lune bouge et que la Terre bouge, puis que tout est en orbite, on voit différentes phases. Si tout restait pareil, on verrait juste une phase tout le temps, alors que là, puisque ça bouge, bien on voit une phase, puis c'est comme, la Lune, dans le fond, elle

se remplit, elle devient pleine, puis elle se « déremplit » après, puis ça fait les différentes phases. Comme ça.

Pour Maude, la description des phases de la Lune ne semblait pas poser de problème avant la séance, elle qui a aussi joué un rôle important dans la mise en place des photos des phases. Quant à son explication du mécanisme, elle débutait sa réponse au questionnaire prétest par « Je crois », pour invoquer ensuite la Lune tournant sur elle-même et autour de la Terre et changeant ainsi d'apparence. En réponse au questionnaire après la séance, elle introduit en plus la notion de la position de la Lune par rapport au Soleil, ce qui manquait pour compléter son explication. Ici aussi, on perçoit une réelle évolution conceptuelle vers une explication très proche du modèle scientifique.

Nadine : Bien moi, je préfère expliquer par des schémas, je comprend mieux comme ça. Comme un modèle ou quelque chose comme ça, je préfère expliquer comme ça, donc avec une lampe et des boules.

Chercheur : [Dépose près d'elle la lampe et une boule blanche] Imagine que je suis ton père ou ta mère... Guide-moi pour que je comprenne le mécanisme des phases de la Lune. Tu peux te lever, ça va peut-être être plus simple...

Nadine : Déjà, ça [la lampe de poche] c'est le Soleil, et euh... Imaginons que la Terre est ici [pointe vers une Terre imaginaire devant la lampe], la Lune, elle va... Attend... La Lune, elle va être éclairée que sur certaines parties [place la Lune derrière la position de la Terre], donc là, si la Terre est ici [entre la lampe et la boule], elle va avoir une pleine Lune, si elle est ici [déplace la boule sur le côté], elle va avoir, attend, elle va avoir juste, euh, le premier quartier, [déplace la boule autour de la Terre] la nouvelle Lune et le dernier quartier, parce que ça va être le reflet du Soleil.

Nadine a expliqué le mécanisme des phases de manière très adéquate, non sans rappeler ce que Bernard avait fait un peu avant elle. Elle faisait tourner la boule dans le sens horaire autour de la Terre, ce qui fait que sa séquence de phases était inversée. À propos du mécanisme des phases, Nadine avait répondu au questionnaire prétest qu'elle ne savait plus trop, mais que c'était une question de Soleil et d'ombre. Elle avait clairement retrouvé la

bonne explication au post-test (réponse plus que satisfaisante), ainsi que dans sa réponse verbale et sa démonstration. Ici aussi, une évolution conceptuelle vers le modèle scientifique s'est clairement produite.

Chercheur : Toi, Louis, comment tu expliquerais à tes parents les phases de la Lune ?

Louis : Je leur ferais pas mal le dessin de toutes les lunes, comme... Je ferais tous les dessins, je commencerais à la nouvelle Lune, puis j'irais jusqu'à... à la... la...

Benoît ou Bernard : La pleine...

Louis : La pleine Lune, puis après je redescendrais encore, je ferais tous les dessins.

Chercheur : Puis comment tu leur expliquerais le mécanisme des phases de la Lune ? Est-ce que tu penses à une façon de le faire, ou ce n'est pas encore tout à fait clair dans ta tête ?

Louis : Ce n'est pas encore clair, mais c'est vraiment les dessins que je ferais...

Louis a peu parlé au cours de la matinée, ce qui rend difficile l'analyse de son parcours conceptuel. On note tout de même que sa description de la séquence des phases, bien que succincte, est néanmoins assez juste (phases croissantes, puis décroissantes). De plus, les traces écrites (réponses aux questionnaires pré- et post-tests) montrent bel et bien une évolution de sa conception des phases de la Lune, malgré que cette conception n'ait jamais été exprimée clairement. Rappelons que Louis invoquait la position du Soleil à son coucher au pré-test, puis les éclipses et la position de la Terre dans sa réponse au post-test. Après la séance, Louis demeure toutefois incapable de décrire le modèle scientifique du mécanisme des phases de la Lune. Il a acquis certaines notions, amélioré ses représentations graphiques des phases, sait reconnaître les principales phases, mais l'explication scientifique lui échappe encore.

Chercheur : Dernière question pour Adam : est-ce que tu te sentirais capable d'expliquer à tes parents le mécanisme des phases de la Lune ?

Adam : Oui.

Chercheur : Dans tes mots, tu dirais ça comment ?

Adam : Bien, quand la Lune, elle commence à apparaître, bien, elle n'est pas là [nouvelle Lune], ensuite elle va commencer par apparaître, puis elle va être un croissant, après ça, elle va devenir un plus gros croissant, puis, euh, ainsi de suite...

Chercheur : Ok. Et le mécanisme ? Qu'est-ce qui fait que la Lune change comme ça d'une journée à l'autre ? Comment tu leur expliquerais, à tes parents ?

Adam : Bien parce que, bien, je veux dire, ça, ça change parce que, euh, avec euh... je ne sais pas... je ne sais pas, là.

Chercheur : Ce n'est pas encore clair dans ta tête comment leur expliquer ?

Adam : [Hoche de la tête pour dire non].

Adam ne semble pas capable de formuler une explication pour le mécanisme des phases de la Lune. Au prétest, il avait laissé vide l'espace prévu pour répondre à une question similaire, et avait écrit « Le Soleil » à la même question du post-test, ce qui est loin de constituer une explication valide. Quant à sa description de la séquence des phases, elle est correcte pour ce qui est du début (croissante), mais demeure incomplète, puisqu'il ne mentionne pas que la Lune décroît après la pleine Lune. Adam ne fait malheureusement pas appel au vocabulaire qui a été présenté et répété à de nombreuses reprises. Adam est sans doute le participant dont les conceptions à propos des phases de la Lune ont le moins évolué au cours de la séance.

4.4.3 Appréciation de la séance par les participants

En conclusion, le chercheur demande aux participants de lui dire ce qu'ils ont le plus aimé ou le moins aimé de leur expérience. Dans l'ensemble, les jeunes affirment avoir beaucoup apprécié la séance, autant la qualité de la simulation que le fait de se retrouver dans l'espace pour observer des phénomènes d'un autre point de vue allocentrique. Par exemple, Bernard raconte être déjà venu au Planétarium de Montréal auparavant et avoir remarqué que le point de vue qu'on y présentait était uniquement géocentrique, tandis que son expérience sous le dôme du planétarium numérique lui avait permis de « voir dans d'autres dimensions ». Louis affirme lui aussi avoir adoré se retrouver dans l'espace pour observer « des situations très pertinentes ». Adam a lui aussi mentionné avoir aimé se retrouver dans l'espace. Cette capacité du planétarium numérique de présenter un autre point de vue que la vision géocentrique du ciel était au centre de notre dispositif et constituait un des fondements théoriques les plus importants de notre démarche, et cela semble avoir porté fruit à la lumière des commentaires des participants et de leurs évolutions conceptuelles au cours de la matinée.

Benoît, Bernard et Louis proposent, comme amélioration possible à la séance, de permettre aux spectateurs de choisir eux-mêmes leur destination. Cela permettrait, selon eux, de captiver davantage les spectateurs. Au cours de cette discussion, Bernard propose même d'observer des phases ailleurs dans le système solaire...

Benoît : C'est un peu comme si le public pouvait choisir ce qu'il voulait apprendre. Si on captivait encore beaucoup plus l'attention du public, là...

Bernard : Comme leur demander s'ils veulent...

Louis : Aller à telle planète, ou quelque chose du genre.

Bernard : Oui c'est ça, puis là, ils verraient les phases, parce que d'autres planètes qui ont leurs lunes, sûrement qu'on peut voir aussi des phases de cet endroit-là, comme admettons, Jupiter, elle en a beaucoup de lunes, ça fait qu'on peut sûrement voir, je sais pas, peut-être que je dis n'importe quoi...

Chercheur : Non, non, non, tout-à-fait !

Bernard : Puis là, ils pourraient voir toutes les phases, parce que je sais qu'il y a beaucoup de lunes autour de Jupiter, ça fait qu'admettons qu'il y en a une là [pointe différentes directions autour de lui], une là, bien elles montreraient des phases différentes, puis une là, puis une là... Ça, ce serait le fun.

Commentaires et descriptions tout-à-fait remarquables de Bernard qui a appliqué le mécanisme des phases de la Lune au cas des lunes de Jupiter. Bel exemple de réinvestissement spontané, comme sa mention des phases de Mercure plus tôt durant la séance et, encore une fois, signe d'une évolution conceptuelle certaine, sans doute induite en partie par la séance sous le dôme.

Questionnés sur la durée de la séance (trois heures au total, incluant les séances pré- et post-traitement), les participants ont avoué avoir trouvé la matinée un peu longue et ils semblaient visiblement fatigués à la fin de la rencontre. Il est clair que la séance sous le dôme pourrait être resserrée et les questionnaires raccourcis, sans pour autant enlever la moindre pertinence ou impact à l'ensemble.

Dans l'ensemble, les commentaires et l'attitude des participants tout au long de la séance ont convaincu le chercheur qu'en majorité, ils ont apprécié leur matinée et étaient très motivés, en particulier sous le dôme du planétarium. De ce point de vue, la séance dans le planétarium numérique s'est avérée un succès, ce qui est souvent le cas lorsque l'on utilise des technologies immersives en éducation :

« [...] what most studies [on the educational value of VR technology] were able to consistently confirm was the high level of learner enjoyment, especially when compared to other media. » (Roussou, 2006, p. 58)

En terminant, nous laissons le mot de la fin à Benoît qui a qualifié ainsi toute l'expérience, en particulier la séance sous le dôme : « C'était magique, là ! Magique... »

4.5 Conclusion

Nous avons exposé dans le présent chapitre le résultat de la mise à l'essai de l'intervention didactique que nous avons conçue dans le cadre de la présente thèse. Nous avons présenté en détail les activités menées avant la séance sous le dôme du planétarium numérique (présentation du chercheur et buts de la recherche, questionnaires pré-tests, mise en ordre des photographies des phases de la Lune et modélisation du système Terre-Lune-Soleil), le déroulement de la séance elle-même, puis le retour sur l'activité, avec les questionnaires post-tests, l'explication des phases de la Lune par les participants et leur appréciation de l'activité. Nous avons, à chaque étape, exposé les buts poursuivis par le chercheur et analysé les réponses et commentaires des participants afin de mettre en évidence l'évolution de leurs conceptions concernant les phases de la Lune.

Le bilan que nous faisons de la matinée de juillet 2012 passée avec les six participants à notre étude est globalement positif : en effet, nous avons pu constater une évolution conceptuelle à propos du mécanisme des phases de la Lune chez au moins cinq d'entre eux, notamment chez Benoît, dont la volubilité toute naturelle et les fréquentes interventions nous ont permis de recueillir de nombreuses traces pour rendre compte de son travail intellectuel. C'est aussi le cas de Bernard et Nadine, qui ont tous deux utilisé un modèle physique pour exposer leur vision du mécanisme des phases de la Lune en conclusion de l'activité. Maude avait déjà de très bonnes notions pour expliquer le mécanisme des phases au début de la matinée, mais sa vision s'est affermie et précisée en cours de séance. Louis et Adam, par contre, sont demeurés incapables d'expliquer le mécanisme des phases à la fin de l'activité, même si l'on a pu montrer une certaine évolution de la conception de Louis.

Devrions-nous être déçus du fait que tous les participants n'aient pas fait le saut de leurs conceptions initiales vers le modèle scientifique ? Aucunement, si l'on en croit Sadler (1998), qui rappelle que le travail sur les conceptions n'est pas un chemin rectiligne :

« Progress toward scientific understanding of key scientific concepts [...] is not simple or straightforward. Students do not move quickly from no opinion to the scientific understanding, but they do change. This movement is often painstakingly slow, taking much longer than a single year of study, and is most often mediated by belief in alternative conceptions. » (Sadler, 1998, p. 285)

Rappelons que nous nous attaquions à un gros morceau en tentant d'enseigner le concept des phases de la Lune à des jeunes de 12 à 14 ans, un concept jugé difficile même pour des apprenants adultes à cause de sa forte composante spatiale. Comme le rappellent Mulholland & Ginns (2008), c'est sans doute la difficulté de se représenter une même situation depuis deux points de vue différents qui a freiné certains des participants à notre étude :

« We have concluded that the most difficult concepts to change were those requiring students to use three dimensional mental models in their reasoning and thinking about the Sun, Earth, Moon system in terms of their relative configurations in space. » (Mulholland & Ginns, 2008, p. 395)

Même si tous n'ont pas embrassé d'emblée le modèle scientifique, nous avons tout de même pu constater une meilleure représentation graphique des différentes phases de la Lune et une description plus précise de leur séquence chronologique de la part des six participants après la séance sous le dôme, bien qu'à des degrés divers pour chacun. Cela témoigne tout de même d'un véritable travail intellectuel et d'une évolution certaine dans leur façon de voir la Lune et de se représenter ses phases.

Nous avons également été témoins de spectaculaires avancées conceptuelles lorsque des participants, dont Bernard, ont spontanément réinvesti leur connaissance nouvelle du mécanisme des phases à des situations inédites, comme les phases de Mercure ou des satellites de Jupiter. De l'aveu même de quelques participants, la possibilité d'observer le mécanisme des phases de la Lune « de l'extérieur » (vision allocentrique) a joué un rôle important dans le développement de leur meilleure compréhension du mécanisme à

l'origine de ce phénomène, sans compter l'attrait évident que ce genre de « sortie dans l'espace » représente pour des apprenants de cet âge.

Puisque notre mise à l'essai s'inscrivait dans le cadre d'une recherche de développement et d'ingénierie didactique (voir chapitre 3.0), nous avons également analysé les résultats dans le but de déterminer des façons de l'améliorer. Pour ce faire, nous avons invoqué à la fois les aspects pratiques découlant de sa mise en application dans un cadre le plus naturel possible, mais aussi les aspects théoriques qui l'ont fondée.

C'est ainsi que nous avons relevé de très nombreuses améliorations que nous pourrions apporter à notre intervention didactique, en préparation d'une seconde itération dont la mise en œuvre sort par contre du cadre de la présente étude. Ces améliorations ont été soulignées au fur et à mesure que nous présentions nos résultats et représentent à la fois des solutions pratiques pour améliorer la compréhension ou attirer l'attention des participants sur un aspect important de l'intervention, par exemple en utilisant davantage de supports visuels à l'appui des concepts de bases nécessaires pour expliquer les phases de la Lune, ou encore découlent d'aspects plus théoriques, comme l'élimination de la séquence d'observation des éclipses au profit d'un réinvestissement plus important du mécanisme des phases au cas des satellites de Jupiter.

Mentionnons également que la question de la face cachée de la Lune, qui s'est immiscée dans la séance suite à des questions et des commentaires des participants, devra faire l'objet d'une profonde réflexion pour déterminer si elle doit être abordée et, si oui, comment. Il faudra en particulier défaire le lien qui semble exister dans la tête de certains apprenants entre la rotation de la Lune sur elle-même et sa phase. Il nous semble aussi qu'une forme d'instruction particulière à propos de la formation des ombres sur un objet sphérique, en lien avec la forme et le comportement du terminateur lunaire, serait de mise. La présentation des phases de la Lune en vue polaire pose quelques difficultés particulières dont la résolution demandera également réflexion. Enfin, le chercheur devra faire en sorte de multiplier les traces tout au long de l'intervention didactique afin de documenter plus finement l'évolution conceptuelle des participants.

Conclusion

« Life is the art of drawing sufficient conclusions from insufficient premises. »
Samuel Butler (1835-1902)

Nous voici arrivés au bout d'un long processus de recherche et il est temps d'en tirer des conclusions utiles pour la suite des choses. Rappelons que le but du présent travail était d'explorer les liens nouveaux et uniques qui se tissent entre les planétariums et le monde de l'éducation, au premier chef l'école québécoise et ses besoins particuliers en terme d'enseignement de l'astronomie, suite à l'introduction du nouveau Programme de formation de l'école québécoise en 2001. Nous prétendons qu'au vu des difficultés et des défis importants que soulève l'enseignement de l'astronomie dans un contexte scolaire, le planétarium est le lieu idéal pour concevoir des interventions didactiques prenant en compte les nombreuses conceptions des apprenants à propos des phénomènes astronomiques et leur offrant un environnement d'apprentissage riche et varié permettant d'observer ces phénomènes en accéléré et à tout moment de la journée. Une telle alliance entre l'école et le planétarium répond également au vœu exprimé par le nouveau Programme de formation, qui souhaite que l'école investisse des lieux qui offrent de nouveaux repères culturels aux apprenants.

Il restait toutefois à déterminer avec quel type de planétarium cette alliance serait forgée, à l'heure où ces musées de science vivent une véritable révolution qui les fait passer de l'analogique au numérique. En effet, des projecteurs vidéo, ordinateurs et cartes graphiques extrêmement performants mettent déjà à la disposition des planétariums des outils permettant de projeter sur la voûte des images de synthèse ultra réalistes. L'accès à de gigantesques bases de données astronomiques permet en outre de recréer virtuellement un univers astronomique crédible au sein duquel on est désormais libre de voyager à sa guise, comme à bord d'un vaisseau spatial.

Plus important encore, le planétarium numérique offre la possibilité inédite d'observer une foule de phénomènes astronomiques sous divers angles et de plusieurs

points de vue différents. Non plus confiné à la vision géocentrique du ciel, elle-même à l'origine de bon nombre de conceptions en astronomie, le spectateur peut maintenant se déplacer dans l'espace pour réconcilier ce qu'il voit depuis la surface terrestre avec ce qui se passe vraiment dans l'espace tridimensionnel. Ce passage du géocentrisme à l'allocentrisme est une véritable révolution en ce qui concerne le potentiel éducatif des planétariums, potentiel que nous avons exploré dans le cadre du présent travail.

Le Programme de formation de l'école québécoise enjoint les enseignants à aborder une foule de concepts en astronomie, qu'il s'agisse des savoirs essentiels au primaire ou des concepts prescrits au secondaire. Parmi ces nombreux sujets possibles, lequel aborder dans le cadre de notre étude ? Plusieurs raisons nous ont amenées à retenir le thème des phases de la Lune, un concept prescrit au premier cycle du secondaire. Les phases sont en effet un phénomène avec lequel les élèves sont déjà familiers, du moins dans ses principales manifestations sensibles, mais à propos duquel existent un très grand nombre de conceptions, heureusement bien documentées par la recherche en didactique. De nombreux auteurs considèrent également que les jeunes de ce groupe d'âge (12 à 14 ans) sont mûrs pour aborder ce concept difficile qui nécessite, pour bien en comprendre le mécanisme, de se représenter le phénomène de différents points de vue. Il s'agit enfin d'un phénomène qui se déroule sur plusieurs semaines et qui est difficile à observer durant les heures normales de classe, alors qu'il est plutôt facile à simuler en accéléré dans un planétarium.

Nous avons donc proposé de développer une intervention didactique inédite pour enseigner le concept des phases de la Lune à des apprenants de 12 à 14 ans. À notre connaissance, notre démarche se distingue de tout ce qui s'est fait jusqu'à présent dans le milieu des planétariums et ce, de plusieurs façons : d'abord, nous avons développé notre intervention dans un planétarium numérique offrant des points de vue différents et variés sur la Lune, ses mouvements et ses phases, permettant d'observer le phénomène sous plusieurs angles, géocentrique, bien sûr, mais aussi allocentrique, comme si nous étions dans l'espace à bord d'un vaisseau spatial. Ensuite, nous avons bâti notre scénario en tenant compte des conceptions les plus fréquentes exprimées par des jeunes de ce groupe d'âge à

propos des phases de la Lune. Nous avons également procédé à une importante transposition didactique pour « démonter » le mécanisme des phases et en isoler les principaux constituants, afin de les présenter de manière séquentielle et intelligible. Enfin, nous avons adopté une approche méthodologique basée sur l'ingénierie didactique et la recherche de développement pour nous assurer d'informer le processus de développement de notre intervention didactique à la fois sur des bases théoriques solides (que nous détaillerons dans les paragraphes suivants), mais aussi en analysant les résultats d'une première mise à l'essai de l'intervention dans des conditions les plus naturelles possibles.

Du côté de la théorie, nous avons bâti notre intervention sur quatre piliers qui prennent appui dans quatre domaines différents de la recherche, ce qui constitue aussi une approche inédite, du moins à notre connaissance. Ces quatre champs d'intérêt sont la recherche en éducation dans les planétariums, la recherche en didactique des sciences, en particulier le travail sur les conceptions et les conditions de leur franchissement, la recherche sur les environnements d'apprentissage constructivistes et l'utilisation de la réalité virtuelle en éducation et, finalement, la recherche sur l'utilisation des simulations pour enseigner des concepts astronomiques.

Du côté de la recherche en éducation dans les planétariums, nous avons procédé à une vaste recension de plus d'une centaine d'articles, de thèses et de mémoires parus au cours des dernières décennies dans le but de cerner les meilleures pratiques éducatives à mener sous la voûte d'un planétarium. Malgré que la grande majorité de ces recherches aient été menées dans des planétariums optomécaniques et ont abouti à des conclusions parfois mitigées concernant la valeur éducative de ces institutions, nous avons été en mesure d'identifier un certain nombre d'injonctions et de pratiques que nous souhaitons transposer dans un planétarium numérique. Mentionnons par exemple une séance de démystification des équipements technologiques avant le début de l'intervention, afin de familiariser les apprenants avec leur nouvel environnement, ou encore l'utilisation d'une approche pédagogique favorisant la participation active des apprenants par le biais

d'observations, de prise de note, de discussion de groupe, l'émission d'hypothèses et leur vérification *in situ*, d'activités kinesthésiques de modélisation, etc. Plus important encore, la prise en compte de l'importance des capacités de projection et d'orientation spatiale des apprenants nous a amené à concevoir une intervention didactique où la multiplication des points de vue sur le phénomène des phases de la Lune et son mécanisme constituait un des principaux moteurs.

Notre sensibilité vis-à-vis les processus d'apprentissage et notre prise de conscience des limites inhérentes au planétarium optomécanique géocentrique nous a toutefois convaincu qu'une simple transposition de ce qui « marche » dans un tel planétarium à la situation d'un planétarium numérique n'aurait pas suffi. C'est pourquoi nous nous sommes également tourné vers la didactique des sciences, en particulier le courant socioconstructiviste, dont l'apport théorique constitue le cœur de notre intervention, puisque nous sommes convaincus que c'est l'apprenant qui est responsable de son apprentissage et que toute intervention éducative doit prendre l'apprenant et ses connaissances préalable (ses conceptions) comme point de départ.

Nous nous sommes donc fortement intéressés aux conceptions des apprenants, leur origine, leurs principales caractéristiques, ainsi que les modèles théoriques qui proposent d'aborder l'enseignement sous l'angle du changement conceptuel afin d'en favoriser l'évolution. Nous avons ainsi retenu quatre modèles du changement conceptuel, ceux de Posner et al., Vosniadou, diSessa et Giordan. Pour chacun d'entre eux, nous avons exposé les fondements théoriques et, malgré leurs divergences et leurs façons parfois fort différentes d'aborder le changement conceptuel, indiqué de quelle manière on pouvait envisager de les utiliser dans une intervention didactique menée sous la voûte d'un planétarium numérique. Nous avons ainsi été sensible aux propositions de Posner et al., qui préconisent de créer un conflit cognitif chez l'apprenant pour ensuite lui proposer une conception plausible, intelligible et fructueuse. Nous retenons des idées de Vosniadou le besoin de travailler sur les théories personnelles et naïves qui bien souvent sous-tendent les conceptions, qui ne sont alors que des manifestations superficielles émanant de ces mêmes

théories, et de favoriser le dialogue entre apprenants et les processus de métacognition. Nous avons également été fait nôtres les arguments de diSessa et de Giordan, qui insistent sur la nécessité de plonger les apprenants dans des environnements d'apprentissage riches et variés.

La conception de tels environnements d'apprentissages a constitué le troisième volet de notre développement théorique. Nous avons exploré les principes de création et d'utilisation des environnements d'apprentissages, en particulier les environnements d'apprentissage constructivistes qui favorisent l'expérimentation par l'apprenant du processus de construction des connaissances dans un contexte riche où plusieurs conceptions s'expriment dans un dialogue entre pairs et avec l'enseignant, et en s'appuyant sur plusieurs modes de représentation. Nous avons aussi étudié l'emploi de la réalité virtuelle en éducation, une technologie qui utilise des interfaces informatiques intuitives et immersives pour plonger les apprenants dans des reproductions hautement réalistes d'environnements où ils ne pourraient normalement pas se rendre, en raison des coûts, des dangers, ou de restrictions spatiales, temporelles ou d'échelle, tout en créant chez les utilisateurs un fort sentiment de présence et d'immersion. En jetant des ponts entre ces deux disciplines, nous avons fait la démonstration que le planétarium numérique, avec la richesse de ses représentations et la possibilité qu'il offre d'observer les phénomènes astronomiques de divers points de vue et en accéléré, était un environnement virtuel d'une grande richesse pour l'enseignement et constituait ainsi un véritable environnement d'apprentissage constructiviste.

Restait enfin à déterminer les meilleures façons d'accompagner les apprenants dans leur utilisation du planétarium numérique en tant qu'environnement d'apprentissage constructiviste, ce qui fut l'objectif du quatrième volet de notre développement théorique. Nous nous sommes alors tourné vers l'étude des simulations en astronomie. Nous avons démontré que l'utilisation d'une simulation astronomique hautement réaliste et immersive, que les apprenants peuvent explorer tout en recevant de l'aide sous la forme d'une

scénarisation plus ou moins directive, était la meilleure façon de leur fournir des situations d'apprentissage riches et variées dans lesquelles ils peuvent s'investir dans une véritable construction de connaissances. Nous avons présenté à l'appui de notre thèse quelques exemples de recherches récentes qui ont démontré l'utilité d'une telle approche pour l'apprentissage de notions astronomiques, mais également mis au jour les besoins de guidage des apprenants plongés au cœur de ces simulations.

Fort de l'échafaudage théorique que nous venons de décrire de façon succincte, nous avons développé un scénario didactique utilisant un planétarium numérique pour enseigner le mécanisme des phases de la Lune à des jeunes de 12 à 14 ans. En particulier, notre scénario débutait par l'observation systématique des phases de la Lune pendant un mois, avec prise de notes et dessins d'observation de la part des apprenants, suivi d'une premier changement de point de vue (en orbite autour de la Lune) pour démontrer la sphéricité de la Lune et son éclairage par le Soleil. Un nouveau changement de point de vue nous amenait ensuite à observer le mouvement orbital de la Lune depuis l'extérieur de l'orbite terrestre, afin de tenter de réconcilier la vision spatiale de la Lune et son apparence depuis la surface terrestre. Nous avons ensuite changé à nouveau de point de vue (vue polaire), afin encore une fois de démontrer le mécanisme des phases. Après une brève observation des éclipses et un retour sur Terre pour observer à nouveau les phases de manière géocentrique et en modéliser le mécanisme par le biais d'une activité kinesthésique, nous sommes retournés dans l'espace observer les phases de Vénus et les phases de la Terre vue depuis la surface lunaire, dans un souci de réinvestissement de nos connaissances nouvellement acquises à propos du mécanisme des phases de la Lune.

Cette intervention didactique a été mise à l'essai en juillet 2012 en compagnie de six participants volontaires âgés de 12 à 14 ans. Afin de suivre au plus près l'évolution de leurs conceptions tout au long de l'intervention, nous les avons d'abord soumis à une batterie de questionnaires écrits les interrogeant sur leurs conceptions des phases de la Lune et leur connaissance d'un certain nombre de faits à propos de notre satellite, sa forme, sa position et ses mouvements dans l'espace, etc. Nous leur avons également fait remettre en ordre une

série de photographies plastifiées des phases de la Lune et fournis des balles et des ballons pour qu'ils illustrent les mouvements de la Lune dans l'espace. Tout au long de l'intervention didactique sous le dôme du planétarium, nous avons entretenu un dialogue (enregistré) dont l'analyse nous a fourni les traces nécessaires pour retracer l'évolution de leurs conceptions. Enfin, après l'intervention, les participants ont à nouveau répondu aux mêmes questionnaires et décrit dans leurs mots le mécanisme des phases de la Lune.

L'analyse approfondie des réponses aux questionnaires et des transcriptions des activités pré- et post-traitement et de l'intervention elle-même nous ont permis de mettre à jour une véritable évolution conceptuelle à propos des phases de la Lune et de son mécanisme chez au moins cinq des six participants à notre étude. En particulier, nous avons remarqué une plus grande facilité à dessiner et à nommer les différentes phases de la Lune chez tous les participants, de même qu'une description plus juste du mécanisme des phases dans les mots et dans les réponses écrites de quatre des cinq participants chez qui une évolution conceptuelle s'est manifestée. En prime, nous avons été témoins de véritables percées conceptuelles lorsque des participants ont spontanément réinvesti le mécanisme des phases au cas de Mercure et des satellites de Jupiter. Enfin, les participants nous ont répété à quel point leur participation avait été motivante et combien un des éléments centraux de notre intervention, soit le voyage virtuel dans l'espace pour observer le mécanisme des phases « de l'extérieur », avait été révélateur pour eux.

Ces résultats sont tout-à-fait encourageants, mais dans le contexte d'une recherche de développement, ils ne constituent qu'une étape sur le chemin du raffinement de notre intervention didactique. C'est ainsi que nous avons également analysé l'ensemble de l'intervention à la recherche d'améliorations possibles, à la lumière du détail de son déroulement, de ses résultats, mais aussi des bases théoriques qui ont mené à sa conception. Par exemple, avec le recul, il nous apparaît que le détour par l'observation d'éclipses de Lune et de Soleil est sans doute inutile, tandis que l'exploration du mécanisme de la face cachée de la Lune semble dorénavant incontournable afin de bien distinguer la rotation de

notre satellite de ses phases. D'autre part, réinvestir nos connaissances nouvellement acquises au cas des satellites de Jupiter ou Saturne serait sans aucun doute très « payant » d'un point de vue didactique. Du point de vue méthodologique, le chercheur fait le constat qu'on aurait pu multiplier le nombre de traces disponibles pour l'analyse, en particulier au cours de la séance sous le dôme, afin de documenter de manière encore plus détaillée le travail des participants sur leurs conceptions. Les questionnaires et les activités pré- et post-traitement pourraient également être resserrées afin de réduire la durée totale de la séance, qui a duré trois heures et à la fin de laquelle les participants étaient clairement fatigués.

À la lumière des résultats que nous venons de rappeler brièvement, que pouvons-nous répondre aux questions de recherche qui ont guidé notre action (voir 2.5) et que nous rapportons ci-dessous ? Nos réponses suivent l'énoncé de chacune des questions

1. Quelles sont les principales conceptions des apprenants à propos des phases de la Lune avant l'intervention didactique ?

Comme on pouvait s'y attendre, plusieurs conceptions différentes ont été exprimées par les participants à notre étude. Deux d'entre eux rappelaient la conception voulant que ce soit l'ombre de la Terre ou un autre objet qui nous masque la partie de la Lune invisible lors des phases partielles. Un autre invoquait la position du Soleil à son coucher, tandis que deux participants évoquaient la position de la Lune par rapport au Soleil ou à la Terre, une conception assez proche de l'explication scientifique. En ce qui concerne la succession des phases au cours du mois lunaire, un participant a exprimé une conception fort originale voulant que la Lune se « remplisse » de la nouvelle Lune à la pleine pour redevenir ensuite nouvelle. Il s'agit clairement d'une interprétation tout-à-fait appropriée d'une expression (la pleine Lune) qui l'est beaucoup moins. Nous n'avons jamais rencontré une telle conception dans les recensions auparavant. Rappelons que le recueil de cette information était crucial pour mesurer le chemin conceptuel parcouru par les participants à la suite de l'intervention didactique.

-
2. De quelle manière les conceptions des apprenants à propos des phases de la Lune ont-elles évolué pendant l'intervention didactique et après ?

Comme nous le rapportions précédemment, nous avons pu constater une véritable évolution des conceptions des apprenants à propos des phases de la Lune et du mécanisme à l'origine du phénomène chez au moins cinq des six participants à notre étude. Chez quatre d'entre eux, cette évolution s'est fortement approchée de la conception scientifique du mécanisme des phases, ce qu'il nous a été permis de constater tant dans les réponses écrites aux questionnaires qu'en entrevue de groupe post-traitement. Il ne fait pas de doute que cette évolution est le fruit de la participation des apprenants à l'intervention didactique sous le dôme du planétarium.

3. Quels aspects de la simulation sont les plus efficaces pour promouvoir le changement conceptuel chez les apprenants ?

Dans les mots mêmes des participants, le fait de se rendre virtuellement dans l'espace pour observer la forme et les mouvements de la Lune depuis un point de vue extérieur à la surface terrestre a été un élément central de la séance et l'un des aspects les plus appréciés des participants. Nous considérons donc qu'il s'agit d'un aspect très efficace de notre intervention. Nous croyons également que l'observation systématique des phases de la Lune pendant un mois, avec prise de notes et dessins, et l'observation des phases de Vénus et de la Terre (vues de la Lune) ont été des moments forts de notre intervention, à en juger par les réactions des apprenants en cours de séance et leurs commentaires post-traitement à propos des phases des satellites de Jupiter.

4. Quelles améliorations peut-on apporter à la simulation, à la lumière des résultats de sa première mise en application et des présupposés théoriques qui la sous-tendent ?

Tout au long de notre analyse des traces de la première mise en œuvre de notre intervention didactique, nous avons relevé de nombreuses améliorations possibles, certaines d'ordre esthétiques, d'autres ayant trait à un meilleur échafaudage et un guidage plus précis

des apprenants pour leur indiquer les faits saillants à considérer. D'autres améliorations nous apparaissent toutefois plus importantes et devront faire l'objet de mises à l'essai lors de futures itérations de notre intervention didactique. Citons en exemple la prise de mesure d'angles par les apprenants lors de l'observation systématique des phases de la Lune, l'observation de la face cachée de la Lune et l'explication du mécanisme à l'origine du phénomène, l'observation des phases des satellites de Jupiter, etc. Du point de vue méthodologique, les questionnaires pré- et post-traitement devront être revus, simplifiés et raccourcis, tandis que les entrevues de groupe devront permettre d'interroger les participants de manière plus approfondie à propos de leurs conceptions. De même, au cours de l'intervention elle-même, les occasions de recueillir des traces devront être multipliées afin de suivre de manière encore plus détaillée l'évolution des conceptions des participants.

Malgré des résultats plus qu'encourageants, notre recherche n'en comporte pas moins d'importantes limites. Ainsi, nous avons testé notre intervention didactique auprès d'un nombre restreint de participants, ce qui nous interdit d'en étendre les conclusions à un plus grand nombre, comme par exemple un groupe-classe. Le dôme gonflable et les équipements de projection utilisés, bien que très fonctionnels et efficaces, n'offrent pas le même environnement immersif qu'un dôme fixe de plus grand diamètre équipé de projecteurs de plus haute résolution et offrant un environnement sonore plus enveloppant. De plus, il ne s'agissait pas d'une mise en œuvre dans un milieu véritablement « naturel » comme pourrait l'être une telle intervention auprès de groupes d'élèves qui visitent un planétarium dans le cadre d'une sortie scolaire. Enfin, les conclusions générales que nous avons tirées de l'analyse de nos résultats ne s'appliquent qu'au thème étudié des phases de la Lune.

Mais cela ne doit pas nous empêcher d'imaginer d'autres avenues où appliquer le fruit de ce que nous avons développé dans le cadre de la présente thèse. Premièrement, il reste à peaufiner l'intervention didactique que nous avons développée jusqu'à présent à la lumière des résultats obtenus, afin d'en faire un outil didactique encore plus efficace. Cela fera l'objet d'un travail qui se poursuivra au-delà de la présente thèse. Ensuite, il nous

faudra réfléchir à la meilleure manière de déployer cette même intervention didactique sous la voûte d'un théâtre de planétarium de plus grand diamètre capable d'accueillir un plus grand nombre d'élèves ou de spectateurs, puisque de telles interventions pourraient également être proposées au public qui visite le planétarium en famille ou en groupe. Enfin, il nous faudra extraire de notre intervention didactique les éléments (théoriques et pratiques) qui permettront de développer d'autres interventions tout aussi efficaces à propos d'autres phénomènes astronomiques à forte composante spatiale, comme par exemple les saisons, les éclipses, etc.

Ce que nous proposons ici est, en réalité, l'ébauche d'un vaste programme de recherche dans le domaine encore vierge de l'utilisation d'un planétarium numérique offrant des capacités accrues de visualisation spatiale pour l'enseignement de concepts astronomiques à des élèves du primaire et du secondaire, concepts visés par le Programme de formation de l'école québécoise et que l'école peine à enseigner correctement à l'aide des outils limités auxquels elle a accès. Avec l'aide du planétarium numérique, le développement, chez les élèves de même que chez le grand public, d'une véritable compréhension des mécanismes à l'origine de nombreux phénomènes astronomiques observables au quotidien nous semble à portée de la main.

Bibliographie

- Abbatantuono, B. P. (1994). *Armand Neustadter Spitz and His Planetaria, With Historical Notes of the Model A at the University of Florida*. Mémoire de Maîtrise (inédit), University of Florida (Gainesville, Floride).
- Abell, S., George, M. & Martini, M. (2002). *The Moon Investigation: Instructional Strategies for Elementary Science Methods*. *Journal of Science Teacher Education*, 13(2), 85-100.
- Adams, J. P. & Slater, T. F. (2000). *Astronomy in the National Science Education Standards*. *Journal of Geoscience Education*, 48, 39-45.
- Agan, L. (2004). *Stellar Ideas: Exploring Students' Understanding of Stars*. *Astronomy Education Review*, 3(1), 77-97.
- Akey, J. M. (1973). *The Behavioral Selection of Planetarium Concepts Appropriate for Second Grade Students*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Northern Colorado (Greeley, Colorado).
- Albanese, A., Danhoni-Neves, M. C. & Vincentini M. (1997). *Models in Science and in Education: A Critical Review of Research on Students' Ideas About the Earth and its Place in the Universe*. *Science & Education*, 6, 573-590.
- Alessi, S. M. (1988). *Fidelity in the Design of Instructional Simulations*. *Journal of Computer-Based Instruction*, 15(2), 40-47.
- Allard, M. & Boucher, S. (1991). *Le musée et l'école*. Montréal : HMH.
- Allard, M. (1993). *Le musée comme lieu d'apprentissage*. *Vie pédagogique*, 84(mai-juin), 41-43.
- Allard, M., Boucher, S. & Forest, L. (1993). *Effets du nombre de visites dans un programme éducatif muséal*. *Revue des sciences de l'éducation*, 19(2), 275-290.
- Allard, M., Larouche, M.-C., Lefebvre, B., Meunier, A. & Vadeboncoeur, G. (1995). *La visite au musée*. Réseau, déc. 1995-janv. 1996, 14-19. Disponible en ligne : <http://www.unites.uqam.ca/grem/pdf/la-visite-au-musee.pdf> (consulté le 2 juin 2011).
- Ankney, P. H. (1981). *Classroom Planetarium*. *Science and Children*, 19(2), 36-37.

- Artigue, M. (1996). Ingénierie didactique. Dans J. Brun (éd.), *Didactique des mathématiques*. Paris : Delachaux & Niestlé. 243-274.
- Astolfi, J.-P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y. & Toussaint, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Paris-Bruxelles : De Boeck Université (coll. Pratiques pédagogiques).
- Astolfi, J.-P. & Develay, M. (2002). *La didactique des sciences (6^e édition)*. Paris : PUF.
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B. & Vérin, A. (2001). *Comment les enfants apprennent les sciences ?* Paris : Retz (coll. Pédagogies).
- Atwood, R. K. & Atwood, V. A. (1996). *Preservice Elementary Teachers' Conceptions of the Causes of the Seasons*. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(5), 553-563.
- Atwood, V. A. & Atwood, R. K. (1995). *Preservice Elementary Teachers' Conceptions of What Causes Night and Day*. *School Science and mathematics*, 95(6), 290-294.
- Auld, L. (1995). *Differences Between 3D Computing and Virtual Reality*. *VR in the Schools*, 1(3). Disponible en ligne : <http://vr.coe.ecu.edu/vrits/1-3auld.htm> (consulté le 31 octobre 2006).
- Ausubel D. P. (1968). *Educational Psychology: A Cognitive View*. New York, NY : Holt, Rinehart & Winston.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bachelard, G. (1940). *La philosophie du non*. Paris : PUF.
- Bailey, J. M. & Slater, T. F. (2003). *A Review of Astronomy Education Research*. *Astronomy Education Review*, 2(2), 20-45.
- Bailey, J. M., Prather, E. E. & Slater, T. F. (2004). *Reflecting on the History of Astronomy Education Research to Plan for the Future*. *Advances in Space Research*, 34(10), 2136-2144.
- Bakas, C. & Mikropoulos, T. A. (2003). *Design of Virtual Environments for the Comprehension of Planetary Phenomena Based on Students' Ideas*. *International Journal of Science Education*, 25(8), 949-967.

-
- Bannan-Ritland, B. (2003). *The Role of Design in Research: The Integrative Learning Design Framework*. *Educational Researcher*, 32(1), 21-24
- Barab, S. A., Hay, K. E., Barnett, M. & Keating, T. (2000). *Virtual Solar System Project: Building Understanding Through Model Building*. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(7), 719-756.
- Barab, S. A., Hay, K. E., Squire, K., Barnett, M., Schmidt, R., Karrigan, K., Yamagata-Lynch, L. & Johnson, C. (2000). *Virtual Solar System Project: Learning Through a Technology-Rich, Inquiry-Based, Participatory Learning Environment*. *Journal of Science Education and Technology*, 9(1), 7-25.
- Barnes, J. (1969). *Instructional Media and the Learning Process*. *Educational Technology*, 9(12), 59-62.
- Barnett, M., Barab, S. A. & Hay, K. E. (2001). *The Virtual Solar System Project: Student Modeling of the Solar System*. *The Journal of College Science Teaching*, 30(5), 300-305.
- Barnett, M. & Morran, J. (2002). *Addressing Children's Alternative Frameworks of the Moon's Phases and Eclipses*. *International Journal of Science Education*, 24(8), 859-879.
- Barnett, M., Yamagata-Lynch, L., Keating, T., Barab, S. A. & Hay, K. E. (2005). *Using Virtual Reality Computer Models to Support Student Understanding of Astronomical Concepts*. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 24(4), 333-356.
- Battaglini, D. W. (1971). *An Experimental Study of the Science Curriculum Improvement Study Involving Fourth Graders' Ability to Understand Concepts of Relative Position and Motion Using the Planetarium as a Testing Device*. Thèse de Doctorat (inéédite), Michigan State University (East Lansing, Michigan).
- Baxter, J. (1989). *Children's Understanding of Familiar Astronomical Events*. *International Journal of Science Education*, 11, 502-513.

- Baxter, J. H. & Preece, P. F. W. (2000). *A Comparison of Dome and Computer Planetaria in the Teaching of Astronomy*. *Research in Science & Technological Education*, 18(1), 63-69.
- Beare, R. (2007). *Investigation into the Potential of Investigative Projects Involving Powerful Robotic Telescopes to Inspire Interest in Science*. *International Journal of Science Education*, 29(3), 279-306.
- Beetle, D. E. (1978). *Suggestions for Participatory Oriented Programs*. *The Planetarian*, 7(2), 25.
- Beier, K.-P. (s.d.). *Virtual Reality: A Short Introduction*. Disponible en ligne : <http://www-vrl.umich.edu/intro/index.html> (consulté le 18 décembre 2006).
- Bell, R. L. & Trundle, K. C. (2008). *The Use of a Computer Simulation to Promote Scientific Conceptions of Moon Phases*. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(3), 346-372.
- Berg, B. L. (2001). *Qualitative Research Methods for the Social Sciences (4th edition)*. Boston : Allyn and Bacon.
- Binns, I. C., Bell, R. L. & Smetana, L. K. (2010). *Using Technology to Promote Conceptual Change in Secondary Earth Science Pupils' Understandings of Moon Phases*. *Journal of the Research Center for Educational Technology (RCET)*, 6(2), 112-129.
- Bisard, W. J. (1979a). *An Experimental Study of the Relative Educational Impacts of Four Introductory Formats to a Public Planetarium Program*. Thèse de Doctorat (inéédite), Michigan State University (East Lansing, Michigan).
- Bisard, W. J. (1979b). *An Experimental Study of the Relative Educational Effects of Four Introductory Formats to a Public Planetarium Program*. *The Planetarian*, 8(4), 5-10.
- Bisard, W. J. (1980). *Designing an Experimental Research Project in a Planetarium*. *The Planetarian*, 9(1), 2-5.
- Bishop, J. E. (1976). *Planetarium Methods Based on the Research of Jean Piaget*. *The Planetarian*, 5(3), 3-8.

-
- Bishop, J. E. (1977a). *Astronomy Education in Primary School*. International Astronomical Union Commission 46 (Teaching of Astronomy) Newsletter, Décembre, 7(2).
- Bishop, J. E. (1977b). *Report of Second Grade Astronomy Project, 1976-77*. Rapport de recherche, Martha Holden Jennings Foundation & Westlake Public Schools Superintendent, Westlake (Ohio).
- Bishop, J. E. (1978). *Developing Students' Spatial Ability*. The Science Teacher, 45(8), 20-23.
- Bishop, J. E. (1980a). *The Development and Testing of a Participatory Planetarium Unit Emphasizing Projective Astronomy Concepts and Utilizing the Karplus Learning Cycle, Student Model Manipulation, And Student Drawing with Eight-Grade Students*. Thèse de doctorat (inédite), University of Akron (Akron, Ohio).
- Bishop, J. E. (1980b). *Children's Ideas of Space*. The Planetarian, 9(1), 24-26.
- Bishop, J. E. (1981). *Perception and Planetarium Programming*. The Planetarian, 10(4), 36-37.
- Bishop, J. E. (1988). *Dynamic Human (Astronomical) Models*. The Planetarian, 17(4), 25-27.
- Bishop, J. E. (2002). *Astronomy Concepts Appropriate for Different Ages*. Dans *Proceedings of the 16th IPS Conference*, Wichita (Kansas).
- Black, A. A. (2005). *Spatial Ability and Earth Science Conceptual Understanding*. Journal of Geoscience Education, 53(4), 402-414.
- Blown, E. J. & Bryce, T. G. K. (2006) *Knowledge Restructuring in the Development of Children's Cosmologies*. International Journal of Science Education, 28(12), 1411-1462.
- Bondurant, R. L., Jr (1975). *An Assessment of Certain Skills Possessed by Fifth-Grade Students Used to Successfully Identify Constellations in a Planetarium*. Thèse de Doctorat (inédite), Michigan State University, (East Lansing, Michigan).

- Brannen, J. (1992). Combining Qualitative and Quantitative Approaches: An Overview. Dans J. Brannen (éd.), *Mixing Methods: Qualitative and Quantitative Research*. Aldershot : Avebury. 3-37.
- Bransford, J. D., Brown, A. L. & Cocking, R. R. (1999). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*. Washington : National Academy Press.
- Brazell, B. D. & Espinoza, S. (2009). *Meta-analysis of Planetarium Efficacy Research*. *Astronomy Education Review*, 8(1). Disponible en ligne : <http://dx.doi.org/10.3847/AER2009033> (consulté le 15 septembre 2010).
- Bricken, M. (1991). *Virtual Reality Learning Environments: Potential and Challenges*. *Computer Graphics*, 25(3), 178-184.
- Brousseau, G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. Dans *Recherches en didactique des mathématiques*, 7(2). Grenoble : La Pensée sauvage.
- Brown, A. L. (1992). *Design Experiments: Theoretical and Methodological Challenges in Creating Complex Interventions in Classroom Settings*. *Journal of the Learning Sciences*, 2(2), 141-178.
- Brunello, C. (1992). *Entertainment and Education: Are They Compatible?* *The Planetarian*, 21(1), 10-14.
- Bruner, J. S. (1960). *The Process of Education*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Bruner, J. S. (1966). *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Bryce, T. G. K. & Blown, E. J. (2006). *Cultural Mediation of Children's Cosmologies: A Longitudinal Study of the Astronomy Concepts of Chinese and New Zealand Children*. *International Journal of Science Education*, 28(10), 1113-1160.
- Bryman, A. (1988). *Quantity and Quality in Social Research*. London, UK : Unwin Hyman.
- Bryman, A. (1992). Quantitative and Qualitative Research: Further Reflections on Their Integration. In J. Brannen (éd.), *Mixing Methods: Qualitative and Quantitative Research*. Aldershot : Avebury. 57-78.

-
- Burnette, W. N. (1976). *Use of the Planetarium in Changing Attitudes and Achievement in Earth-Space Science Education*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Missouri-Columbia (Columbia, Missouri).
- Butterfield, T. (2001). The Development of the Modern Planetarium. Dans *Proceedings of the 15th International Planetarium Society Conference*, Montréal (Québec). 143-145.
- Campbell, D. T. & Fiske, D. W. (1959). *Convergent and Discriminant Validation by the Multitrait-Multimethod Matrix*. *Psychological Bulletin*, 56(2), 81-105.
- Carey, S. (1985). *Conceptual Change in Childhood*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Carey, S. (1991). Knowledge Acquisition: Enrichment or Conceptual Change? Dans S. Carey & R. Gelman (éds), *The Epigenesis of Mind: Essays on Biology and Cognition*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Carey, S. (2000). *Science Education as Conceptual Change*. *Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 13-19.
- Carr, E. Q. (1976). *Multidiscipline Planetarium Instruction*. *The Planetarian*, 5(4), 16-19.
- Chamberlain, J. M. (1962). *The Administration of a Planetarium as an Educational Tool*. Thèse de Doctorat (inédite), Columbia University (New York, New York).
- Chartrand, M. R. III (1973). *A Fifty Year Anniversary of a Two Thousand Year Dream: The History of the Planetarium*. *The Planetarian*, 2(3), 95-101.
- Chastenay, P. (2007). Enseigner les sciences au planétarium. Dans P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (éds), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences*. Québec : MultiMondes. 135-151.
- Chi, M. T. H. (2008). Three Types of Conceptual Change: Belief Revision, Mental Model Transformation, and Categorical Shift. Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 61-82.
- Cid, X. C. & Lopez, R. E. (2010). *The Impact of Stereo Display on Student Understanding of Phases of the Moon*. *Astronomy Education Review*, 9(1). Accessible en ligne : <http://dx.doi.org/10.3847/AER2009044>

- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R. & Schauble, L. (2003). *Design Experiments in Educational Research*. *Educational Researcher*, 32(1), 9-13.
- Cobb, S. V., Neale, H., Crosier, J. & Wilson, J. R. (2002). Development and Evaluation of Virtual Environments for General and Special Needs Education. Dans K. M. Stanney (éd.), *Handbook of Virtual Environments*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum. 911-936.
- Cohen, C. (2001). *Quand l'enfant devient visiteur : une nouvelle approche du partenariat École/Musée*. Paris : L'Harmattan.
- Comins, N. F. (1998). Identifying and Addressing Astronomy Misconceptions in the Classroom. Dans Gouguenheim, L., D. McNally & J. R. Percy (éd.), *New Trends in Astronomy Teaching*. Cambridge : Cambridge University Press. 118-123.
- Comins, N. F. (s.d.). *Heavenly Errors: Common Misconceptions in Astronomy*. Disponible en ligne : <http://www.physics.umaine.edu/ncomins/miscon.htm> (consulté le 20 avril 2007).
- Conseil de la science et de la technologie (CST) (2002). *La culture scientifique et technique au Québec : Bilan*. Québec : Gouvernement du Québec/Éditions MultiMondes.
- Cottrill, P. K. (1976). *A Study Comparing Achievement of Fourth Grade Classes in Indirect and Direct Approaches to Planetarium Teaching*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Maryland (College Park, Maryland).
- Crowe, M. J. (2001). *Theories of the World From Antiquity to the Copernican Revolution (2nd revised edition)*. Mineola, NY : Dover.
- Cunningham, D. J., Duffy, T. M. & Knuth, R. A. (2000). *The Textbook of the Future*. Indiana University, Center for Research on Learning and Technology, Technical Report No. 14-00. Disponible en ligne : http://crlt.indiana.edu/publications/journals/tr14_00.pdf (consulté le 22 octobre 2006).
- Curtin, J. T. (1967). *An Analysis of Planetarium Program Content and the Classification of Demonstrator's Questions*. Thèse de Doctorat (inédite), Wayne State University (Détroit, Michigan).

-
- Danaia, L. & McKinnon, D. H. (2008). *Common Alternative Astronomical Conceptions Encountered in Junior Secondary Science Classes: Why Is This So?* *Astronomy Education Review*, 6(2), 32-53. Disponible en ligne : <http://aer.noao.edu/cgi-bin/article.pl?id=252> (consulté le 17 mars 2008).
- Davis, D. D. (1966). *New Skies for a New City*. *Sky and Telescope*, 31(4), 196-198.
- Davis, P. T. (1978). *A Study of Kindergarten Students in the Planetarium*. *The Planetarian*, 7(4), 3-6.
- De Ketele, J.-M., & Maroy, C. (2006). Quels critères de qualité pour les recherches en éducation ? Dans L. Paquay, M. Crahay & J.-M. De Ketele (éds.), *L'analyse qualitative en éducation*. Bruxelles : De Boeck. 219-249
- de Vecchi, G. & Giordan, A. (1988). *L'enseignement scientifique : comment faire pour que « ça marche » ?* Nice : Z'Éditions.
- Dean, N. J. & Lauck, G. M. (1972). *Planetarium Instruction: Using an Open-Sky Test*. *The Science Teacher*, 39(5), 54-55.
- Denzin, N. K. (1970). *Sociological Methods: A Sourcebook*. Chicago, IL : Aldine.
- Denzin, N. K. (1978). *The Research Act: A Theoretical Introduction to Sociological Methods*. New York, NY : McGraw-Hill.
- Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (1994). *Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, CA : Sage Publications.
- Design-Based Research Collective (2003). *Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry*. *Educational Researcher*, 32(1), 5-8.
- Diakidoy, I.-A. & Kendeou, P. (2001). *Facilitating Conceptual Change in Astronomy: A Comparison of the Effectiveness of Two Instructional Approaches*. *Learning and Instruction*, 11, 1-20.
- Dickenson, J., Leverton, D. & McLennan, I. (2002). Charting New Courses in the Planetarium World. Dans *Proceedings of the 16th International Planetarium Society Conference*, Wichita (Kansas). 280-284.

- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in Pieces. Dans G. Foreman & P. Pufall (éds), *Constructivism in the Computer Age*. Hillsdale, NJ : Erlbaum. 49-70.
- diSessa, A. A. (1993). *Toward an Epistemology of Physics*. *Cognition and Instruction*, 10(2 & 3), 105-225.
- diSessa, A. A. (2008). A Bird's-Eye View of the "Pieces" vs. "Coherence" Controversy (From the "Pieces" Side of the Fence). Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 35-60.
- Dobson, H. D. (1983). *An Experimental Study of the Effectiveness of the Planetarium in Teaching Selected Science Concepts in the Middle School*. Thèse de Doctorat (inéдите), Pennsylvania State University (University Park, Pennsylvanie).
- Dove, J. (2002). *Does the Man in the Moon Ever Sleep? An Analysis of Student Answers About Simple Astronomical Events: A Case Study*. *International Journal of Science Education*, 24(8), 823-834.
- Driscoll, M. P. (2002). *How People Learn (And What Technology Might Have To Do With It)*. ERIC Digest ED470032.
- Driver, R. (1981). *Pupils Alternative Frameworks in Science*. *European Journal of Science Education*, 3(1), 93-101.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Mortimer, E. & Scott, P. (1994). *Constructing Scientific Knowledge in the Classroom*. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Driver, R., Guesne, E. & Tiberghien, A. (1985). *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes, UK : Open University Press.
- Duffy, T. M. & Cunningham, D. J. (1996). Constructivism: Implications for the Design and Delivery of Instruction. Dans D. H. Jonassen (éd.), *Educational Communications and Technology*, New York, NY: Simon & Schuster Macmillan. 170-199.
- Duit, R. (s.d.). *Bibliography STCSE—Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. Disponible en ligne : <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html> (consulté le 20 mars 2007).
- Dunlop, J. (2000). *How Children Observe the Universe*. Publication of the Astronomical Society of Australia, 17, 194-206.

-
- Duschl, R. A., Hamilton, R. J. & Grandy, R. E. (1992). Psychology and Epistemology: Match or Mismatch When Applied to Science Education? Dans R. A. Duschl & R. J. Hamilton (éds), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology, and Educational Theory and Practice*. Albany (New York) : State University of New York Press. 19-47.
- Eastes, R.-E. & Pellaud, F. (2004). *Un outil pour apprendre : l'expérience contre-intuitive*. Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie, 98(juillet-août-septembre), 1197-1208.
- Edoff, J. D. (1982). *An Experimental Study of the Effectiveness of Manipulative Use in Planetarium Astronomy Lessons for Fifth and Eighth Grade Students*. Thèse de Doctorat (inédate), Wayne State University (Déroit, Michigan).
- Eid, M. & Diener, E. (2006). Take-home Message From the Editors. Dans M. Eid & E. Diener (éds), *Handbook of Multimethod Measurement in Psychology*. Washington : American Psychological Association. 457-463.
- Emmons, Richard H. (1950). *A Report on a School Planetarium: Its Design; Its development as a Group Project; Its Utility as an Instructional Aid; And Its Program in School Community Relations*. Thèse de Maîtrise (inédate), Kent State University (Ohio).
- Émond, A. M. (2005). Between Talk and Silence: The Friendly Stranger and the Reception of Contemporary Art. Actes de colloque, 8th *International Conference on Arts & Cultural Management*, Montréal, du 3 au 6 juillet. Disponible en ligne : http://neumann.hec.ca/aimac2005/PDF_Text/Emond_Anne-Marie.pdf (consulté le 18 avril 2007).
- Engeström, Y. (1991). *Non Scoale Sed Vitae Discimus: Towards Overcoming the Encapsulation of School*. *Learning and Instruction*, 1(3), 243-259.
- Ernest, P. (1995). The One and the Many. Dans L. Steffe & J. Gale (éd.) *Constructivism in Education*, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates. 459-486.

- Etheridge, D. A. (1974). The Planetarium, an Instructional Failure? Dans R. C. Tate (éd.), *Proceedings of the 1974 Conference of ISPE (ISPE Special Report No. 6)*. Atlanta, GA : ISPE. 47-51.
- Etheridge, D. A. (1976). *Simulation and Representation in Visual Learning: The Planetarium as a Simulation Device*. Thèse de Doctorat (inédiée), University of California - Los Angeles (Los Angeles, Californie).
- Fisher, M. S. (1997). *The Effect of Humor on Learning in a Planetarium*. *Science Education*, 81(6), 703-713.
- Fletcher, J. K. (1977). *An Experimental Comparison of the Effectiveness of a Traditional Type Planetarium Program and a Participatory Type Planetarium Program*. Thèse de Doctorat (inédiée), University of Virginia (Charlottesville, Virginie).
- Fluke, C. J. & Barnes, D. G. (2008). *The Interactive Astronomy Textbook*. *Astronomy Education Review*, 1(7), 113-125.
- Fowler, J. A. (1960). *The Place of Planetaria in Teaching Space Science*. *School Science and Mathematics*, 60(7), 539-543.
- Fraknoi, A. (éd.) (1995). *The Universe at your Fingertips*. San Francisco : Astronomical Society of the Pacific.
- Franchi, J. (1995). *Virtual Reality: an Overview*. ERIC Digest ED386178.
- Friedman, A. J. (1975). *Participatory Planetarium Shows*. *Planetarium Director's Handbook*, 32(mai-juin), 13-16.
- Friedman, A. J. (1993). *Stonehenge*. *Planetarium Activities for Student Success*, 12. Berkeley, CA : UCLA.
- Friedman, A. J., Bishop, J. E., Fletcher, J. & Mallon, G. (1981). *What Do Planetariums Do to Visitors?* *The Planetarian*, 10(4), 6-13.
- Friedman, A. J., Lowry, L. F., Pulos, S., Schatz, D. & Sneider, C. I. (1993). *Planetarium Educator's Workshop Guide (3rd edition, Revised and Updated)*. Berkeley, CA : Laurence Hall of Science.
- Friedman, A. J., Schatz, D. L. & Sneider, C. I. (1976). *Audience Participation and the Future of the Small Planetarium*. *The Planetarian*, 5(4), 3-8.

-
- Gardner, H. (1997). *Les formes de l'intelligence*. Paris : Odile Jacob.
- Gardner, M. H. (1964). *The Planetarium as an Educational Tool*. *Science Teacher*, 31, 14-15.
- Gazit, E, Chen, D. & Yair, Y. (2004). Developing Understanding of Basic Astronomical Concepts by Using a Virtual Solar System. Dans *Proceedings of the 6th International Conference on Learning Sciences*, Santa Monica (Californie), 22-26 juin 2004. 601.
- Gazit, E., Yair, Y. & Chen, D. (2005). *Emerging Conceptual Understanding of Complex Astronomical Phenomena by Using a Virtual Solar System*. *Journal of Science Education and Technology*, 14(5-6), 459-470.
- Giles, T. W. (1981). *A Comparison of the Effectiveness of Advance Organizers and Clustering Singly and in Combination Upon Learning in the Planetarium*. Thèse de Doctorat (inédate), Pennsylvania State University (University Park, Pennsylvanie).
- Giles, T. W. & Bell, P. E. (1982). *Investigating Learning Mediators in the Planetarium Classroom*. ERIC Document ED 220266.
- Gil-Perez, D. & Carrascosa-Alis, J. (1994). *Bringing Pupil's Learning Closer to a Scientific Construction of Knowledge: A Permanent Feature in Innovation in Science Teaching*. *Science Education*, 78(3), 301-315.
- Giordan, A. (1989). Vers un modèle didactique d'apprentissage allostérique. Dans *Constructions des savoirs, obstacles et conflits*. Ottawa : Agence d'Arc. 240-257.
- Giordan, A. & de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Neuchâtel-Paris : Delachaux & Niestlé.
- Giordan, A. & Pellaud, F. (2001). *Faut-il encore enseigner les sciences ?* Conférence prononcée dans le cadre du Colloque de la SOACHIM, Bamako, juillet 2001.
- Girault, Y., Sirard, P.-A., Bigeault, M., Rivest, A. & Monsché, E. (1993). *La science en spectacle au Planétarium : pertinences et limites*. Actes JIES XV, 363-370.
- Gorard, S., Roberts, K. & Taylor, C. (2004). *What Kind of Creature is a Design Experiment?* *British Educational Research Journal*, 30(4), 577-590.

- Gredler, M. E. (2004). Games and Simulations and their Relationships to Learning. Dans D. H. Jonassen (éd.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology (2nd edition)*, Mahwah, NJ : Laurence Erlbaum Associates. 571-581.
- Griffin, J. C. (1978). *The Affective Value of Planetarium Related Curricula in High-, Middle- and Low-Achieving Secondary School Students*. Thèse de Doctorat (inédite), University of North Texas (Denton, Texas).
- Guichard, J. (1995). *Nécessité d'une recherche éducative dans les expositions à caractère scientifique et technique*. *Publics et musées*, 7(7), 95-115.
- Guilbert, E. H. (1972). *A Standardized Test in Collegiate Descriptive Astronomy on Selected Concepts Which Can Be Demonstrated in the Planetarium*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Southern Mississippi (Hattiesburg, Mississippi).
- Gutsch, W. A. (1978). *Obtaining and Analyzing Affective Response Profiles in a Planetarium Environment: An Exploratory Study*. Thèse de doctorat (inédite), University of Virginia (Charlottesville, Virginie).
- Gutsch, W. A., Bishop, J. E., Elvert, J., Gijzenbergs, J. & Schafer, S. (2000). Education vs. Entertainment in the Planetarium: The Mini-Wheats® Debate. Dans *Proceedings of the 15th IPS Conference*, Montréal (Québec).
- Hacker, R. G. (1986). *Class Gender and Science Teaching Processes*. *European Journal of Science Education*, 8, 57-71.
- Hagar, C. F. (1973). *The History of the Planetarium (Part 1)*. *The Planetarian*, 2(4), 151-155.
- Hagar, C. F. (1974). *The History of the Planetarium (Part 2)*. *The Planetarian*, 3(1-2), 42-47.
- Hagar, C. F. (1980). *Window to the Universe*. Oberkochen : Carl Zeiss.
- Hamilton, T. W. (1976). *Reading Scores and Planetarium Visits: A Correlation*. *The Planetarian*, 5(3), 18-19.
- Hansen, J. A., Barnett, M., MaKinster, J. G. & Keating, T. (2004a). *The Impact of Three-dimensional Computational Modeling on Student Understanding of Astronomy*

-
- Concepts: A Quantitative Analysis*. International Journal of Science Education, 26(11), 1365-1378.
- Hansen, J. A., Barnett, M., MaKinster, J. G. & Keating, T. (2004b). *The Impact of Three-dimensional Computational Modeling on Student Understanding of Astronomy Concepts: A Qualitative Analysis*. International Journal of Science Education, 26(13), 1555-1575.
- Harlen, W. & Jelly, S. (2000). *Vivre des expériences en science et en technologie avec des élèves du primaire*. Montréal : ERPI (L'école en mouvement).
- Harper, B., Squires, D. & McDougall, A. (2000). *Constructivist Simulations in the Multimedia Age*. Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 9(2), 115-130.
- Harvey, S. & Loisel, J. (2009). *Proposition d'un modèle de recherche développement*. Recherches qualitatives, 28(2), 95-117.
- Hatada, T., Sakata, H. & Kusaka, H. (1980). *Psychophysical Analysis of the "Sensation of Reality" Induced by a Visual Wide-Field Display*. SMPTE Journal, 89, 560-569.
- Hayward, R. R. (1975). *The Developing and Field Testing of an Instrument Using the Planetarium to Evaluate the Attainment of the Concept of Annual Motion*. Thèse de doctorat (inédite), Georgia State University (Atlanta, Géorgie).
- Hedges, K. (1983). *Fantasy, Fact, and Fun: Some Approaches to Children's Shows in Large Planetarium*. The Planetarian, 12(3), 33-34.
- Hewson, P. W. & Thorley, N. R. (1989). *The Condition of Conceptual Change in the Classroom*. International Journal of Science Education, 11, 541-553.
- Heyde, R. (1972). *A Model of Strategies for Planetarium Education Instruction*. School Science and Mathematics, 72(3), 201-207.
- Hill, L. C. (1989). *Spatial Thinking and the Astronomical Endeavors: Theoretical Issues and Pedagogical Implementations*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Iowa (Iowa City, Iowa).

- Hobson, S. M., Trundle, K. C. & Saçkes, M. (2010). *Using a Planetarium Software Program to Promote Conceptual Change with Young Children*. *Journal of Science Education and Technology*, 19(2), 165-176.
- Hoffman, B. (s.d). *Encyclopedia of Educational Technology*. San Diego State University, Department of Educational Technology. Disponible en ligne : <http://coe.sdsu.edu/eet/> (consulté le 8 novembre 2006).
- Hogle, J. G. (1995). *Computer Microworlds in Education: Catching up with Danny Dunn*. Disponible en ligne : <http://twinpinefarm.com/pdfs/microwld.pdf> (consulté le 11 janvier 2011).
- Honebein, P. C. (1996). Seven Goals for the Design of Constructivist Learning Environments. Dans B. Wilson (éd.), *Constructivist Learning Environments: Case Studies in Instructional Design*, Englewood Cliffs (NJ) : Educational Technology Publications. 11-24.
- Hough, L. W. & Piper, M. K. (1982). *The Relationship Between Attitudes Toward Science and Science Achievement*. *Journal of Research in Science Teaching*, 19(1), 33-38.
- Howell, D. C. (1998). *Méthodes statistiques en sciences humaines*. Bruxelles : De Boeck.
- Hufnagel, B., Slater, T., Deming, G., Adams, J., Lindell Adrian, R., Brick, C. & Zeilik, M. (s.d). *Pre-Course Results from the Astronomy Diagnostic Test*. Accessible en ligne : <http://solar.physics.montana.edu/aae/adt/> (consulté le 11 février 2008).
- Hunt, J. L. (1991). *Planetarium Visuals: Research Questions and Proposals*. *The Planetarian*, 21(1), 15-19, 21.
- Inagaki, K. & Hatano, G. (2008). Conceptual Change in Naïve Biology. Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 240-262.
- International Planetarium Society (IPS) (2010). *The IPS Directory of the World's Planetariums*.
- Jagger, M. (1959). *Planetaria and Their Use for Education (Volume 1)*. Bloomfield, MI : Cranbrook Institute of Science, Bulletin no 38.

-
- Jamison, M. M. (1972). *A Consideration of the Planetarium and the Lecturer as Agents to Effect Change in Administrators Regarding Social Attitudes in the School and the Community*. Thèse de doctorat (inédiée), University of Illinois at Urbana-Champaign (Urbana-Champaign, Illinois).
- Jarman, R. & McAleese, L. (1996). *Physics for the Star-gazer: Pupils' Attitudes to Astronomy in the Northern Ireland Science Curriculum*. *Physics Education*, 31, 223-226.
- Jelfs, A. & Whitelock, D. (2000). *The Notion of Presence in Virtual Learning Environments: What Makes the Environment "Real"*. *British Journal of Education Technology*, 31(2), 145-152.
- Johnson, A., Moher, T., Ohlsson, S. & Gillingham, M. (1999). The Round Earth Project: Deep Learning in a Collaborative Virtual World. Dans *Proceedings of IEEE VR '99*, Houston (Texas). 164-171.
- Johnston, R. A. (1981). *A Comparison of the Effectiveness of Two Instructional Techniques in a Planetarium Setting*. Thèse de Doctorat (inédiée), University of North Carolina at Chapel Hill (Chapel Hill, Caroline du Nord).
- Johsua, S. & Dupin, J. J. (1989). *Représentations et modélisations : le « débat scientifique » dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- Johsua, S. & Dupin, J. J. (1999). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : PUF.
- Jonassen, D. H. (s.d.). *Constructivist Learning Environments*. Disponible en ligne : <http://www.coe.missouri.edu/~jonassen/courses/CLE/> (consulté le 22 octobre 2006).
- Jonassen, D. H. (1991). *Objectivism vs. Constructivism*. *Educational Technology Research and Development*, 39(3), 5-14.
- Jonassen, D. H. (1994). *Toward a Constructivist Design Model*. *Educational Technology*, 34(4), 34-37.
- Jonassen, D. H. (2004). *Handbook of Research on Educational Communications and Technology (2nd edition)*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

- Jonassen, D. H., Peck, K. L. & Wilson, B. G. (1999). *Learning with Technology: A Constructivist Perspective*. Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall.
- Jonassen, D. H., Mayes, T. & McAleese, R. (1993). A Manifesto for a Constructivist Approach to Technology in Higher Education. Dans T. Duffy, D. Jonassen & J. Lowyck (éds), *Designing Constructivist Learning Environments*. Heidelberg : Springer-Verlag.
- Jones, B. L., Lynch, P. P. & Reesink, C. (1987). *Children's Conceptions of the Earth, Sun and Moon*. International Journal of Science Education, 9(1), 43-53.
- Jones, R. A. (2000). *Méthodes de recherche en sciences humaines*. Bruxelles : De Boeck.
- Kalawsky, R. S. (1996). *Exploiting Virtual Reality Techniques in Education and Training: Technological Issues*. Rapport technique, Loughborough University of Technology. Disponible en ligne : <http://www.agocg.ac.uk/reports/virtual/vrtech/title.htm> (consulté le 27 mars 2007).
- Kang, N.-H. & Howren, C. (2004). Teaching for Conceptual Understanding. *Science and Children*, 42(1), 28-32.
- Karsenti, T., & Savoie-Zajc, L. (2004). *La recherche en éducation : étapes et approches* (3e éd.). Montréal : Éditions du CRP.
- Kavanagh, C., Agan, L. & Sneider, C. (2005). *Learning about Phases of the Moon and Eclipses: A Guide for Teachers and Curriculum Developers*. Astronomy Education Review, 4(1). Disponible en ligne : <http://dx.doi.org/10.3847/AER2005002>
- Keating, T., Barnett, M., Barab, S. A. & Hay, K. E. (2002). *The Virtual Solar System Project: Developing Conceptual Understanding of Astronomical Concepts Through Building Three-Dimensional Computational Models*. Journal of Science Education and Technology, 11(3), 261-275.
- Keil, F. C. & Newman, G. E. (2008). Two Tales of Conceptual Change: What Changes and What Remains the Same. Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 83-101.

-
- Kelly, A. E., Lesh, R. A. & Baek, J. Y. (2008). *Handbook of Design Research Methods in Education: Innovations in Science, Technology, Engineering, and Mathematics*. New York, NY: Routledge.
- Kerawalla, L., Luckin, R., Seljeflot, S. & Woolard, A. (2006). "Making It Real": Exploring the Potential of Augmented Reality for Teaching Primary School Science. *Virtual Reality*, 10(3-4), 163-174.
- Kikas, E. (2006). *The Effect of Verbal and Visuo-spatial Abilities on the Development of Knowledge of the Earth*. *Research in Science Education*, 36(3), 269-283.
- King, L. A. (1974). *Interpreting Contemporary Research in the Effectiveness of the Planetarium as a Teaching Aid*. Atlanta, GA : International Society of Planetarium Educators. 56.
- Klein, C. A. (1982). *Children's Concepts of the Earth and the Sun: A Cross Cultural Study*. *Science Education*, 65(1), 95-107.
- Kobel, R. A. (1963). *A Study of the Educational Uses of Planetaria*. Mémoire de Maîtrise (inédit), Kansas State College of Pittsburgh (Pittsburgh, Pennsylvanie).
- Korey, R. A. (1963). *Contributions of Planetariums to Elementary Education*. Thèse de Doctorat (inédite), Fordham University (New York, New York).
- Krathwohl, D. R. (1993). *Methods of Educational and Social Science Research: An Integrated Approach*. New York, NY : Longman.
- Küçüközer, H. (2008). *The Effects of 3D Computer Modelling on Conceptual Change About Seasons and Phases of the Moon*. *Physics Education*, 43(6), 632-636.
- Küçüközer, H., Korkusuz, M. E., Küçüközer, H. A. & Yürümezoglu, K. (2009). *The Effect of 3D Computer Modeling and Observation-Based Instruction on the Conceptual Change Regarding Basic Concepts of Astronomy in Elementary School Students*. *Astronomy Education Review*, 8(1). Accessible en ligne : <http://dx.doi.org/10.3847/AER2009006>
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, IL : University of Chicago Press.

- Lakatos, I. (1970). Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. Dans I. Lakatos & A. Musgrave (éds.), *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Landry, N. (2006). *Vers une classification du domaine perceptuel en éducation préprimaire, proposition d'un construit théorique*. Thèse de doctorat (inédate), Université du Québec à Montréal (Montréal, Québec).
- Lantz, E. (2002). The Digital Planetarium. Dans *Proceedings of the 16th International Planetarium Society Conference*, Wichita (Kansas). 125-129.
- Lantz, E. (2007). A Survey of Large-Scale Immersive Displays. Dans *Emerging Display Technology Conference Proceedings*, ACM SIGGRAPH.
- Lavelli, M., Pantoja, P. F., Hsu, H., Messinger, D. & Fogel, A. (2005). Using Microgenetic Designs to Study Change Processes. Dans D. G. Teti (éd.), *Handbook of Research Methods in Developmental Psychology*. Blackwell. 41-65.
- Lefoe, G. (1998). Creating Constructivist Learning Environments on the Web: The Challenge in Higher Education. Dans *Proceedings of the 15th Annual Conference of the Australian Society for Computers in Learning in Tertiary Education*, Wollongong (Australie), 14-16 décembre 1998. 453-464.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation* (3^e éd.). Montréal : Guérin.
- Lelliott, A. & Rollnick, M. (2010). *Big Ideas: A Review of Astronomy Education Research 1974-2008*. *International Journal of Science Education*, 32(13), 1771-1799.
- Lin, J. J.-W., Duh, H. B. L., Parker, D. E., Abi-Rached, H. & Furness, T.A. (2002). Effects of Field of View on Presence, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment. Dans *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference 2002*. 164-171.
- Lind, K. K. (2000). *Exploring Science in Early Childhood Education* (3rd ed.). Albany, NY : Delmar Thompson Learning.
- Lindell, R. S. & Olsen, J. P. (2002). Developing the Lunar Phases Concept Inventory. In S. Franklin, K. Cummings & J. Marx (éds), *Proceedings of the 2002 Physics Education Research Conference*, 7-8 août, Boise (Idaho). New York : PERC

Publishing. Accessible en ligne:

<http://piggy.cis.rit.edu/franklin/perc2002/Lindell.pdf> (consulté le 11 février 2008).

- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). *Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta-Analysis*. *Child Development*, 56(6), 1479-1498.
- Liu, S.-C. (2005). *Models of "The Heavens and the Earth": An Investigation of German and Taiwanese Students' Alternative Conceptions of the Universe*. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 3(2), 295-325.
- LoPresto, M. C. & Murrell, S. R. (2011). *An Astronomical Misconceptions Survey*. *Journal of College Science Teaching*, 40(5), 38-46.
- Lowry, W. H. (1984). *A Consideration of Visual Pattern Perception Readiness as Related to Constellation Study*. *The Planetarian*, 13(3), 34-37.
- Mali, G. B. & Howe, A. (1979). *Development of Earth and Gravity Concepts Among Nepali Children*. *Science Education*, 63(5), 685-691.
- Mallon, G. L. (1974). *A Pilot Study: Tape vs Live Teaching*. *Science Activities*, 11(novembre-décembre), 10-11.
- Mallon, G. L. (1980). *Students' Achievement and Attitudes in Astronomy: An Experimental Study of the Effectiveness of a Traditional "Star Show" Planetarium Program and a "Participatory Oriented" Planetarium Program*. Thèse de doctorat (inédite), Temple University (Philadelphie, Pennsylvanie).
- Mallon, G. L. & Bruce, M. H. (1982). *Student Achievement and Attitudes in Astronomy: An Experimental Comparison of Two Planetarium Programs*. *Journal of Research in Science Teaching*, 19(1), 53-61.
- Manning, J. G., Ciupik, L., Hennig, L. A. A., Itoh, S. & Kraupe, T. W. (2000). *The Future of the Planetarium*. Dans *Proceedings of the 15th IPS Conference*, Montréal (Québec).
- Marché II, J. D. (1999). *Theaters of Time and Space: The American Planetarium Community, 1930-1970*. Thèse de Doctorat (inédite), Indiana University (Bloomington, Indiana).

- Marché II, J. D. (2001). *Sputnik, Planetaria and the Rebirth of U.S. Astronomy Education*. *The Planetarian*, 30(1), 4-9.
- Martinez Pena, B. & Gil Quilez, M. J. (2001). *The Importance of Images in Astronomy Education*. *International Journal of Science Education*, 23(11), 1125-1135.
- Masson, S. (2007). Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences. Dans P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (éds), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences*. Québec : MultiMondes. 308-321.
- Mathewson, J. H. (1999). *Visual-Spatial Thinking: An Aspect of Science Overlooked by Educators*. *Science Education*, 83(1), 33-54.
- Mathison, S. (1988). Why Triangulate? *Educational Researcher*, 17(2), 13-17.
- Maxwell, J. (1999). *La modélisation de la recherche qualitative*. Fribourg : Éditions Universitaires.
- McBride, J. M. (1985). *The Morehead Planetarium: A Client Market Analysis*. Thèse de Doctorat (inédite), University of North Carolina at Chapel Hill (Chapel Hill, Caroline du Nord).
- McCloskey, M. (1983). *Intuitive Physics*. *Scientific American*, 248(4), 122-130.
- McDonald, D. E. (1966). *The Utilization of Planetaria and Observatories in Secondary Schools*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Pittsburgh (Pittsburgh, Pennsylvanie).
- McLellan, H. (1996). Virtual Realities. Dans D. H. Jonassen (éd.), *Handbook of Research for Educational Communications and Technology*, New York, NY : Simon & Schuster Macmillan. 457-487.
- Mergler, R. (1975). *The Planetarium in the Junior High Science Curriculum*. *School Science and Mathematics*, 75(7), 591-592.
- Meyer, J. R. (2000). *The Effects of Three Types of Pre- and Post-Planetarium/Starlab Visit Instruction Methods on Astronomy Concepts and Attitudes of Sixth Grade Students*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Missouri-Kansas City (Kansas City, Missouri).

-
- Miller, B. W. & Brewer, W. F. (2010). *Misconceptions of Astronomical Distances*. International Journal of Science Education, 32(12), 1549-1560.
- Ministère de l'éducation du Québec (MEQ). (2001). *Programme de formation de l'école québécoise - Éducation préscolaire et enseignement primaire*. Québec : Gouvernement du Québec.
- Moore, M. G. (1965). *An Analysis and Evaluation of Planetarium Programming as it Relates to the Science Education of Adults in the Community*. Thèse de Doctorat (inédiée), Michigan State University (East Lansing, Michigan).
- Moore, P. (1995). *Learning and Teaching in Virtual Worlds: Implications of Virtual Reality For Education*. Australian Journal of Educational Technology, 11(2), 91-102.
- Muhl, G. (1975). *Seeking a Unique Role for Planetarium Educational Programming*. The Planetarian, 4(3-4), 7-12.
- Mulholland, J. & Ginns, I. (2008). *College MOON Project Australia: Preservice Teachers Learning about the Moon's Phases*. Research in Science Education, 38(3), 385-399.
- National Research Council (NRC) (2002). *Scientific Research in Education*. Washington, DC : National Academy Press.
- Nevius, J. R. (1980). *The Planetarium and Young Children's Assumptive Philosophies*. The Planetarian, 9(3), 10-11.
- Noble, M. K. (1964). *The Planetarium and Space Science in the Elementary Schools*. Science Education, 48, 28-31.
- Norton, R. O. (1968). *The Planetarium and Atmospherium: An Indoor Universe*. Healdsburg, CA : Naturegraph Publishers.
- Nussbaum, J. (1979). *Children's Conceptions of the Earth as a Cosmic Body: A Cross Age Study*. Science Education, 63(1), 83-93.
- Nussbaum, J. (1985). The Earth as a Cosmic Body. Dans Driver, R., E. Guesne & A. Tiberghien (éds), *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes, UK : Open University Press. 170-192.

- Nussbaum, J. & Novak, J. D. (1976). *An Assessment of Children's Concepts of the Earth Utilizing Structured Interviews*. *Science Education*, 60(4), 535-550.
- Nussbaum, J. & Novick, S. (1982). *Alternative Frameworks, Conceptual Conflict and Accommodation: Toward a Principled Teaching Strategy*. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- Nussbaum, J. & Sharoni-Dagan, N. (1983). *Changes in Second Grade Children's Preconceptions About the Earth as a Cosmic Body Resulting From a Short Series of Audio-tutorial Lessons*. *Science Education*, 67(1), 99-114.
- Ogan-Bekiroglu, F. (2007). *Effects of Model-based Teaching on Pre-service Physics Teachers' Conceptions of the Moon, Moon Phases, and Other Lunar Phenomena*. *International Journal of Science Education*, 29(5), 555-593.
- Ohlsson, S., Moher, T. & Johnson, A. (2000). Deep Learning in Virtual Reality: How to Teach Children that the Earth is Round. Dans *Proceedings of the 22nd Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Philadelphia (Pennsylvanie). 364-368.
- Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) (1982). *Déclaration de Mexico sur les politiques culturelles*. Conférence mondiale sur les politiques culturelles, Mexico City, 26 juillet - 6 août 1982. Accessible en ligne : http://portal.unesco.org/culture/fr/files/12762/11295422481mexico_fr.pdf/mexico_fr.pdf (consulté le 23 mars 2010).
- Ortell, E. D. (1977a). *The Value of the Planetarium as an Instructional Device*. Thèse de Doctorat (inédate), Nova Southeastern University (Fort Lauderdale, Floride).
- Ortell, E. D. (1977b). *The Value of the Planetarium as an Instructional Device*. *The Planetarium*, 6(3), 17-20.
- Osborne, J., Simon, S. & Collins, S. (2003). *Attitudes Toward Science: A Review of the Literature and its Implications*. *International Journal of Science Education*, 14(2), 191-200.

-
- Osberg, K. M. (1993). *Virtual Reality and Education: A Look at Both Sides of the Sword*. HITL, Technical Report R-93-7. Accessible en ligne : <http://www.hitl.washington.edu/publications/r-93-7/> (consulté le 27 mars 2007).
- Osberg, K. M. (1997). *Spatial Cognition in the Virtual Environment*. HITL, Technical Report R-97-18. Accessible en ligne : <http://www.hitl.washington.edu/publications/r-97-18/> (consulté le 27 mars 2007).
- Osborne, R. J. & Gilbert, J. K. (1980). *A Technique for Exploring Students' Views of the World*. *Physics Education*, 15(6), 376-379
- Osterman Meyer, A., Mon, M. J. & Hibbard, S. T. (2011). *The Lunar Phases Project: A Mental Model-Based Observational Project for Undergraduate Nonscience Majors*. *Astronomy Education Review*, 10(1). Accessible en ligne : <http://dx.doi.org/10.3847/AER2011015>
- Palmer, J. C. (2007). *The Efficacy of Planetarium Experiences to Teach Specific Science Concepts*. Thèse de doctorat (inédiée), Texas A&M University-Commerce, (Commerce, Texas).
- Pantelidis, V. S. (s.d.). *Virtual Reality and Education: Information Sources; A Bibliography*. Accessible en ligne : <http://vr.coe.edu/vpbib.html> (consulté le 20 octobre 2006).
- Paquin, M. (1998). *La visite scolaire au musée*. Québec : Presses Inter-Universitaires.
- Parker, J. & Heywood, D. (1998). *The Earth and Beyond: Developing Primary Teachers' Understanding of Basic Astronomical Events*. *International Journal of Science Education*, 20(5), 503-520.
- Perkins, D. N. (1991). *Technology Meets Constructivism: Do They Make a Marriage?* *Educational Technology*, 31(5), 18-23.
- Petersen, M. C. (2011). *The LNP Planetarium Compendium (Web Browser Edition)*. Nederland, Colorado: Loch Ness Production. Accessible en ligne : <http://www.lochnessproductions.com/lpc/lpc.html>
- Petroski, H. (1992). *The Pencil*. New York, NY : Knopf.

- Philips, W. C. (1991). *Earth Science Misconceptions*. The Science Teacher, février, 21-23.
- Piaget, J. (1929). *The Child's Conception of the World*. London : Routledge & Kegan Paul.
- Piaget, J. (1970). *L'épistémologie génétique*. Paris : PUF.
- Pitluga, G. E. (1972). *Planetarium Visits: An Evaluation by Teachers*. Science Activities, 6(janvier), 15-18.
- Pitluga, L. (1968). *An Experimental Comparison of Planetarium Teaching Programs*. Mémoire de Maîtrise (inédit), State University College at Oswego (Oswego, New York).
- Plummer, J. D. (2009). *Early Elementary Students' Development of Astronomy Concepts in the Planetarium*. Journal of Research in Science Teaching, 46(2), 192-209.
- Plummer, J. D., Kocareli, A. & Slagle, C. (2011). *Instructional Support for Children Developing an Ability to Move Between Frames of Reference in Astronomy: Towards a Learning Progression in Celestial Motion*. Conférence prononcée pendant la rencontre annuelle de la *Jean Piaget Society*, 2 au 4 juin 2011 (Berkeley, CA).
- Plummer, J. D., Wasko, K. D. & Slagle, C. (2011). *Children Learning to Explain Daily Celestial Motion: Understanding Astronomy Across Moving Frames of Reference*. International Journal of Science Education, 33(14), 1963-1992.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. & Gertzog, W. A. (1982). *Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change*. Science Education, 66, 211-227.
- Potvin, P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*. Thèse de Doctorat (inédite), Université de Montréal.
- Poupart, J., Deslauriers, J.-P., Groulx, L.-H., Laperrière, A., Mayer, R. & Pires, A. P. (1997). *La recherche qualitative : enjeux épistémologiques et méthodologiques*. Boucherville : Gaëtan Morin Éditeur.
- Powers, S. W. (1973). *The Planetarium in College and University Education*. The Planetarian, 2(2), 46-53.

-
- Prothero, J. D. & Hoffman, H. G. (1995). *Widening the Field-of-View Increases the Sense of Presence in Immersive Virtual Environments*. HITL, Technical Report R-95-2.
- Psootka, J. (1995). *Immersive Training Systems: Virtual Reality and Education and Training*. *Instructional Science*, 23(5-6), 405-431.
- Reed, G. F. (1970). *A Comparison of the Effectiveness of the Planetarium and the Classroom Chalkboard and Celestial Globe in the Teaching of Specific Astronomical Concepts*. Thèse de doctorat (inédite), University of Pennsylvania (Philadelphie, Pennsylvanie).
- Reed, G. F. (1973). *The Planetarium versus the Classroom: An Inquiry Into Earlier Implications*. *School Science and Mathematics*, 73(7), 553-555.
- Reed, G. F. (1974). *Planetarium Literature Review*. *The Planetarian*, 3(3-4), 129-130.
- Reed, G. F. (1975). *The Affective Value of a Planetarium in the Scheduling of a College Astronomy Course*. *School Science and Mathematics*, 75(8), 716-722.
- Reed, G. F. (1976). *Can First Graders be Taught Day and Night in the Planetarium?* *School Science and Mathematics*, 76(7), 545-550.
- Reed, G. F. & Campbell, J. R. (1972). *A Comparison of the Effectiveness of the Planetarium and the Classroom Chalkboard and Celestial Globe in the Teaching of Specific Astronomical Concepts*. *School Science and Mathematics*, 72(5), 368-374.
- Regian, J. W., Shebilske, W. L. & Monk, J. M. (1992). *Virtual Reality: An Instructional Medium for Visual-Spatial Tasks*. *Journal of Communication*, 42(4), 136-149.
- Reynolds, M. D. (1990). *Two-Dimensional Versus Three-Dimensional Conceptualization in Astronomy Education*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Florida (Gainesville, Floride).
- Rheingold, H. (1991). *Virtual Reality*. London : Simon and Schuster.
- Richards, T. (2012). *Using Kinesthetic Activities to Teach Ptolemaic and Copernican Retrograde Motion*. *Science & Education*, 21(6), 899-910.

- Ridky, R. W. (1973). *A Study of Planetarium Effectiveness on Student Achievement, Perceptions and Retention*. Thèse de Doctorat (inérite), Syracuse University (Syracuse, New York).
- Ridky, R. W. (1975). *The Mystique Effect of the Planetarium*. *School Science and Mathematics*, 75(6), 505-508.
- Rieber, L. P. (2004). Microworlds. Dans D. H. Jonassen (éd.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology (2nd edition)*. Mahwah, NJ : Laurence Erlbaum Associates. 583-603.
- Riordan, R. (1991). *Planetarium Education: A Review of the Literature*. *The Planetarian*, 20(3), 18-26.
- Roald, I. & Mikalsen, O. (2000). *What are the Earth and the Heavenly Bodies Like? A Study of Objectual Conceptions Among Norwegian Deaf and Hearing Pupils*. *International Journal of Science Education*, 22(4), 337-355.
- Roald, I. & Mikalsen, O. (2001). *Configuration and Dynamics of the Earth-Sun-Moon System: An Investigation into Conceptions of Deaf and Hearing Pupils*. *International Journal of Science Education*, 23(4), 423-440.
- Robinson, V. M. J. (1998). *Methodology and the Research-Practice Gap*. *Educational Researcher*, 27(1), 17-26.
- Rosemergy, J. C. (1968). *The Effectiveness of a Planetarium in Teaching Selected Astronomical Phenomena to Sixth-Grade Children*. Thèse de Doctorat (inérite), University of Michigan (Ann Arbor, Michigan).
- Rosenberg, R. R. (1967). *Teaching of Astronomy in the Planetarium*. Mémoire de Maîtrise (inérite), University of Michigan (Ann Arbor, Michigan).
- Roussou, M. (2006). *Interactivity and Learning: Examining Primary School Children's Activity Within Virtual Environments*. Thèse de doctorat (inérite), University of London (Londres).
- Ruiz, L. & Acker, A. (2006). *Les systèmes de projection des planétariums : de l'optomécanique au numérique*. *La lettre de l'OCIM*, 108(novembre-décembre), 14-19.

-
- Rushby, N. J. (1979). *An Introduction to Educational Computing*. London, UK : Croom Helm.
- Rusk, J. (2003). *Do Science Demonstration in the Planetarium Enhance Learning?* *Planetarian*, 32(1), 5-8.
- Sadler, P. M. (1987). Misconceptions in Astronomy. Dans J. Novak (éd.), *Proceedings of the Second International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Vol. III*. Ithaca, NY : Cornell University.
- Sadler, P. M. (1992). *The Initial Knowledge State of High School Astronomy Students*. Thèse de doctorat (inérite), Université Harvard, Graduate School of Education, (Boston, Massachusetts).
- Sadler, P. M. (1996). Astronomy's Conceptual Hierarchy. Dans J. Percy (éd.), *Astronomy Education: Current Developments, Future Coordination*. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 89. 46-60.
- Sadler, P. M. (1998). *Psychometric Models of Student Conceptions in Science: Reconciling Qualitative Studies and Distractor-Driven Assessment Instruments*. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(3), 265-296.
- Sadler, P. M. (s.d.). *The Starlab Story*. Accessible en ligne : <http://www.starlab.com/slhist.html> (consulté le 26 juillet 2004).
- Salis, C. & Pantelidis, V. S. (1997). *Designing Virtual Environments for Instruction: Concepts and Considerations*. *VR in the Schools*, 2(4). Accessible en ligne : <http://vr.coe.edu/vrits/2-4salas.htm> (consulté le 24 octobre 2006).
- Salzman, M. C., Dede, C. J., Loftin, B. R. & Chen, J. A. (1999). *A Model for Understanding How Virtual Reality Aids Complex Conceptual Learning*. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(3), 293-316.
- Samarapungavan, A., Vosniadou, S. & Brewer, W. F. (1996). *Mental Models of the Earth, Sun, and Moon: Indian Children's Cosmologies*. *Cognitive Development*, 11, 491-521.

- Sampson, G. E., Fairall, A. P., Moore, G. K. G., Ramponi, L. & Whitt, A. (2002). The Planetarium as a Site for Informal Science Education. Dans *Proceedings of the 16th IPS Conference*, Wichita (Kansas).
- Sánchez, J., Lumbreras, M. & Silva, J. (1997). Virtual Reality and Learning: Trends and Issues. Dans *Proceedings of The Fourteenth International Conference on Technology and Education*, ICTE 97, Oslo (Norvège).
- Savery, J. R. & Duffy, T. M. (2001). *Problem Based Learning: An Instructional Model and It's Constructivist Framework*. Indiana University, Center for Research on Learning and Technology, Technical Report No. 16-01. Accessible en ligne : http://crlt.indiana.edu/publications/journals/TR16_01.pdf (consulté le 23 octobre 2006).
- Schafer, S. (1977). *An Experiment in Participatory Planetarium Programming*. *The Planetarian*, 6(2), 19-21.
- Schafer, S. (1984). *More About Astronomy Teaching in Schools*. *The Planetarian*, 13(2), 18-21.
- Schatz, D. (1978). *Student Reasoning Ability and Astronomy Teaching*. International Astronomical Union Commission 46 (Teaching of Astronomy) Newsletter, juin, 4-8.
- Schatz, D. & Lawson, A. E. (1976). *Effective Astronomy Teaching: Intellectual Development and Its Implication*. *Mercury*, 5, 6-13.
- Schoon, K. J. (1992). *Students' Alternative Conceptions of Earth and Space*. *Journal of Geological Education*, 40, 209-214.
- Schroeder, B. C. (2004). *Planetarium Education: Review of Research*. Affiche présentée dans le cadre de la 17^e conférence de l'*International Planetarium Society* (Valence, Espagne).
- Schunk, D. H. (2004). *Learning Theories: An Educational Perspective*. Upper Saddle River, NJ : Pearson.

-
- Sharp, J. G. (1995). *Children's Astronomy: Implications for Curriculum Developments at Key Stage 1 and the Future of Infant Science in England and Wales*. *International Journal of Early Years Education*, 3(3) 17-49.
- Sharp, J. G. (1996). *Children's Astronomical Beliefs: a Preliminary Study of Year 6 Children in South-west England*. *International Journal of Science Education*, 18(6), 685-712.
- Sharp, J. G., Bowker, R., Mooney, C. M., Grace, M. & Jeans, R. (1999). *Teaching and Learning Astronomy in Primary Schools*. *School Science Review*, 80(292), 75-86
- Shavelson, R. J., Phillips, D. C., Towne, L. & Feuer, M. J. (2003). *On the Science of Education Design Studies*. *Educational Researcher*, 32(1), 25-28.
- Shen, J. & Confrey, J. (2007). *From Conceptual Change to Transformative Modeling: A Case Study of an Elementary Teacher in Learning Astronomy*. *Science Education*, 91(6), 948-966.
- Skamp, K. (1994). *Determining misconceptions about astronomy*. *Australian Science Teachers Journal*, 40(3), 63-70
- Slater, M. (2003). *A Note on Presence Terminology*. *Presence Connect*, 3(1). Accessible en ligne : <http://presence.cs.ucl.ac.uk/presenceconnect/> (consulté le 12 mars 2007).
- Slater, M., Steed, A., McCarthy, J. & Maringelli, F. (1998) *The Influence of Body Movement on Subjective Presence in Virtual Environment*. *Human Factors*, 40(3), 469-477. Accessible en ligne : <http://www.cs.ucl.ac.uk/teaching/VE/Papers/bodyrev1.pdf> (consulté le 26 mars 2007).
- Slater, T. F. (1993). *The Effectiveness of a Constructivist Epistemological Approach to the Astronomy Education of Elementary and Middle Level In-Service Teachers*. Thèse de doctorat (inédiée), University of South Carolina (Columbia, SC).
- Smith, B. A. (1966). *An Experimental Comparison of Two Techniques (Planetarium Lecture-Demonstration and Classroom Lecture-Demonstration) of Teaching*

- Selected Astronomical Concepts to Sixth-Grade Students*. Thèse de Doctorat (inéдите), Arizona State University (Tempe, Arizona).
- Smith, J., diSessa, A. A. & Roschelle, J. (1993). *Misconceptions Reconceived: A Constructivist Analysis of Knowledge in Transition*. *The Journal of the Learning Sciences*, 3(2), 115-163.
- Smith, T. V. (1974a). *A Study of the Effectiveness of the Planetarium and the Classroom in the Teaching of Constellations*. Thèse de Doctorat (inéдите), Nova Southeastern University (Fort Lauderdale, Floride).
- Smith, T. V. (1974b). *The Planetarium in Education: A Review of the Literature*. Nova University, ERIC Document Reproduction Service no ED111658.
- Smith, T. V. (1974c). *The Effectiveness of Constellation Figures*. *The Planetarian*, 3(3-4), 74-83.
- Smith, T. V. (1976). *Using a Pencil and Paper Instrument to Evaluate Elements of Observational Astronomy*. *The Planetarian*, 5(3), 8-17.
- Smith, T. V. (1977). *The Construction of a Variable Spatial Orientation Ability Instrument*. *The Planetarian*, 6(1), 3-12.
- Smith, T. V. (1978). *Teaching Constellations in the Planetarium Versus the Classroom*. Conférence prononcée lors du congrès de l'International Planetarium Society, Washington (DC), août 1978.
- Sneider, C. I. & Ohadi, M. M. (1998). *Unraveling Students' Misconceptions About the Earth's Shape and Gravity*. *Science Education*, 82(2), 265-284.
- Sneider, C. I. & Pulos, S. (1983). *Children's Cosmographies: Understanding the Earth's Shape and Gravity*. *Science Education*, 67(2), 205-221.
- Société pour la promotion de la science et de la technologie (SPST) (1995). *Place aux sciences !* Mémoire présenté à la Commission des États généraux sur l'éducation, Montréal, août 1995.
- Sonntag, M. S. (1979). *A Rationale for the Implementation of a Maximum Impact School Planetarium Facility*. *The Planetarian*, 8(2), 3-10.

-
- Sonntag, M. S. (1981). *An Experimental Study of Teaching Method, Spatial Orientation Ability, and Achievement in Selected Topics of Positional Astronomy*. Thèse de Doctorat (inéédite), University of Colorado at Boulder (Boulder, Colorado).
- Sonntag, M. S. (1982). *The Planetarium/Spatial Ability Connection*. *The Planetarian*, 11(1), 9-13.
- Sonntag, M. S. (1987). *Research in Science Education 1984*. *The Planetarian*, 16(2), 66.
- Sonntag, M. S. (1988a). *Spatial Ability and Planetarium Education*. *The Planetarian*, 17(1), 34-35.
- Sonntag, M. S. (1988b). *Spatial Ability, Science and Sex*. *The Planetarian*, 17(4), 37-41.
- Sonntag, M. S. (1989). *The Effect of a Combination of Planetarium and Laboratory Instruction in the Improvement of Student Spatial Ability*. *The Planetarian*, 18(3), 47-49.
- Soroka, J. J. (1967). *The School Planetarium as an Educational Device*. Mémoire de Maîtrise (inéédit), University of Akron (Akron, Ohio).
- Soroka, J. J. (1974). *Considerations for Planetarium Educators*. *The Planetarian*, 3(3-4), 112-123.
- Stahly, L. L., Krockover, G. H. & Shepardson, D. P. (1999). *Third Grade Students' Ideas about the Lunar Phases*. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(2), 159-177.
- Strike, K. A. & Posner, G. J. (1982). A Revisionist Theory of Conceptual Change. Dans R.A. Duschl & R.J. Hamilton (éds), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology and Educational Theory and Practice*. Albany, NY: State University of New York Press. 147-176.
- Summers, C. (2001). Quantification of Student Learning in the Museum, Planetarium and IMAX Theatre. Dans *Proceedings of the 15th International Planetarium Society Conference*, Montréal (Québec). 42-46.
- Sun, K.-T., Lin, C.-L. & Wang, S.-M. (2010). *A 3-D Virtual Reality Model of the Sun and the Moon for E-Learning at Elementary Schools*. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8, 689-710.

- Sunal, D. W. (1973). *The Planetarium in Education: An Experimental Study of the Attainment of Perceived Goals*. Thèse de Doctorat (inéédite), University of Michigan (Ann Arbor, Michigan).
- Sunal, D. W. (1976). *Analysis of Research on the Educational Uses of a Planetarium*. *Journal of Research in Science Teaching*, 13(4), 345-349.
- Sunal, D. W. & Sunal, C. S. (1977). *The Planetarium in the American School Experience*. *School Science and Mathematics*, 77(3), 203-213.
- Suzuki, M. (2003). *Conversations About the Moon with Prospective Teachers in Japan*. *Science Education*, 87(6), 892-910.
- Taasoobshirazi, G., Zuiker, S. J., Anderson, K. T. & Hickey, D. T. (2006). *Enhancing Inquiry, Understanding, and Achievement in an Astronomy Multimedia Learning Environment*. *Journal of Science Education and Technology*, 15(5), 383-395.
- Tan, D. S., Gergle, D., Scupelli, P. G. & Pausch, R. (2003). With Similar Visual Angles, Larger Displays Improve Spatial Performance. Dans *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, Fort Lauderdale (Floride), 5 au 10 avril 2003. 217-224.
- Tan, D. S., Gergle, D., Scupelli, P. G. & Pausch, R. (2004). Physically Large Displays Improve Path Integration in 3D Virtual Navigation Tasks. Dans *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vienne (Autriche), 24 au 29 avril 2004. 439-446.
- Targan, D. M. (1987). A Study of Conceptual Change in the Content Domain of the Lunar Phases. Dans J. Novak (éd.), *Proceedings of the Second International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Vol. II*. Ithaca, NY : Cornell University.
- Targan, D. M. (1988). *The Assimilation and Accommodation of Concepts in Astronomy*. Thèse de Doctorat (inéédite), University of Minnesota (Minneapolis-St. Paul, Minnesota).
- Taylor, I., Barker, M. & Jones, A. (2003) *Promoting Mental Model Building in Astronomy Education*. *International Journal of Science Education*, 25(10), 1205-1225.

-
- Taylor, R. S. & Grundstrom, E. D. (2011). *Programmatic Representational Constraints of Spatial Scale in Earth-Moon System Astronomy Instruction*. *Astronomy Education Review*, 10(1). Accessible en ligne : <http://dx.doi.org/10.3847/AER2009075> (consulté le 1 juillet 2012).
- Thagard, P. (2008). Conceptual Change in the History of Science: Life, Mind, and Disease. Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 374-387.
- Thouin, M. (1996). *Introduction aux sciences de la nature*. Sainte-Foy : MultiMondes.
- Thouin, M. (1997). *La didactique des sciences de la nature au primaire*. Sainte-Foy : MultiMondes.
- Thouin, M. (2001). *Tester et enrichir sa culture scientifique et technique*. Québec : MultiMondes.
- Thouin, M. (2004). *Enseigner les sciences et la technologie au préscolaire et au primaire*. Québec : MultiMondes.
- Tomlinson, G. (1997). *Grade Appropriate Concepts*. *Planetarian*, 26(1), 7-10.
- Tousignant, D. (1994). *Proposition d'adaptation d'un modèle muséal pour l'utilisation du planétarium à des fins pédagogiques*. Mémoire de Maîtrise (inédit), Université du Québec à Montréal (Montréal, Québec).
- Treagust, D. F. (1988). *Development and Use of Diagnostic Tests to Evaluate Students Misconceptions in Science*. *International Journal of Science Education*, 10(2), 159-169.
- Treagust, D. F. & Smith, C. L. (1989). *Secondary Students' Understanding of Gravity and the Motion of Planets*. *School Science and Mathematics*, 89(5), 380-391.
- Trumper, R. (2001). *A Cross-Age Study of Junior High School Students' Conceptions of Basic Astronomy Concepts*. *International Journal of Science Education*, 23(11), 1111-1123.

- Trumper, R. (2006). *Teaching Future Teachers Basic Astronomy Concepts—Seasonal Changes—at a Time of Reform in Science Education*. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(9), 879-906.
- Trundle, K. C., Atwood, R. K. & Christopher, J. E. (2002). *Preservice Elementary Teachers' Conceptions of Moon Phases Before and After Instruction*. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(7), 633-658.
- Trundle, K. C., Atwood, R. K. & Christopher, J. E. (2006). *Preservice Elementary Teachers' Knowledge of Observable Moon Phases and Pattern of Change in Phases*. *Journal of Science Teacher Education*, 17(2), 87-101.
- Trundle, K. C., Atwood, R. K. & Christopher, J. E. (2007a). *Fourth-grade Elementary Students' Conceptions of Standards-based Lunar Concepts*. *International Journal of Science Education*, 29(5), 595-616.
- Trundle, K. C., Atwood, R. K. & Christopher, J. E. (2007b). *A Longitudinal Study of Conceptual Change: Preservice Elementary Teachers' Conceptions of Moon Phases*. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(2), 303-326.
- Trundle, K. C. & Bell, R. L. (2010). *The Use of a Computer Simulation to Promote Conceptual Change: A Quasi-experimental Study*. *Computers & Education*, 54(4), 1078-1088.
- Trundle, K. C. & Hobson, S. (2011). *To the Moon and Back. Using Technology to Teach Young Children Space Science Concepts*. *Science and Children*, 49(4), 51-55.
- Trundle, K. C., Troland, T. H. & Pritchard, T. G. (2008). *Representations of the Moon in Children's Literature: An Analysis of Written and Visual Text*. *Journal of Elementary Science Education*, 20(1), 17-28.
- Tsai, C.-C. & Chang, C.-Y. (2005). *Lasting Effects of Instruction Guided by the Conflict Map: Experimental Study of Learning About the Causes of the Seasons*. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(10), 1089-1111.
- Tuttle, D. E. (1966). *Effects of the Use of the Planetarium Upon the Development of Spatial Concepts Among Selected Sixth Grade Students in Elgin*. Thèse de Doctorat (inédite), Northern Illinois University (DeKalb, Illinois).

-
- Tuttle, D. E. (1968). *Elgin's Research in Planetarium Curriculum*. GLPA Projector, 1, 14-15.
- Twiest, M. G. (1989). *The Attitudinal and Cognitive Effect of Planetarium Integration in Teaching Selected Astronomical Concepts to Fourth-, Fifth-, and Sixth-Grade Students*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Georgia (Athens, Georgia).
- Urke, T. (1993). *Research on the Effects of Teaching Astronomy with a Planetarium*. The Planetarian, 22(4), 19-20.
- Van der Maren, J.-M. (1996). *Méthodes de recherche pour l'éducation (2^e édition)*. Montréal : Presses de l'Université de Montréal.
- Van Doren, A. (2008). *Kinesthetic Astronomy*. Accessible en ligne : http://www.rockandsky.com/uploads/2/8/2/6/2826058/kinesthetic_astronomy.pdf (consulté le 20 janvier 2011)
- Vasu, E. S. & Howe, A. C. (1989). *The Effect of Visual and Verbal Modes of Presentation on Children's Retention of Images and Words*. Journal of Research in Science Teaching, 26(5), 401-407.
- Vermersch, P. (2003). *L'entretien d'explicitation (4^e édition)*. Issy-les-Moulineaux : ESF Éditeur (coll. Pédagogies).
- Vermersch, P. & Maurel, M. (1997). *Pratiques de l'entretien d'explicitation*. Paris : ESF Éditeur (coll. Pédagogies).
- Viiri, J. (1999). Tides in Textbooks, Expert Teacher's Ideas and Students Understanding. Dans M. Komorek (éd.), *Research in Science Education Past, Present and Future*, compte-rendu de la seconde conférence internationale ESERA, Kiel. Accessible en ligne : <http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/esera/book/posterf.htm> (consulté le 12 février 2007).
- Viiri, J. (2000). Students' Understanding of Tides. *Physics Education*, 35(2), 105-110.
- Viiri, J. & Saari, H. (2004). Research-Based Teaching Unit on the Tides. *International Journal of Science Education*, 26(4), 463-481.

- Von Glasersfeld, E. (1984). Introduction to Radical Constructivism. Dans P. Watzlawick (éd.), *The Invented Reality*. New York, NY: Norton. 17-40.
- Vosniadou, S. (1991). *Designing Curricula for Conceptual Restructuring: Lessons from the Study of Knowledge Acquisition in Astronomy*. *Journal of Curriculum Studies*, 23(3), 219-237.
- Vosniadou, S. (1992). *Knowledge Acquisition and Conceptual Change*. *Applied Psychology: An International Review*, 41(4), 347-357.
- Vosniadou, S. (1994). *Capturing and modeling the process of conceptual change*. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Vosniadou, S. (2008). Conceptual Change Research: An Introduction. Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY : Routledge. xiii- xxviii.
- 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., Skopeliti, I. & Ikospentaki, K. (2005). *Reconsidering the Role of Artifacts in Reasoning: Children's Understanding of the Globe as a Model of the Earth*. *Learning and Instruction*, 15(4), 333-351.
- Vosniadou, S., Vamvakoussi, X. & Skopeliti, I. (2008). The Framework Theory Approach to the Problem of Conceptual Change. Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 3-34.
- Vygotsky, L. S. (1985, édition originale 1934). *Pensée et langage*. Paris : Éditions sociales.
- Wall, C. A. (1973). *A Review of Research Related to Astronomy Education*. *School Science and Mathematics*, 73(8), 653-669.
- Warneking, G. E. (1970). *Planetarium Education in the 1970's — A Time for Assessment*. *Science Teacher*, 27(7), 14-15.
- Whitehorne, M. L. (2003). *Skyways: Astronomy Handbook for Teachers*. Toronto : The Royal Astronomical Society of Canada.
- Wilhelm, J. (2009). *Gender Differences in Lunar-related Scientific and Mathematical Understandings*. *International Journal of Science Education*, 31(15), 2105–2122.

-
- Wilson, B. & Cole, P. (1991). *A Review of Cognitive Teaching Models*. Educational Technology Research and Development, 39(4), 47-64.
- Wilson, B. G. (1996). What is a Constructivist Learning Environment? Dans B. G. Wilson (éd.) *Constructivist Learning Environments: Case Studies in Instructional Design*. Englewood Cliffs, NJ : Educational Technology Publication. 3-8.
- Winer, L. R. & Vázquez-Abad, J. (1981). *Towards a Theoretical Framework for Educational Simulations*. Simulation/Games for Learning, 11(3), 114-119.
- Winn, W. D. (s.d.). *Learning Through Virtual Reality*. Accessible en ligne : <http://www.newhorizons.org/strategies/technology/winn.htm> (consulté le 23 octobre 2006).
- Winn, W. D. (1993). *A Conceptual Basis for Educational Applications of Virtual Reality*. Human Interface Technology Laboratory (HITL), Washington Technology Center, University of Washington, Technical Report TR-93-9. Accessible en ligne : <http://www.hitl.washington.edu/publications/r-93-9/> (consulté le 22 novembre 2006).
- Winn, W. D. (1997). *The Impact of Three-Dimensional Immersive Virtual Environments on Modern Pedagogy*. HITL, Technical report R-97-15. Accessible en ligne : <http://www.hitl.washington.edu/publications/r-97-15/> (consulté le 28 mars 2007).
- Winn, W. D. (2002). *Current Trends in Educational Technology Research: The Study of Learning Environments*. Educational Psychology Review, 14(3), 331-351.
- Wiser, M. & Smith, C. L. (2008). Learning and Teaching About Matter in Grades K-8: When Should the Atomic-Molecular Theory Be Introduced? Dans S. Vosniadou (éd.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 205-239.
- Wooten, J. W. (1979). *The Role of the Musical Soundtrack in Planetarium Presentations for Fifth- and Sixth-Grade Students*. Thèse de Doctorat (inédite), University of Florida (Gainesville, Floride).

- Wright, D. L. (1968). *Effectiveness of the Planetarium and Different Methods of Its Utilization in Teaching Astronomy*. Thèse de Doctorat (inéédite), University of Nebraska-Lincoln (Lincoln, Nebraska).
- Yair, Y., Schur, Y. & Mintz, R. (2003). *A "Thinking Journey" to the Planets Using Scientific Visualization Technologies: Implications to Astronomy Education*. *Journal of Science Education and Technology*, 12(1), 43-49.
- Yee, A. H., Baer, J. M. & Holt, K. D. (1971). *An Evaluation of the Effectiveness of School Planetarium Experiences*. Educational Technology Research no 41. Englewood Cliffs, NJ : Educational Technology Publication.
- Young, J. H. (1979). *The Relationship Between Cognitive Style and the Learning of Astronomy Concepts in Elementary Education*. Mémoire de Maîtrise (inéédit), University of Houston (Houston, Texas).
- Youngblut, C. (1998). *Educational Uses of Virtual Reality Technology*. Institute for Defense Analyses, Document no D-2128.
- Yu, K. C. (2005). *Digital Full-Domes: The Future of Virtual Astronomy Education*. *Planetarian*, 34(3), 6-11.
- Yu, K. C. & Sahami, K. (2007). *Visuospatial Astronomy Education in Immersive Digital Planetariums*. *Communicating Astronomy with the Public*, 242-245.
- Za'rour, G. I. (1976). *Interpretation of Natural Phenomena by Lebanese School Children*. *Science Education*, 60(2), 277-287.
- Zimmermann, R. E. (1981). *An Elementary Curriculum for a Medium-Sized Regional Planetarium*. *The Planetarian*, 10(1), 34-36.

Annexe 1 : Principales conceptions d'élèves à propos du système Terre-Lune-Soleil et des phases de la Lune

Tableau I : Principales conceptions d'élèves à propos du système Terre-Lune-Soleil et des phases de la Lune

Conception	Groupe d'âge	Référence
La Terre, la Lune et le Soleil sont sur des orbites non concentriques	9-12 ans	Liu, 2005
La Terre est au centre et le Soleil et la Lune s'en approchent à tour de rôle (jour/nuit)	9-12 ans 9-12 ans 11-12 ans	Jones et al., 1987 Liu, 2005 Taylor et al., 2003
La Terre est au centre, elle tourne sur elle-même avec le Soleil et la Lune de part et d'autre	9-12 ans 9-12 ans	Jones et al., 1987 Liu, 2005
Vus de la Terre, le Soleil et la Lune sont sur ces orbites elliptiques horizontales ou verticales leur permettant de se lever et de se coucher à tour de rôle	9-12 ans	Liu, 2005
Le Soleil et/ou la Lune tournent autour de la Terre	7-17 ans 9-12 ans 9-12 ans 11-12 ans 12-14 ans Universitaire Universitaire	Roald & Mikalsen, 2001 Jones et al., 1987 Liu, 2005 Taylor et al., 2003 Danaia & McKinnon, 2008 Bell & Trundle, 2008 Trundle & Bell, 2010
La Terre et la Lune sont toutes deux sur la même orbite autour du Soleil	7-17 ans 9-12 ans 7 ^e -8 ^e années	Roald & Mikalsen, 2001 Jones et al., 1987 Taylor et al., 2003
La Terre et la Lune tournent autour du Soleil chacune sur sa propre orbite	9-12 ans 7 ^e -8 ^e années Universitaire	Liu, 2005 Taylor et al., 2003 Trundle & Bell, 2010
La Terre est en orbite autour de la Lune	Universitaire	Trundle & Bell, 2010
La Terre est en orbite autour du Soleil le jour et autour de la Lune la nuit	12-14 ans	Danaia & McKinnon, 2008
La Terre est en orbite autour du Soleil tandis que la Lune est fixe dans l'espace	9-12 ans	Liu, 2005
La Lune est en orbite autour du Soleil	7-14 ans 12-14 ans Universitaire Universitaire	Dunlop, 2000 Danaia & McKinnon, 2008 Bell & Trundle, 2008 Küçüközer, 2008
Le Soleil est en orbite autour de la Lune	12-14 ans	Danaia & McKinnon, 2008
La Lune tourne autour de la Terre en un jour/en un an	--	Schoon, 1992
La Lune ne tourne pas sur elle-même	Universitaire	LoPresto & Murrell, 2011
La Lune est plus éloignée de la Terre que le Soleil	4-5 ans Secondaire	Thouin, 1996 Trumper, 2001

Sous-évaluation de la distance Terre-Lune	-- 14-15 ans	Comins, 2004 Sadler, 1987
La Terre, la Lune et le Soleil ont la même taille	9-12 ans	Jones et al., 1987
La Lune a la même taille que la Terre	-- 5-7 ans 10-11 ans 9-12 ans 14-15 ans	Comins, 2004 Sharp, 1995 Sharp, 1996 Jones et al., 1987 Sadler, 1987
La Lune a la même taille que le Soleil	-- 5-7 ans 10-11 ans 9-12 ans 14-15 ans	Comins, 2004 Sharp, 1995 Sharp, 1996 Jones et al., 1987 Sadler, 1987
La Lune est plus grosse que les étoiles	4-5 ans	Thouin, 1996
Sous-évaluation ou surévaluation de la taille de la Lune	--	Comins, 2004
La Lune est en forme de croissant	7-17 ans	Roald & Mikalsen, 2000
La Lune est un disque plat (bidimensionnelle)	4-5 ans 7-17 ans 10-11 ans 9-12 ans	Thouin, 1997 Roald & Mikalsen, 2000 Sharp, 1996 Jones et al., 1987
La Lune a la forme d'un demi-disque	7-17 ans	Roald & Mikalsen, 2000
La Lune est tridimensionnelle, mais ce n'est pas une sphère (hémisphère, cylindre, etc.)	9-12 ans	Jones et al., 1987
La Lune est une sphère, mais contenant une partie creuse (concave)	7-17 ans 9-12 ans	Roald & Mikalsen, 2000 Liu, 2005
La Lune émet de la lumière, comme le Soleil, mais un peu moins	5-7 ans 6-8 ans 10-11 ans Universitaire -- --	Sharp, 1995 Thouin, 1996, 1997, 2004 Sharp, 1996 Ogan-Bekiroglu, 2007 Comins, 2004 Schoon, 1992
La Lune est une étoile semblable au Soleil	--	Comins, 2004
La Lune brille parce qu'elle est blanche et le ciel est noir	5-7 ans	Sharp, 1995
La Lune brille parce qu'elle est comme les étoiles, mais plus grosse	-- 6-8 ans	Schoon, 1992 Thouin, 1996, 1997, 2004
La Lune brille en réfléchissant la lumière des étoiles	5-7 ans	Sharp, 1995
La surface de la Lune est intrinsèquement brillante	--	Comins, 2004
La Lune ne peut être vue que durant la nuit, et non le jour	-- 5-7 ans Universitaire	Camino, 1998 Sharp, 1995 Martinez Pena et al., 2001
Il faut un jour à la Lune pour faire le tour de la Terre	-- -- 5-7 ans 10-11 ans 12-14 ans	Schoon, 1992 Comins, s.d. Sharp, 1995 Sharp, 1996 Danaia & McKinnon, 2008
Il faut un an à la Lune pour faire le tour de la Terre	--	Schoon, 1992

La Lune change de taille/volume au cours de ses phases	7-17 ans 9-12 ans --	Roald & Mikalsen, 2001 Liu, 2005 Thouin, 1996
Les phases de la Lune sont causées par des nuages ou par un astre qui passe devant la Lune	-- 5-7 ans 7-14 ans 7-17 ans 3 ^e année 9-12 ans 9-12 ans 10-11 ans 9 ^e année 11-13 ans 12-14 ans Universitaire Universitaire Universitaire Univeraitaire	Thouin, 1996 Sharp, 1995 Dunlop, 2000 Roald & Mikalsen, 2001 Stahly et al., 1999 Baxter, 1989 Liu, 2005 Sharp, 1996 Sadler, 1987 Küçüközer et al., 2009 Danaia & McKinnon, 2008 Parker & Heywood, 1998 Bell & Trundle, 2008 Trundle & Bell, 2010 Küçüközer, 2008
Les phases de la Lune sont causées par l'ombre de la Terre projetée sur notre satellite	-- -- -- 4-9 ans 7-14 ans 7-17 ans 9-12 ans 11-13 ans 12-14 ans 3 ^e année 4 ^e année 10-11 ans 5 ^e année 9 ^e année Secondaire 9-16 ans Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire	Schoon, 1992 Thouin, 1996 Comins, s.d. Philips, 1991 Dunlop, 2000 Roald & Mikalsen, 2001 Liu, 2005 Küçüközer et al., 2009 Danaia & McKinnon, 2008 Stahly et al., 1999 Trundle et al., 2007a Sharp, 1996 Barnett & Morran, 2002 Sadler, 1987 Trumper, 2001 Baxter, 1989 Targan, 1987 Skamp, 1994 Parker & Heywood, 1998 Martinez Pena et al., 2001 Bell & Trundle, 2008 Trundle & Bell, 2010 Mulholland & Ginns, 2008 Küçüközer, 2008 LoPresto & Murrell, 2011
Les phases de la Lune sont causées par de la « noirceur » qui recouvre notre satellite	9-12 ans	Liu, 2005

Les phases de la Lune sont causées par la rotation de la Terre sur elle-même	Universitaire	Trundle & Bell, 2010
La rotation de la Terre nous révèle une portion plus ou moins grande de la Lune	9-12 ans 10-11 ans Universitaire	Liu, 2005 Sharp, 1996 Bell & Trundle, 2008
Les phases de la Lune sont dues à la rotation [révolution] de la Terre autour du Soleil	-- 6 ^e année	Thouin, 1996 Sharp et al., 1999
Les phases sont dues à la révolution du Soleil en 24 h autour de la Terre et de la Lune	10-11 ans	Sharp, 1996
Au moment de la nouvelle Lune, la Lune n'est pas éclairée par le Soleil	--	Thouin, 1996
À la pleine Lune, toute la Lune est éclairée, et à la nouvelle Lune, toute la Lune est dans l'obscurité	Primaire	Thouin, 1996, 2001
Les phases de la Lune sont dues à l'ombre des planètes projetées sur les parties de la Lune que nous ne pouvons voir	3 ^e année 6 ^e année 9-16 ans 9 ^e année Universitaire Universitaire Universitaire Universitaire	Stahly et al., 1999 Sharp et al., 1999 Baxter, 1989 Sadler, 1987 Parker & Heywood, 1998 Bell & Trundle, 2008 Trundle & Bell, 2010 Küçüközer, 2008
Les phases de la Lune sont dues à l'ombre du Soleil tombant sur la Lune et nous en bloquant la vue, ou au Soleil qui nous bloque la vue de la Lune	3 ^e année 9-16 ans 9 ^e année Secondaire 9-12 ans 12-14 ans Universitaire Universitaire	Stahly et al., 1999 Baxter, 1989 Sadler, 1987 Trumper, 2001 Liu, 2005 Danaia & McKinnon, 2008 Mulholland & Ginns, 2008 Trundle & Bell, 2010
Les phases de la Lune dépendent de l'alignement de la Lune avec la position géographique de l'observateur (alignement = pleine Lune)	Universitaire	Trundle & Bell, 2010
Les phases de la Lune dépendent de la quantité de lumière solaire qui atteint la Lune	12-14 ans	Danaia & McKinnon, 2008
Les phases de la Lune dépendent de la distance Lune-Soleil (plus proche = pleine Lune, plus éloigné = nouvelle Lune)	11-13 ans Universitaire Universitaire	Küçüközer et al., 2009 Bell & Trundle, 2008 Trundle & Bell, 2010
Les phases de la Lune dépendent de la distance Terre-Lune (plus proche = pleine Lune, plus éloigné = nouvelle Lune)	Universitaire	Trundle & Bell, 2010
Les phases de la Lune sont dues à la face cachée de la Lune	6 ^e année	Sharp et al., 1999
En changeant de phase, la Lune gagne ou perd de la masse et du volume	4-9 ans	Za'rour, 1976
La phase de la Lune change en fonction du moment de la journée ou de la nuit	5-7 ans	Sharp, 1995
La pleine Lune se lève toujours à minuit	Universitaire	LoPresto & Murrell, 2011

Divers pays voient différentes phases de la Lune le même jour	4-9 ans 7-14 ans 12-14 ans Universitaire	Philips, 1991 Dunlop, 2000 Danaia & McKinnon, 2008 Ogan-Bekiroglu, 2007
La Lune est éclairée par de la lumière réfléchie par la Terre	9 ^e année 12-14 ans	Sadler, 1987 Danaia & McKinnon, 2008
La Lune est à moitié noire, à moitié blanche et elle tourne sur elle-même	9 ^e année	Sadler, 1987
Les phases provoquent la projection du Soleil autour de la Lune	Universitaire	Martinez Pena et al., 2001
La Lune est voilée par les rayons du Soleil	Universitaire	Martinez Pena et al., 2001
La phase de la Lune change en fonction de la rotation de la Terre/position de l'observateur	3 ^e année 7-17 ans	Stahly et al., 1999 Roald & Mikalsen, 2001
La rotation de la Terre nous fait voir différentes phases d'une Lune en permanence située entre la Terre et le Soleil	7-14 ans	Dunlop, 2000
Plusieurs phases de la Lune coexistent autour de la Terre et la rotation de notre planète nous les fait voir l'une après l'autre	11-13 ans Universitaire	Küçüközer et al., 2009 Martinez Pena et al., 2001
Les phases sont dues à la rotation de la Lune	-- Universitaire	Comins, s.d. Küçüközer, 2008
Quand la Lune est au premier quartier, on ne voit qu'un quart de la Lune	--	Comins, s.d.
Quand la Lune est au dernier quartier (<i>third quarter</i>), on voit 75% de la Lune	--	Comins, s.d.
La Lune est le seul objet céleste à montrer des phases	--	Comins, s.d.
Les phases n'ont rien à voir avec la position de la Lune et du Soleil	--	Comins, s.d.
Les différentes phases de la Lune sont en fait différentes Lunes	--	Comins, s.d.
Les pointes d'un croissant lunaire pointent dans la même direction peu importe que la Lune soit croissante ou décroissante	--	Comins, s.d.
La nouvelle Lune et la pleine Lune sont la même chose	--	Comins, s.d.
Les seules phases sont demi-Lune, pleine Lune et nouvelle Lune	--	Comins, s.d.
Il se produit une pleine Lune lorsque la Lune passe entre la Terre et le Soleil	--	Comins, s.d.
Le premier et le dernier quartier sont la même phase	--	Comins, s.d.
Il n'y a pas de phases de la Lune	--	Comins, s.d.
La Lune change de forme au cours de ses phases	--	Comins, s.d.
La nouvelle Lune se produit toujours au début du mois	--	Comins, s.d.

Annexe 2 : La recherche en éducation dans les planétariums : bibliographie commentée

Cette annexe présentera un compte-rendu détaillé et commenté des principaux travaux de recherche qui se sont intéressés à la question de l'éducation dans les planétariums depuis plus de soixante ans. Ce compte-rendu se veut un complément à la section 2.1 du chapitre consacré au cadre conceptuel de la présente thèse, où le lecteur trouvera un résumé des travaux les plus importants pour notre propre étude, de même que les principales conclusions que nous avons tirées de l'analyse des recherches qui seront présentées ci-dessous.

Le but de cette vaste et exhaustive recension des écrits sera d'abord d'identifier les meilleures pratiques permettant de favoriser les apprentissages de concepts astronomiques par les spectateurs visitant un planétarium. Au même moment, nous jetterons un regard critique sur la méthodologie employée par ces études et certaines conclusions auxquelles elles arrivent. Pour constituer le corpus qui sera présenté et commenté dans les pages suivantes, nous avons recensé plus d'une centaine de thèses et articles de revues (majoritairement étasuniens) qui s'intéressaient aux phénomènes éducatifs dans les planétariums. La majorité de ces études ont cherché soit à comparer le planétarium à d'autres lieux d'apprentissage (surtout la salle de classe), soit à étudier la complémentarité possible de ces deux lieux d'apprentissage, soit encore à évaluer diverses approches pédagogiques utilisées sous la voûte du planétarium. Contrairement au découpage utilisé dans la section 2.1 du chapitre portant sur le cadre conceptuel, nous présenterons ici les travaux de recherche selon lequel de ces aspects ils ont traité.

Quelles qu'aient été leurs orientations, les études portant sur l'aspect éducatif des planétariums se sont intéressées soit à l'impact cognitif d'une séance de planétarium, soit à l'impact affectif (intérêt, motivation), soit aux deux. On définit généralement dans ces études les objectifs cognitifs comme ceux qui insistent sur la mémorisation de faits, la compréhension de concepts ou la résolution de problèmes (des plus simples aux plus

complexes), tandis que l'aspect affectif s'intéresse plutôt aux sentiments et aux émotions suscitées par le visionnement du spectacle, au degré d'acceptation ou de rejet des thèmes abordés, à l'adhésion à des valeurs et principes proches de la science et de la méthode scientifique, ou encore au rôle motivationnel du spectacle (Johnston, 1981, p. 21-22).

Nous présenterons dans les sections suivantes notre recension des écrits en les regroupant selon quels aspects de la relation planétarium-école ou quels aspects de la pratique éducative dans les planétariums elles ont étudié. À l'intérieur de chaque section, les thèses et articles seront présentés par ordre chronologique de leur publication. Nous concluons à la fin de chaque section en identifiant les faits saillants qui auront été exposés.

1.0 Aspects méthodologiques de la recherche en éducation dans les planétariums

Avant d'entreprendre la recension des écrits sur la recherche en éducation dans les planétariums, disons quelques mots à propos des principales caractéristiques méthodologiques de ces études. Force est de constater que l'écrasante majorité de ces travaux ont privilégié une approche exclusivement quantitative. Notre recension ne révèle en effet que treize études sur un total de près de cent qui ont incorporé dans leur approche méthodologique des aspects qualitatifs (Chamberlain, 1962; Dean & Lauck, 1972; Sunal, 1973; Hayward, 1975; Reed, 1976; Bishop, 1977a; 1977b; Gutsch, 1978; Bishop, 1980a; Reynolds, 1990; Urke, 1993; Meyer, 2000; Palmer, 2007; Plummer, 2009). Sans pouvoir le démontrer formellement, nous croyons qu'il faut voir dans cette prépondérance quantitative le signe d'une position épistémologique nettement positiviste de la part des auteurs de ces études, dont la plupart viennent du domaine des sciences physiques et de l'astronomie (Marcel Thouin, communication personnelle).

La grande majorité des recherches que nous avons consultées ont toutes plus ou moins suivi la même « recette » quantitative, soit un prétest administré avant traitement,

suivi d'un post-test administré immédiatement après traitement puis, dans certains cas, à intervalle régulier pour mesurer la rétention des connaissances à moyen et à long terme. Les chercheurs ont parfois jugé bon de former un groupe comparatif (contrôle), mais il ne s'agit pas d'une pratique généralisée. La plupart des chercheurs ont choisi au hasard les sujets de l'étude ou, lorsque ce n'était pas possible (échantillons de convenance), ils ont du moins pris la peine de répartir les sujets ou les groupes (des classes intactes, la plupart du temps) de façon aléatoire à l'intérieur des groupes de traitement. La plupart des auteurs ont fait de grands efforts pour s'assurer que les groupes et les traitements étaient comparables et ils ont amassé de nombreuses données sociodémographiques sur les sujets afin de contrôler l'effet de certains facteurs (QI, niveau de réussite scolaire, profil socioéconomique, etc.) par le biais de divers tests statistiques. Les instruments de mesure ont presque toujours été des questionnaires sur papier, à choix multiples pour l'évaluation des connaissances et avec échelle de Likert pour l'évaluation des attitudes.

Les rares études qui comportaient un volet qualitatif ont clairement subordonné les données recueillies en entrevue, groupes de discussion ou par écrit (notes, textes, dessins) aux données quantitatives. Dans certains cas (par exemple, Bishop, 1977a; 1977b), le recueil de ces données qualitatives a été mentionné dans le rapport de recherche, mais les données n'ont pas été incluses dans l'analyse ni présentées au lecteur. Lorsqu'elles étaient présentes, les données qualitatives ont généralement servi à illustrer les résultats des tests, mais pas à remettre les résultats quantitatifs en question ni à s'interroger sur les processus intellectuels qui ont mené à leur production. L'apport qualitatif est donc demeuré bien mince, comme quoi cette approche méthodologique n'a pas encore été utilisée à son plein potentiel dans le domaine de la recherche en éducation dans les planétariums. La triangulation des données qualitatives et quantitatives (Denzin, 1994) n'est pas non plus une pratique courante dans le milieu des planétariums, comme nous avons pu le constater.

Récemment, Brazell & Espinoza (2009) ont publié les résultats d'une méta analyse portant sur les recherches en éducation menées dans des planétariums entre 1966 et 2007. Des 46 articles, thèses et mémoires répertoriés par les auteurs, seuls 18 ont été retenus pour

analyse¹⁷, soient les articles de Smith (1966), Tuttle (1966), L. Pitluga (1968), Rosemergy (1968), Wright (1968), Reed (1970), Yee, Baer & Holt (1971), Dean & Lauck (1972), Reed & Campbell (1972), Reed (1973), Sunal (1973), Ridky (1975), Hayward (1975), Sonntag (1981), Edoff (1982), Twiest (1989), Baxter & Preece (2000) et Palmer (2007). Les études retenues répondaient aux critères jugés essentiels par les spécialistes pour mener à bien leur méta-analyse : L'étude devait avoir été menée dans un milieu éducatif formel auprès d'élèves étudiant l'astronomie, utiliser un groupe contrôle et un montage expérimental ou quasi-expérimental, comparer l'enseignement en classe à une ou des séances dans un planétarium, et fournir suffisamment de données pour permettre une méta analyse statistique.

Brazell & Espinoza (2009) ont utilisé les techniques statistiques de la méta analyse pour calculer une taille d'effet pour chacune des comparaisons école-planétarium présentées dans les 18 études citées précédemment (dans le cas de cinq de ces études, l'utilisation de plusieurs groupes expérimentaux a mené au calcul de plusieurs tailles d'effet). C'est donc au total 24 tailles d'effet que les auteurs ont rapporté et à partir desquelles ils ont calculé une taille d'effet moyenne de 0,28 ($p < .05$) pour l'ensemble des études analysées, ce qui se traduit par un avantage positif plutôt faible pour l'apprentissage de notions astronomiques dans un planétarium par rapport à la salle de classe.

¹⁷ Dans leur article, Brazell & Espinoza mentionnent avoir retenu 19 études, mais le texte et la bibliographie n'en citent que 18. D'autres erreurs subsistent dans cet article : la thèse de L. Pitluga a été publiée en 1968, et non en 1971. En ce qui concerne Reed (1970) et Reed & Campbell (1972), il s'agit de la même étude publiée sous deux formes différentes, une thèse de doctorat en 1970 et un article dans une revue scientifique en 1972. Dans leur article, Brazell & Espinoza font référence à Reed (1970a) et Reed (1970b) : la première est la thèse de Reed publiée en 1970 et la seconde est en réalité un article publié en 1973. Ayant eu accès aux thèses et articles complets, nous utiliserons nos propres références plutôt que celles citées par Brazell & Espinoza, qui semblent n'avoir eu accès qu'à des résumés de ces mêmes sources.

Les auteurs soulignent dans leur analyse que l'enseignement de l'astronomie d'observation semble particulièrement plus efficace sous la voûte d'un planétarium que la présentation d'informations générales en astronomie. Les élèves de la maternelle à la 5^e année du secondaire semble profiter davantage d'une séance au Planétarium que les étudiants plus âgés (niveau *College*). Curieusement, les groupes qui n'ont effectué qu'une seule visite au planétarium ont mieux performé que les groupes qui s'y sont rendu plus d'une fois, bien que la différence soit marginale.

Brazell & Espinoza (2009) concluent de leur analyse que le planétarium est un outil éducatif efficace lorsqu'il s'adresse à de jeunes spectateurs du primaire et du secondaire et qu'il favorise la présentation d'activités interactives d'observation dans l'environnement contrôlé du théâtre des étoiles. Selon eux, le planétarium devrait être considéré comme un véritable « laboratoire du ciel » (Reed, 1973), comme il existe également des laboratoires de physique et de chimie, où les enfants sont actifs et exercent un certain contrôle sur leurs apprentissages. Les élèves qui visitent un planétarium devraient pouvoir y faire des observations, explorer, expérimenter, essayer, connaître des échecs, mettre « la main à la pâte », tout en confrontant leurs conceptions (Tomlinson, 1997). Brazell & Espinoza (2009) mentionnent également le vaste potentiel du planétarium pour aider les spectateurs à développer leurs aptitudes procédurales en science :

« The present meta-analysis showed that planetariums have a great potential to produce positive effects when utilized for interactive observational astronomy instruction. Through active participation in the observation of the simulated motions of celestial objects, students could gain important practice in the development of science process skills. » (Brazell & Espinoza, 2009, p. 8)

Cela étant dit, les auteurs relèvent également de nombreuses failles dans le corpus des recherches retenues sur les effets éducatifs du planétarium dont, entre autres, l'absence d'instrument de mesure systématique (test) similaire d'une étude à l'autre pour recueillir les connaissances des apprenants avant et après une visite au planétarium. La plupart des chercheurs ont en effet conçu eux-mêmes leur instrument de mesure et la comparaison de

ces divers tests montre l'incroyable variété des sujets et thèmes évalués, très différents d'une étude à l'autre.

Enfin, Brazell & Espinoza (2009) soulignent le nombre relativement restreint d'études retenues dans le cadre leur propre méta analyse (18 sur 46 textes répertoriés), ce qui souligne la faiblesse méthodologique de plusieurs études visant à mesurer l'effet de visites dans un planétarium sur l'apprentissage de notions astronomiques. Les auteurs sont d'avis que les facteurs qui influencent l'apprentissage dans un planétarium sont nombreux et demeurent mal documentés : un exemple frappant est la capacité de projection et d'orientation spatiale des spectateurs (Bishop, 1980a), dont relativement peu d'études ont tenu compte ou ont tenté de mesurer (voir plus loin section 1.2.6).

On retrouve des critiques similaires à celles qui viennent d'être formulées chez Smith (1974b), qui souligne les lacunes méthodologiques des thèses de Tuttle (1966), Smith (1966), Rosemergy (1967), Soroka (1967), Wright (1968) et Reed (1970), lacunes qui ont trait, pour l'essentiel, à la taille trop restreinte de certains échantillons qui minent la signification statistique des résultats; aux traitements statistiques inadéquats qui ne permettent pas de séparer et d'isoler certaines variables importantes (préparation préalable des sujets, connaissances antérieures, etc.); ou encore à la nature des traitements contrastés au sein de la même étude, tellement différents les uns des autres que l'on peut se demander s'ils sont encore comparables. Smith (1974b) se demande par exemple si la comparaison entre une présentation du ciel dans un planétarium et l'étude des mouvements de la voûte céleste en classe à l'aide d'un globe céleste (comme l'a étudié Reed (1970), entre autres) est vraiment valable. De telles différences rendent d'autant plus difficile la comparaison de ces études entre elles, la recherche de correspondances entre leurs conclusions ou leur extension à des situations différentes de celles étudiées.

En plus des objections que nous avons soulevées dans la présente section, d'autres commentaires et critiques ayant trait à la méthodologie ou à la façon dont ont été construites et conduites certaines recherches que nous citerons dans les pages qui suivent seront exposés au fur et à mesure de la présentation de ces travaux, afin de conserver le lien

logique entre l'analyse que nous en ferons et les réserves que nous émettrons. Le lecteur verra donc apparaître des mises en garde méthodologiques au fur et à mesure de sa lecture des sections qui suivent.

1.1 La recherche en éducation dans les planétariums : aspects non scolaires

Certains aspects non éducatifs des planétariums ont fait l'objet d'études savantes depuis une soixantaine d'années. Par soucis de complétude de notre recension des écrits, nous les rapportons ici de manière succincte, même si leur apport concernant l'éducation dans les planétariums reste marginal.

Moore (1965) s'est intéressé à l'utilisation des médias (cinéma, télévision, radio, etc.), aux attitudes et à la reconnaissance de termes astronomiques chez des adultes répartis en deux groupes selon qu'ils fréquentaient ou non un planétarium sur une base régulière. Au total, 107 adultes inscrits à des cours du soir ont répondu à une série de questions portant sur les thèmes mentionnés plus haut. Les résultats ont été interprétés selon que le répondant avait ou non déjà assisté à un spectacle de planétarium.

Le chercheur a découvert de grandes différences entre les groupes. Par exemple, les adultes qui ne fréquentaient pas le planétarium avaient tendance à lire plus et à regarder davantage la télévision que ceux qui y allaient plus régulièrement. Par contre, les non visiteurs allaient moins souvent au cinéma et écoutaient plus souvent la radio. L'analyse des résultats a montré en outre que les visiteurs d'un planétarium démontraient une attitude plus positive face à l'astronomie et reconnaissaient un plus grand nombre de termes astronomiques que ceux qui ne visitaient pas ce genre d'institution. Dans le cas de la reconnaissance de termes astronomiques, le pourcentage de mots reconnus augmentait de façon significative avec le nombre de visites effectuées par un même individu dans un planétarium.

Jamison (1972) s'est intéressé à l'impact créé par l'environnement immersif du planétarium et par l'animateur sur les attitudes des spectateurs quant à la valeur de l'astronomie dans la société. Un sondage comportant 28 questions a été complété par les visiteurs avant et après une séance de 40 minutes dans un planétarium. Les résultats montrent une forte augmentation des attitudes favorables à l'astronomie chez les spectateurs après leur expérience sous la voûte du planétarium.

Bisard (1979a; 1979b) a, quant à lui, évalué l'impact de trois discours de bienvenue différents utilisés au moment de l'accueil des spectateurs dans le théâtre du planétarium. Cette étude s'intéressait aux programmes publics, non aux scolaires. Les trois discours (résumant le contenu du spectacle) consistaient en un texte écrit remis aux spectateurs au moment où ils pénétraient dans la salle et qu'on les invitait à lire avant le début de la séance, d'une projection de diapositives ou d'un mot de bienvenue prononcé en direct par un animateur du planétarium. Le contenu était le même dans les trois cas. Ces trois types de discours ont été mis en contraste avec des spectacles sans mot de bienvenue.

L'auteur s'est également intéressé à l'influence de l'heure de présentation (20 h ou 22 h un soir de semaine, ou un dimanche après-midi) sur les apprentissages des spectateurs. Les spectateurs étaient interrogés après la représentation sur les connaissances qu'ils avaient acquises lors du spectacle, qui était le même dans tous les cas. Au total, 54 représentations présentées à différentes heures et précédées de divers modes d'introduction ont fait l'objet de l'étude.

L'analyse des réponses données par les spectateurs a permis de constater que les modes d'introduction utilisant un discours en direct ou une présentation de diapositives étaient significativement supérieurs au texte écrit ou à l'absence d'introduction. L'auteur conclut qu'une introduction au spectacle présentant le contenu de la représentation dans ses grandes lignes augmente de manière significative les apprentissages des spectateurs, une conclusion que l'on peut certainement étendre au domaine scolaire. En ce qui concerne les heures de représentation, les spectacles de 20 h et 22 h les soirs de semaine sont vus par des spectateurs plus âgés et ayant un plus haut taux de scolarité que ceux du dimanche après-

midi (clientèle plus familiale), ce qui s'accompagne d'un accroissement des gains en termes de connaissances acquises pour les spectateurs du soir.

McBride (1985) a de son côté réalisé une étude de marché comparant les caractéristiques socioéconomiques des publics visiteur et non visiteur du Morehead Planetarium de Chapel Hill, situé sur le campus de l'Université de Caroline du Nord. Le chercheur a découvert des différences importantes entre les visiteurs et les non visiteurs en ce qui concerne l'âge, la taille de la famille, le niveau d'éducation, le revenu et l'intérêt pour les sciences. Les visiteurs d'un planétarium accordent en général plus de valeurs aux activités familiales et au contenu éducatif de leurs sorties, et moins aux coûts reliés à ce type d'activité ou à leur aspect de divertissement. Des données socioéconomiques recueillies auprès des visiteurs du Planétarium de Montréal depuis une quinzaine d'années confirment ce profil (Pierre Lacombe, communication personnelle).

Enfin, Fisher (1997) s'est intéressé à l'impact de l'utilisation de l'humour sur l'apprentissage de notions astronomiques dans un planétarium par des spectateurs adultes. Deux spectacles identiques, d'une durée de quinze minutes chacun, ont été contrastés, l'un contenant en outre de nombreuses touches humoristiques. Les spectateurs étaient invités à répondre à un questionnaire écrit après les représentations. La comparaison des résultats des deux groupes, ceux ayant assisté aux spectacles humoristiques et les autres, a montré que les spectateurs qui avaient assisté aux spectacles humoristiques avaient significativement retenu moins d'informations et obtenaient des résultats plus faibles au questionnaire que les autres.

1.2 La recherche en éducation dans les planétariums : aspects scolaires

Nous nous intéresserons dans ce qui suit aux études ayant trait au rôle éducatif (au sens large) des planétariums. Notre recension des écrits se basera d'abord sur les résultats de recherche, qu'ils aient été publiés sous forme de mémoires, de thèse ou d'articles parus dans des revues spécialisées. Nous nous appuierons également sur un certain nombre de

travaux de synthèse (Wall, 1973; Reed, 1974; Sunal, 1976; Riordan, 1991; Brunello, 1992; Marché, 1999; 2001; Schroeder, 2004; Brazell & Espinoza, 2009) qui ont été publiés au cours des quarante dernières années. Nous diviserons cette présentation en sept sous-sections, chacune regroupant les études et recherches s'étant penchées sur un aspect particulier de cette vaste question. Chacune des sous-sections se conclura par une synthèse des principales informations qui y auront été consignées.

1.2.1 Travaux préliminaires

L'une des premières publications s'intéressant au rôle éducatif des planétariums est une collection d'articles (Jagger, 1959) traitant de programmation dans les planétariums, du lien entre planétarium et musée de science, de considérations architecturales et, bien sûr, de l'impact éducatif des planétariums. Mais il s'agit tout au plus de comptes-rendus d'observations personnelles et d'expériences acquises intuitivement, et non du résultats de recherches savantes. L'aspect fortement subjectif de ces textes en réduit malheureusement l'utilité pour qui veut comprendre les phénomènes d'apprentissage sous la voûte du planétarium.

Par la suite, bon nombre d'études menées durant les années soixante ont surtout cherché à documenter et décrire l'offre de service des planétariums de l'époque, les comparant les uns aux autres, ou encore comparant les spectacles grand public aux représentations destinées aux groupes scolaires. Nous décrivons quelques-unes de ces recherches dans ce qui suit.

Chamberlain (1962), à qui l'on doit la toute première thèse de doctorat consacrée aux planétariums, s'est basé sur l'analyse de plus de 1 400 questionnaires complétés par des enseignants new-yorkais ayant fréquenté le Planétarium Hayden (aujourd'hui le *Rose Center for Earth and Space* associé à l'*American Museum of Natural History* de New York). Il constate que la grande majorité de ces utilisateurs reconnaissent l'utilité d'une visite au planétarium pour leur enseignement. Chamberlain a également sondé les responsables des dix principaux planétariums alors en opération aux États-Unis pour

connaître l'état de leur programmation scolaire et grand public. En se basant sur les réponses obtenues, il déplore l'absence de personnel spécialisé en astronomie et en éducation dans ces mêmes institutions. Chamberlain note qu'une formation en science et en éducation, de même qu'une véritable expérience d'enseignement, constituent la base de la formation que devrait posséder toute personne travaillant dans le milieu des planétariums. Il conclut tout de même que le planétarium demeure un outil d'éducation extrêmement efficace, ne serait-ce que parce qu'il permet de simuler les mouvements naturels de la voûte céleste de manière accélérée :

« This feature makes it possible [...] so that nearly any observant person can reach a clear understanding in a few minutes of the working of the heavenly bodies. » (Chamberlain, 1962, p. 15)

Cet enthousiasme est partagé par Cross (1963), qui prétend que le planétarium possède un avantage indéniable sur la salle de classe en vertu de la facilité avec laquelle un plus grand nombre de concepts peuvent être assimilés en moins de temps et avec une compréhension beaucoup plus grande de la part du public. Cette affirmation n'est toutefois pas étayée par quelque mesure objective que ce soit.

Dans son étude, Korey (1963) a sondé près de 200 planétariums de toutes tailles aux États-Unis, intéressée surtout par la contribution de ces institutions à l'enseignement des sciences. Elle arrive à la conclusion que les planétariums sont loin d'avoir développé leur plein potentiel, faute de personnel adéquatement formé, de planification et de fonds d'opération suffisants. L'auteure constate également qu'un grand nombre de planétariums présentent aux plus jeunes des versions simplifiées de spectacles conçus au départ pour les adultes, sans préoccupation pour la capacité des jeunes spectateurs de s'approprier les concepts ainsi présentés (transposition didactique inadéquate, niveau de langage inadapté). Elle déplore en outre le fait que la majorité des directeurs de planétariums mesurent la qualité de leurs programmes en écoutant les conversations des visiteurs à la sortie d'une séance ou en demandant aux conférenciers s'ils ont « senti » que les spectateurs comprenaient bien leurs explications... Ce fut pendant longtemps le seul moyen utilisé par

les directions de planétariums pour évaluer l'impact éducatif des spectacles offerts par leurs institutions.

Noble (1964) constatera de son côté que les enseignants, qui ont peu ou pas de notions en astronomie, sont très mal préparés à assister à un spectacle de planétarium et, par conséquent, préparent mal leurs élèves. Elle déplore également le fait qu'il existe peu de liens entre les thèmes des spectacles et le contenu des programmes scolaires.

McDonald (1966) a sondé une soixantaine de planétariums construits en milieu scolaire (les *school planetariums*) de même qu'une douzaine d'observatoires astronomiques (également associés à des institutions d'enseignement) afin de comparer les thèmes présentés dans leurs programmes scolaires. Parmi les thèmes les plus populaires, on retrouve les mouvements de la voûte céleste (plus de 90% des spectacles) et les caractéristiques de la Lune, des planètes et des étoiles (70% des spectacles). Comme d'autres avant lui (Chamberlain, 1962; Korey, 1963), l'auteur déplore le fait qu'un pourcentage important du personnel éducatif de ces institutions ne possède aucune formation en enseignement des sciences.

Curtin (1967) s'est procuré les enregistrements de vingt spectacles scolaires s'adressant à des élèves de la 4^e à la 8^e année. Il voulait en évaluer le contenu et déterminer le type de questions le plus souvent posées aux spectateurs par l'animateur pendant ces représentations. Le chercheur a également demandé aux directeurs de ces institutions si des documents préparatoires et de suivi étaient mis à la disposition des enseignants qui visitaient le planétarium avec leurs élèves.

L'analyse du contenu des enregistrements a démontré que près de la moitié du temps de ces représentations était consacré à la présentation du ciel courant, avec l'identification des constellations, des étoiles et des planètes comme thèmes les plus fréquents. Dans la plupart des cas, le mot de bienvenue incluait une présentation du projecteur d'étoiles, une description de son fonctionnement, l'identification des points cardinaux ainsi qu'un mot sur les systèmes de coordonnées utilisés en astronomie et sur les

grands cercles projetés par le projecteur d'étoiles (méridien, écliptique, etc.). Quant aux questions posées aux spectateurs par l'animateur, la très grande majorité étaient descriptives et ne faisaient appel qu'à leur mémoire. Sur 413 questions recensées, neuf seulement suscitaient des activités cognitives plus élaborées (observation, extrapolation, analyse de relations entre des variables, etc.).

Comme Korey (1963), Curtin n'a pu que constater la grande diversité des contenus d'un spectacle à l'autre pour un même niveau scolaire, ce qu'il attribue à l'absence de contenu de référence en astronomie dans les programmes scolaires eux-mêmes. Il déplore en outre qu'un grand nombre de thèmes abordés ne pouvaient tout simplement pas être illustrés à l'aide des projecteurs présents dans le théâtre du planétarium. Dans sa conclusion, le chercheur a été l'un des premiers à promouvoir l'intégration de la séance au planétarium à l'intérieur d'une séquence d'enseignement initiée en classe et à recommander que l'on place les spectateurs dans le théâtre au cœur d'activités plus stimulantes en variant les approches d'animation.

G. E. Pitluga (1972) a cherché à savoir quelle évaluation les enseignants faisaient du planétarium où ils emmenaient leurs élèves pour assister à un programme éducatif. Pour ce faire, il a distribué un questionnaire comportant une quarantaine de questions à plus de 1 000 répondants ayant visité l'un des 31 planétariums couverts par l'étude. De ce nombre, 607 questionnaires ont été retournés à l'auteur; 523 enseignants du primaire et 84 enseignants du secondaire ont ainsi participé à l'étude. Des contraintes liées aux horaires particuliers du secondaire expliquent, selon l'auteur, la faible proportion de visiteurs issus de ce niveau scolaire par rapport à ceux du primaire.

Le chercheur a découvert que 64 % des répondants n'effectuent qu'une seule visite au planétarium chaque année; à peine 25 % y vont à deux reprises. Environ la moitié des répondants affirment qu'ils sont satisfaits de cette fréquence de visite tandis que l'autre moitié aimerait retourner au planétarium plus souvent. Ce point soulève l'importante question de savoir quel bénéfice peuvent retirer les élèves d'une si courte exposition au médium planétarium. Selon l'auteur, cela rend d'autant plus importante la préparation des

élèves avant la visite. Heureusement, le chercheur constate que, de ce point de vue, la grande majorité des planétariums et des enseignants collaborent pour s'assurer que les élèves aient droit à une préparation adéquate (discussion en classe, visite par un membre du personnel du planétarium, activités préparatoires) avant la visite.

Plus de 60 % des enseignants sondés par G. E. Pitluga (1972) affirment effectuer un suivi de la visite une fois de retour en classe en proposant à leurs élèves diverses activités reliées aux thèmes abordés au cours du spectacle. Dans la moitié des cas, ces activités ont été suggérées par la direction du planétarium, qui fournit même du matériel d'appoint (fiches, diapositives, etc.).

G. E. Pitluga (1972) constate en outre que les enseignants sont très majoritairement satisfaits de leur visite et affirment que le contenu du programme était adéquat et bien adapté aux besoins de leurs élèves. La majorité est également d'avis que les concepts au programme ont été mieux présentés au planétarium que ce qu'ils auraient pu faire eux-mêmes en classe. Ils apprécient le fait que les élèves ont pu interagir avec le présentateur et que ce dernier a bien répondu à leurs questions. Malgré les contraintes qui compliquent souvent l'organisation d'une visite au planétarium (coût du transport, coût des billets, temps limité pour une visite, etc.), les enseignants – tant les novices que ceux ayant une plus longue expérience de l'enseignement – répondent très majoritairement que l'intérêt d'une telle visite justifie amplement les efforts qui y sont consacrés.

1.2.1.1 Conclusion

Les travaux que nous avons cités dans cette section se caractérisent par leur volonté de décrire le plus fidèlement possible l'offre de service des planétariums, tout en émettant quelques critiques quant à la qualité des spectacles proposés, l'absence de préparation des élèves et de leurs enseignant(e)s, l'absence de liens entre les thématiques des spectacles et les programmes scolaires et la formation déficiente des animateurs responsables des visites. On note malgré tout un grand enthousiasme pour le planétarium, dont on vante les qualités

éducatives, mais sans étayer adéquatement ces prétentions, ce qui n'empêche pas les enseignant(e)s et les élèves qui visitent ces institutions de l'apprécier grandement.

On constate donc une certaine naïveté de la part des auteurs de ces études, naïveté qui s'explique sans doute par la nouveauté du médium planétarium et l'absence d'une réflexion approfondie sur les conditions d'appropriation de notions astronomiques dans un tel environnement immersif. Les premières études comparant le planétarium et la salle de classe, qui seront décrites dans la section suivante, permettront heureusement de mieux comprendre le rôle éducatif du planétarium, avec ses propres forces et ses faiblesses relatives.

1.2.2 L'apprentissage : en classe ou au planétarium ?

Un grand très grand nombre d'études savantes, parmi les premières jamais réalisées dans les planétariums, ont cherché à comparer les apprentissages réalisés sous la voûte d'un planétarium à ceux réalisés en classe. On peut voir là une volonté de justifier l'existence des planétariums en cherchant à asseoir leur rôle en tant qu'outils d'enseignement légitimes et autonomes, distinct de l'environnement scolaire. Nous rendons compte de ces études dans cette section et les suivantes.

On doit à Smith (1966) la toute première recherche savante concernant l'éducation dans les planétariums. Son étude, qui visait à comparer l'apprentissage de concepts astronomiques présentés sous la voûte d'un planétarium par rapport à la présentation des mêmes concepts dans une salle de classe, s'intéressait autant aux aspects cognitifs qu'affectifs des spectacles de planétarium. Smith a étudié vingt-quatre classes intactes d'élèves étasuniens de 6^e année dont la moitié ont suivi un cours d'astronomie de 40 minutes en classe tandis que l'autre suivait une session de durée équivalente dans un planétarium. Les classes participantes ont été réparties au hasard dans l'un ou l'autre groupe. Les élèves demeurés en classe ont eu droit à la présentation d'une vingtaine d'illustrations de concepts astronomiques ainsi qu'à l'utilisation d'un globe terrestre et d'une sphère céleste. Ces outils n'ont pas été utilisés au planétarium.

Un seul test écrit, conçu par l'auteur et complété par tous les élèves après la visite au planétarium ou la session en classe, a montré que la présentation des concepts dans la salle de classe produisait de meilleurs résultats en termes d'acquisition et de rétention de connaissances que la session dans le planétarium. Smith, qui impute les moins bons résultats obtenus au planétarium à la « nouveauté » du lieu et au manque de familiarité des élèves avec ce type d'équipement, en conclut que la visite d'un planétarium n'est pas essentielle à l'enseignement d'élèves de 6^e année si le seul objectif visé est leur compréhension de concepts astronomiques.

Notons toutefois que, d'un point de vue méthodologique, l'absence d'un prétest n'a pas permis de comparer les résultats finaux à la situation avant traitement ni de vérifier si les groupes étaient tous de force équivalente. D'autre part, du point de vue de la construction de la recherche elle-même, les traitements très différents administrés en classe (utilisation d'illustrations et d'outils concrets, comme des globes terrestre et céleste) et au planétarium rendent à notre avis la comparaison proposée par Smith (1966) hasardeuse, sinon vide de sens.

Deux études par Tuttle (1966; 1968) ont été conduites entre 1965 et 1967 afin de comparer l'efficacité du planétarium et de la salle de classe pour l'apprentissage de concepts en astronomie, plus spécifiquement les concepts de projection et d'orientation spatiales (représentation mentale tridimensionnelle de situations astronomiques, voir section 1.2.6). Ces études impliquaient à chaque fois deux groupes d'élèves de 6^e année.

Lors de la première étude (Tuttle, 1966), menée durant l'année scolaire 1965-66, des duos d'élèves appariés selon leur quotient intellectuel, leur âge ainsi que leurs performances scolaires antérieures, ont été répartis dans deux groupes. Chaque groupe a suivi trois sessions de cours en astronomie d'une durée de trente minutes par semaine pendant dix semaines. Le groupe traitement a suivi toutes les sessions sous la voûte du planétarium tandis que le groupe témoin est demeuré en classe. Le conférencier attitré du planétarium (le chercheur lui-même) a enseigné aux deux groupes. Au total, 64 élèves ont répondu au prétest et au post-test conçus par le chercheur et visant à évaluer les

connaissances en astronomie et les habiletés spatiales bi- et tridimensionnelles des répondants. Au contraire de Smith (1966), Tuttle a découvert une amélioration significativement plus grande des connaissances et des habiletés spatiales des élèves qui ont assisté aux présentations au planétarium par rapport à ceux qui sont demeurés en classe. Toujours selon Tuttle (1966), le planétarium pourrait également aider les spectateurs à améliorer leurs capacités de projection et d'orientation spatiales.

Dans une expérience similaire menée durant l'année scolaire suivante, 1966-67 (Tuttle, 1968), le chercheur a suivi 200 élèves, toujours de 6^e année. Il a lui-même accueilli les élèves au planétarium, mais d'autres enseignants se sont chargés des sessions en classe. Contrairement à l'année précédente, les élèves en classe ont utilisé des moyens audiovisuels plus sophistiqués (acétates) de même que des modèles tridimensionnels (globes terrestre et céleste), tandis que ceux qui ont assisté à des présentations sous la voûte du planétarium n'y ont pas eu accès. Au total, 16 sessions de 30 minutes ont été présentées à chacun des deux groupes. Cette fois, les résultats du post-test n'ont montré aucune différence significative entre les deux groupes, que ce soit au niveau des connaissances acquises ou des habiletés spatiales.

Selon le chercheur, la variabilité introduite par les différents professeurs de même que l'utilisation de matériel audio-visuel et de modèles concrets en classe, mais non au planétarium, expliquent la disparition de « l'effet planétarium » dans cette seconde étude. Notons également que, d'un point de vue méthodologique, le plus grand nombre d'élèves ayant participé à la seconde étude rend les résultats statistiquement plus significatifs que dans la première, même si la variabilité des effets y est sans doute plus grande.

Soroka (1967) a voulu évaluer l'impact d'une séance de planétarium inscrite dans une séquence d'enseignement de longue durée. Il a étudié les apprentissages d'élèves de 8^e année de deux écoles de milieux socioéconomiques différents inscrits à une session de six semaines d'enseignement couvrant quatre thématiques en astronomie liées à l'étude du système solaire. Les élèves des deux écoles ont été appariés selon un certain nombre de

facteurs (sexe, âge, niveau scolaire, de même que les résultats de tests de classement en science et en mathématiques). Au total, 101 paires d'élèves ont fait l'objet de l'étude.

Les élèves du groupe traitement assistaient d'abord à une session en classe avant de se rendre à quatre reprises sous la voûte du planétarium pour assister à une présentation résumant les concepts développés en classe. Les élèves du groupe témoin assistaient à la même présentation en classe, mais participaient plutôt à des sessions d'étude dirigée en classe d'astronomie tandis que les élèves du groupe traitement se rendaient au planétarium. Trois des quatre sessions sous la voûte du planétarium demandaient la participation active des élèves, et ils ont eu à maintes reprises l'occasion de manipuler du matériel simple, de même que des modèles en trois dimensions.

Le chercheur a conçu lui-même les tests qui lui ont permis d'évaluer les connaissances acquises par les élèves à la fin du traitement. Il n'a toutefois pas vérifié la justesse ni la validité de son instrument de mesure. La comparaison des deux groupes a montré que les élèves qui ont assisté aux sessions dans le théâtre du planétarium ont mieux réussi aux tests que les élèves du groupe témoin. Plus intéressant encore, les élèves provenant du milieu socioéconomique défavorisé ont obtenu de meilleurs résultats dans l'ensemble que ceux provenant du milieu plus favorisé. Par contre, les résultats d'un test standardisé mesurant les habiletés spatiales n'ont montré aucune différence significative entre les deux groupes. Le chercheur conclut toute de même que :

« The planetarium is an effective educational device and makes a positive contribution to the understanding and comprehension of basic astronomical and geographic concepts. » (Soroka 1967, p. 20)

Dans une étude désormais classique, Reed (1970; Reed & Campbell, 1972) a voulu évaluer l'efficacité du planétarium pour enseigner certains concepts en astronomie (mouvements diurnes et annuels des étoiles, des planètes supérieures et du Soleil, la sphère céleste et la précession) en le comparant avec l'utilisation du tableau noir et d'une sphère céleste dans la salle de classe. Au total, 38 classes d'étudiants étasuniens de niveau *College* ont été répartis au hasard en deux groupes. Le premier groupe a étudié en classe, n'utilisant

que le tableau et la sphère céleste, tandis que le second étudiait les mêmes notions astronomiques sous la voûte du planétarium. Le chercheur a dirigé lui-même toutes les sessions en classe et au planétarium. Au total, 758 étudiants ont fait l'objet de cette étude.

Après les présentations en classe et au planétarium, chacun des deux groupes a été subdivisé en quatre sous-groupes (huit sous-groupes au total) pour les besoins de l'évaluation. Un post-test a été administré à chacun des quatre sous-groupes de chaque catégorie de traitement à quatre semaines d'intervalle : immédiatement après la séance d'enseignement pour les deux premiers sous-groupes, quatre semaines plus tard pour les seconds, puis huit et douze semaines plus tard pour les deux dernières paires de sous-groupes.

Les résultats démontrent que les élèves qui ont assisté à la présentation dans la salle de classe réussissent mieux aux post-tests que ceux qui ont assisté à une présentation équivalente sous le dôme du planétarium et ce, quelque soit l'intervalle entre le traitement et l'administration du test. Mieux encore, l'écart entre les deux groupes croît avec la complexité des thèmes abordés, l'étude de la sphère céleste et de la précession ayant produit le plus grand écart en faveur du groupe demeuré en classe. On peut cependant se demander, à l'instar de ce que nous écrivions plus tôt à propos des travaux de Smith (1966), si les deux traitements étaient véritablement comparables et si ces conclusions sont d'une quelconque utilité pour comprendre le phénomène d'apprentissage au planétarium en l'absence d'un prétest administré à tous les élèves.

Dans son étude, Reed a également voulu mesurer l'impact affectif des deux approches en mesurant l'atteinte de certains objectifs comportementaux spécifiques (par exemple, l'emprunt de livres d'astronomie à la bibliothèque de l'école suite à l'enseignement). Il n'a constaté aucune différence à ce niveau entre les groupes qui ont visité le planétarium et ceux qui sont demeurés en classe : l'intérêt des élèves s'est accru dans les deux cas.

L'auteur conclut donc que l'enseignement de concepts astronomiques dans la salle de classe produit de meilleurs résultats que celui prodigué dans un planétarium, autant dans l'immédiat que près de trois mois après la fin des séances d'enseignement. Il recommande d'incorporer les séances au planétarium à l'intérieur de séquences plus longues amorcées et conclues en classe et suggère que la véritable force du planétarium pourrait résider dans sa capacité à émouvoir et émerveiller.

Trois ans plus tard, Reed (1973) répétait l'expérience dans les mêmes conditions, cette fois en comparant une situation d'apprentissage incluant le planétarium, la salle de classe et l'utilisation d'une sphère céleste avec une situation n'incluant que la salle de classe et la sphère céleste. Cent cinquante-neuf sujets ont fait l'objet de l'étude. L'auteur n'a découvert aucune différence significative entre les deux situations, ce qui l'amène à conclure que le véritable potentiel du planétarium réside non pas dans son utilisation comme salle de classe, mais plutôt dans sa capacité à simuler des phénomènes astronomiques difficiles à observer dans un contexte scolaire :

« The planetarium, in order to be used effectively, should be used as a simulation device in a classroom teaching-learning situation. It should not be used simply as a "dark" classroom. Those aspects of teaching and learning that have been identified as effective and desirable in the normal classroom situation should also be applied to the planetarium situation. »
(Reed, 1973, p. 555)

Dans une étude menée auprès de 986 élèves étasuniens de 2^e année, Sunal (1973) a cherché à déterminer jusqu'à quel point une visite au planétarium permettait l'atteinte des objectifs pédagogiques visés par les enseignants responsables de ces groupes de jeunes visiteurs. Les élèves ont d'abord répondu à un questionnaire prétest visant à mesurer leurs connaissances vis-à-vis des notions astronomiques visées par l'enseignement. Ils ont ensuite été divisés au hasard en trois groupes : le premier a suivi un cours d'astronomie en classe sans visiter le planétarium. Le second a aussi suivi le cours en classe et a effectué en plus une visite au planétarium. Le troisième groupe n'a fait ni l'un, ni l'autre. Les trois

groupes ont ensuite été soumis à un questionnaire post-test comprenant 30 questions à choix de réponses et quelques questions requérant la réalisation d'un dessin par l'enfant.

Les deux premiers groupes ont démontré un gain significatif et appréciable dans tous les domaines visés par rapport au groupe qui n'avait reçu ni enseignement en astronomie, ni effectué de visite dans un planétarium. Par contre, le groupe qui a visité le planétarium n'a pas démontré de gain supérieur à celui qui n'avait reçu que l'enseignement en classe et ce, malgré le fait qu'ils avaient objectivement passé plus de temps à étudier cette matière que les autres. L'auteur a toutefois découvert que l'impact cognitif et affectif d'une visite au planétarium était maximisé lorsque la visite avait lieu vers la fin d'une séquence d'enseignement en astronomie plutôt qu'à tout autre moment dans cette séquence.

Ridky (1973) s'est intéressé aux apprentissages d'élèves de 8^e année soumis à diverses combinaisons de sessions en classe et au planétarium. Le premier groupe a débuté par une session de « démystification » du planétarium où le fonctionnement du projecteur d'étoiles a été décrit en détail. Cinq autres sessions sous la voûte ont suivi. Le second groupe a suivi cinq leçons équivalentes en classe. Le troisième groupe a suivi une combinaison de leçons où les sessions en classe et au planétarium alternaient. Le traitement a duré deux semaines au total, à raison d'une séance d'astronomie à tous les deux jours.

Le chercheur a construit lui-même l'instrument d'évaluation, qui consistait en un questionnaire visant à mesurer les connaissances des élèves à propos des thèmes visés par le programme scolaire en vigueur. Le questionnaire a été soumis aux élèves à trois reprises : une première fois avant le début des leçons, une seconde fois à la fin de la séquence, et une dernière fois deux semaines après la fin de l'étude. Un autre test, mesurant cette fois les aspects affectifs reliés aux leçons, a lui aussi été administré avant et après la séquence.

Les présentations dans le planétarium étaient toutes préenregistrées et n'impliquaient ni manipulation ni interaction de la part des élèves. Au contraire, les sessions en classe utilisaient du matériel pédagogique qui incitait les élèves à manipuler et

explorer. L'analyse des réponses démontre que la session de démystification au planétarium augmente significativement les résultats des élèves qui y ont participé et que la combinaison de la salle de classe et du planétarium produit les meilleurs résultats chez les élèves, autant à court qu'à moyen terme. Par contre, le groupe de traitement mixte a obtenu une moyenne plus faible que les autres en ce qui concerne les aspects affectifs reliés aux thèmes astronomiques couverts par la séquence d'enseignement. Dans ce domaine, le groupe qui a vécu toutes les sessions au planétarium a obtenu les meilleurs résultats.

Parallèlement à l'étude qui vient d'être décrite, Ridky (1973) a suivi la même procédure, cette fois avec des élèves plus âgés (niveau *College*). Dans ce cas, le chercheur n'a pas mesuré d'amélioration significative due à la session de démystification au planétarium. Il n'est pas apparu non plus de différence significative entre les trois groupes de traitement en ce qui concerne le test administré immédiatement après la séquence. Ridky impute ce résultat au fait que les élèves plus jeunes, qui sont en transition entre les stades de la pensée concrète et de la pensée formelle (Piaget, 1970), bénéficient peut-être davantage que les plus âgés de l'aspect nouveau et « concret » des sessions sous la voûte d'un planétarium. Cependant, la combinaison planétarium-salle de classe a produit une amélioration significative aux résultats du test administré deux semaines plus tard.

S'intéressant aux aspects cognitifs et affectifs du planétarium, Burnette (1976) a voulu mesurer l'effet de séances au planétarium, offertes dans le cadre d'un programme de sciences de la Terre et de l'espace, sur les apprentissages et l'attitude des élèves à propos de l'astronomie. Dans un premier temps, il a choisi d'étudier des groupes aléatoires d'élèves de 8^e année de deux années scolaires successives (1974-75 et 1975-76). Les élèves participants à la première année de l'étude n'ont pas reçu d'instruction sous la voûte du planétarium (qui était encore en construction à l'époque) mais plutôt uniquement en classe, tandis que ceux de la seconde année ont assisté à des séances dans le nouveau théâtre. Un questionnaire visant à évaluer leurs connaissances et leur intérêt pour l'astronomie a été soumis aux deux groupes à la fin de chacune des deux années scolaires afin de mesurer leurs apprentissages et leur changement d'attitude à propos de l'astronomie. Burnette a

découvert une amélioration notable des connaissances et de l'attitude positive des élèves du second groupe, ceux qui ont bénéficié des sessions au planétarium.

Le même chercheur a répété l'expérience en 1975-76 avec des élèves de 4^e année, cette fois en administrant ses tests au début et à la fin d'une même année scolaire. Ces élèves plus jeunes ont eux aussi démontré une amélioration de leurs connaissances entre le début et la fin de l'année scolaire (les résultats concernant l'attitude n'étaient pas significatifs). Malheureusement, et c'est là une faille majeure dans la construction de cette étude, le nombre restreint de séances au planétarium en cours d'année, surtout comparé au nombre d'heures passées en classe à étudier les mêmes thématiques, rend difficile, sinon impossible, l'établissement d'un lien direct entre le planétarium et les bons résultats des élèves.

Ortell (1977a) a réalisé une étude *ex post facto* (après le fait) en comparant les résultats d'examens et les notes finales de deux groupes similaires d'élèves de niveau *College* inscrits à un cours d'astronomie. Le premier groupe, composé de 131 étudiants (tous volontaires), a suivi tous ses cours dans un planétarium tandis que l'autre, composé de 96 élèves, a suivi tous ses cours en classe. À part le lieu d'enseignement, tous les autres aspects du cours (thèmes étudiés, matériel pédagogique utilisé, enseignant, questions d'examens) étaient identiques pour les deux groupes.

Le chercheur a découvert que les étudiants ayant assisté aux sessions au planétarium avaient significativement mieux réussi que les autres à une batterie de tests mesurant leurs connaissances à propos de la Terre, la Lune, le Soleil et les planètes. L'auteur explique la supériorité du planétarium par le fait que les étudiants perçoivent le planétarium comme un endroit très différent de la salle de classe et plus stimulant (Ortell, 1977b). Il faut par contre mentionner que les résultats ne peuvent être étendus à d'autres populations puisque la répartition des étudiants dans les groupes ne s'est pas faite au hasard. De plus, la grande majorité des étudiants qui ont choisi de suivre leurs cours au planétarium démontraient, dans tous les domaines d'études, des résultats académiques supérieurs à ceux qui ont suivi les mêmes cours en classe. Le résultat était donc, jusqu'à un certain point, prévisible.

Comme d'autres avant lui, Dobson (1983) a cherché à comparer trois approches éducatives : le planétarium seul, la salle de classe seule et une combinaison planétarium-salle de classe. Dans les trois cas, cependant, le chercheur a utilisé une pédagogie participative. Les sujets de son étude étaient 135 élèves de 5^e année répartis au hasard entre les trois groupes de traitement. Six sessions au total ont été présentées à chacun des groupes de traitement. Les concepts abordés étaient la rotation, la révolution et les phases de la Lune.

Dobson a d'abord soumis les élèves à divers tests afin de mesurer leur niveau de développement cognitif et leur niveau de connaissances en astronomie. Après les six séances d'enseignement, les mêmes élèves ont été à nouveau soumis au test de connaissances en astronomie, et une fois encore deux semaines plus tard. Les élèves qui ont assisté à une ou plusieurs sessions au planétarium ont également été soumis à un questionnaire d'attitude vis-à-vis l'astronomie.

Le chercheur n'a découvert aucune différence significative entre les groupes en ce qui concerne la rétention ou la compréhension de concepts. De plus, les élèves qui ont assisté à une ou plusieurs sessions au planétarium ont développé une attitude moins positive que les autres par rapport à l'astronomie. Par contre, le chercheur a découvert que la compréhension des concepts était significativement corrélée au niveau de développement cognitif des élèves. Ceci étant dit, la faible moyenne générale des résultats obtenus par tous les élèves au test de connaissance en astronomie (moins de 25 %) porte le chercheur à croire que les concepts qui requièrent la coordination de différents points de vue et la capacité de passer de deux à trois dimensions et vice-versa (ce que Bishop (1980a) appelle les *projective spatial ability*) ne sont tout simplement pas à la portée d'élèves de 5^e année. Après avoir nous-mêmes inspecté le questionnaire, nous croyons également que les questions étaient tout simplement trop complexes pour des élèves de cet âge, mal transposées et exprimées dans un langage inadapté.

Twiest (1989) a cherché à mesurer les apprentissages en astronomie réalisés par 423 élèves de 4^e, 5^e et 6^e années dans le cadre d'une séquence d'enseignement utilisant soit le

planétarium, soit la salle de classe. Pour ce faire, il a comparé deux cohortes d'élèves, une qui a étudié les constellations et les mouvements de la voûte céleste dans un planétarium et l'autre qui l'a fait dans une salle de classe traditionnelle. Les objectifs et la matière enseignée étaient les mêmes dans les deux cas. La comparaison a porté, d'une part, sur les attitudes et l'intérêt manifesté par les élèves envers les sciences en général et l'astronomie en particulier et, d'autre part, sur les connaissances acquises et la compréhension de certains concepts.

Chaque semaine pendant douze semaines, le groupe planétarium a assisté à une session de 40 minutes donnée par un animateur du planétarium. La première et la dernière semaine ont servi à administrer les tests. Les élèves du groupe classe ont étudié la même matière en l'espace de deux semaines avec leurs propres enseignants. Ils n'ont pas visité le planétarium mais plutôt utilisé des globes célestes et le rétroprojecteur. Pour ce groupe, le prétest et le post-test ont été administrés à deux semaines d'intervalle, contre dix pour le groupe traitement, une différence qui nous apparaît considérable. Les questions ont fait l'objet d'un test de lisibilité (indice de *Fog*) et tous les élèves ont aussi répondu à un test d'État visant à mesurer leurs capacités de lecture et leurs connaissances en mathématiques.

Des questionnaires développés par l'auteur et sondant les attitudes, l'intérêt et les connaissances des élèves ont été administrés dans un design quasi-expérimental. Le test d'État de même que les résultats aux deux prétests et post-tests ont été utilisés dans le cadre d'une analyse de covariance. Une autre analyse de covariance a permis de comparer les résultats en fonction du sexe des répondants. L'analyse montre que seuls les élèves de 4^e année du groupe planétarium ont montré une attitude plus favorable envers l'astronomie et les sciences; pour les élèves plus âgés, il n'y avait pas de différence significative entre le groupe planétarium et salle de classe. L'auteur en conclut que le planétarium a peut-être un impact maximum lors des premières visites de jeunes élèves.

En ce qui concerne l'acquisition de connaissances, c'est plutôt le groupe classe qui a mieux réussi que le groupe planétarium, ce qui est peut-être le reflet du peu de temps écoulé entre leurs pré- et post-tests et une mesure de la qualité de l'interaction entre les

élèves et les personnes qui enseignaient. En particulier, le responsable des sessions au planétarium a dû s'absenter plus de 12 % du temps à cause de malaises reliés à des problèmes de ventilation dans le planétarium. La différence pourrait aussi être due au fait que les élèves du groupe planétarium n'ont pas aussi bien performé au test puisque le mode d'évaluation utilisant un crayon et du papier est trop différent de la façon dont l'enseignement leur a été prodigué sous la voûte du planétarium (Dean & Lauck, 1972).

Une étude *post hoc* a isolé les questions de connaissances qui, selon le chercheur, s'apprennent mieux sous le dôme du planétarium (par exemple, la reconnaissance des constellations). Dans le cas de ce sous-groupe de questions, les élèves de 5^e et 6^e année du groupe planétarium ont significativement mieux réussi que ceux du groupe classe. Règle générale, l'étude n'a découvert aucune différence significative entre les garçons et les filles, que ce soit au sujet des attitudes ou des connaissances en astronomie.

Palmer (2007) a mené une étude visant à mesurer l'apprentissage de concepts liés aux phases de la Lune et aux éclipses par des élèves de douze classes intactes de 5^e année d'un même district scolaire de la ville de Commerce, au Texas (États-Unis). Au total, 178 élèves placés sous la responsabilité de quatre professeurs ont participé à l'étude. Le chercheur a développé lui-même l'instrument de mesure, un test utilisé avant et après traitement pour déterminer les connaissances préalables des participants et l'évolution de leurs apprentissages après le traitement. Le test comportait trois sections : une première section comprenant des questions à choix multiples, une seconde section où l'élève était invité à répondre aux questions en développant sa pensée, et une troisième section où les élèves devaient manipuler des photos de différentes phases de la Lune pour les mettre en ordre croissant.

Pour tous les groupes, l'activité a commencé en classe par le prétest, suivi d'une leçon où les thèmes des phases de la Lune et des éclipses ont été abordés selon les prescriptions du programme scolaire de l'État. Le groupe traitement a ensuite assisté à un spectacle de 45 minutes intitulé *Moon Witch* présenté sous la voûte du planétarium et portant sur ces mêmes thèmes. À la fin de la séance, ces élèves ont répondu au post-test. Au

contraire, le groupe témoin a assisté à une seconde leçon en classe d'une durée équivalente au spectacle de planétarium avant de répondre au post-test. Ce second groupe a aussi assisté au spectacle, mais après avoir répondu au post-test.

L'analyse des données a montré que les deux groupes étaient équivalents en ce qui concerne leurs réponses aux prétests, ce qui a permis au chercheur de les traiter comme un seul groupe. Les résultats du post-test montrent une amélioration significative des résultats des élèves ayant assisté au spectacle de planétarium, par rapport à ceux demeurés en classe. Une analyse plus fine de chacune des trois sections du post-test a montré que la majorité des gains avait eu lieu dans la troisième section, qui requerrait de la part des élèves la manipulation de photos des phases de la Lune et un meilleur raisonnement spatial. Le chercheur en conclut que le spectacle de planétarium a permis aux élèves d'améliorer leur compréhension des phases de la Lune et des éclipses, étant donné la capacité du médium planétarium de créer des représentations visuelles de ces phénomènes astronomiques que les spectateurs devraient autrement créer eux-mêmes mentalement.

1.2.2.1 Conclusion

Malgré la grande variabilité des résultats des études que nous venons de présenter, il ressort tout de même un certain nombre de faits qui méritent d'être soulignés, puisqu'ils nous seront utiles pour la suite de notre propre recherche. Notons d'abord que la « nouveauté » du planétarium, son aspect non familier, peut décontenancer certains élèves qui visitent le lieu pour la première fois, mais que d'autres, particulièrement les plus jeunes, semblent au contraire motivés par cet aspect de nouveauté. Quoi qu'il en soit, une période de démystification du planétarium et de ses équipements et la présentation d'un résumé de la séance au début améliore sensiblement les apprentissages des élèves spectateurs. Au niveau des habiletés de projection et d'orientation spatiales, le planétarium semble être en mesure d'aider les élèves à les améliorer. Les élèves de milieux socioéconomiques plus défavorisés semblent d'ailleurs profiter davantage d'une session sous la voûte d'un planétarium. Les sessions au planétarium devraient être intégrées vers la fin d'une séquence qui trouve son origine et se conclue en classe, et le planétarium devrait être utilisé comme

un « laboratoire du ciel » complémentaire au travail en classe. Enfin, une visite au planétarium semble avoir des impacts affectifs positifs chez certains élèves, particulièrement les plus jeunes.

Revenons sur les résultats éducatifs de ces études « comparatives », dont on constate qu'ils sont plutôt mitigés – certains chercheurs mesurant un avantage éducatif pour le planétarium, d'autres pour la salle de classe, et d'autres encore ne constatant aucune différence entre les deux. On doit soulever contre plusieurs de ces études une objection méthodologique importante liée essentiellement à la difficulté de comparer deux médiums si différents. Etheridge (1974), qui porte un jugement très sévère sur un certain nombre des études citées précédemment, le résume ainsi :

« Most of them are hardly worth the time spent on them. The primary danger in media-media comparisons is that it is impossible to generalize beyond the immediate experiment. [...] Just because film "A" is more effective than television presentation "B" does not mean that films are superior to television. It only means that "A" is better than "B" under conditions of the experiment. » (Etheridge, 1974, p. 49)

Comme le fait justement remarquer Cohen (2001, p. 20), il faut, pour parvenir à un partenariat harmonieux entre le musée (le planétarium) et l'école, déterminer plutôt les spécificités, les enjeux, les objectifs et les moyens de chacune des institutions. Paquin (1998) ajoute que le musée et l'école se distinguent par leurs définitions, leurs missions, leurs rôles, leurs approches, leurs méthodes, leurs stratégies et leurs contenus d'apprentissages. Il faut donc prendre en compte ces éléments particuliers si on veut établir les bases d'un véritable partenariat, plutôt qu'un affrontement, où chacun découvre ses forces, pour ensuite définir des objectifs communs aux deux institutions.

En d'autres termes, les études comparatives nous renseignent peut-être sur les approches pédagogiques utilisées en classe et qui donnent de bons résultats, comme l'utilisation de modèles concrets (globes terrestres et célestes), mais elles sont pauvres en informations sur ce qui « marche » sous la voûte d'un planétarium. Pour répondre la cette question plus spécifique de savoir quelles approches pédagogiques sont efficaces au

planétarium, il faudra entreprendre d'autres types d'études qui s'intéressent plutôt à la complémentarité du planétarium et de la salle de classe, ou encore aux caractéristiques intrinsèques du planétarium en tant que lieu d'apprentissage. Nous présentons dans les sections suivantes des études qui se penchent justement sur ces questions.

1.2.3 L'apprentissage : en classe et au planétarium ?

Un certain nombre d'études ont cherché à évaluer l'impact d'une séance au planétarium, non plus en l'opposant au travail en classe, mais en s'interrogeant plutôt sur les aspects complémentaires de ces deux lieux d'apprentissage. Pour ne citer qu'un exemple (sur lequel nous reviendrons plus en détail vers la fin de cette section), Meyer (2000) s'est intéressée à trois activités préparatoires et de suivi réalisées en classe autour d'une séance sous la voûte d'un planétarium. Bien que les chercheurs dont nous parlerons dans ce qui suit aient souvent voulu comparer les apprentissages réalisés dans le cadre d'une combinaison classe-planétarium avec des groupes qui sont demeurés en classe, on ne doit pas y voir, comme dans la section précédente, une volonté d'opposer les deux milieux. Dans le cas de la grande majorité des études citées dans la présente section, le ou les groupes demeurés en classe ont simplement servi de témoin en fournissant une base de comparaison pour les apprentissages réalisés au planétarium. Nous décrivons ces études dans ce qui suit et présentons leurs principales conclusions.

Rosemergy (1967) a voulu évaluer l'efficacité du planétarium en tant qu'outil pédagogique, mais en l'inscrivant à l'intérieur d'une séquence d'enseignement menée en classe. Le principal objectif de son étude était de déterminer de quelle manière l'utilisation d'un planétarium dans un contexte scolaire facilitait la compréhension de concepts astronomiques par des élèves de 6^e année. Pour ce faire, le chercheur a évalué plusieurs combinaisons de sessions en classe et au planétarium.

Au total, 339 élèves de 17 classes intactes réparties en trois groupes ont participé à cette étude. Les cours en classe et les sessions au planétarium étaient d'une durée de 45 minutes chacun. Le premier groupe a suivi quatre cours en classe, suivis par un cours dans

un planétarium. Le second groupe a suivi le premier et le dernier cours dans un planétarium et les trois autres en classe. Le dernier groupe, enfin, a suivi les cinq cours en classe, sans visiter le planétarium. Tous les cours ont été donnés par le chercheur lui-même, qui signale que les sessions suscitaient l'implication active des élèves, autant en classe qu'au planétarium.

Un prétest et un post-test, conçus par le chercheur, ont permis de comparer l'acquisition de connaissances à propos d'une vingtaine de concepts astronomiques par les élèves d'un groupe à l'autre. L'analyse des réponses a montré que les trois approches étaient aussi efficaces les unes que les autres, sans qu'aucune ne donne de meilleurs résultats, ce qui amène le chercheur à conclure que les élèves n'acquièrent pas plus de connaissances par rapport aux concepts astronomiques étudiés selon que leur séquence d'enseignement inclus ou non la visite d'un planétarium, ou peu importe quand la visite a eu lieu dans la séquence éducative.

Mergler (1975) a décrit l'utilisation du planétarium comme composante intégrale de la salle de classe dans un programme de science s'adressant à des élèves de 8^e année. Il conclut que, bien que l'impact cognitif soit mitigé, l'impact affectif d'une séance au planétarium est indéniable et joue un rôle motivateur exceptionnel. Ceci est d'autant plus vrai, ajoute-t-il, lorsque le planétarium est utilisé comme un laboratoire-observatoire et qu'on y mène des sessions participatives. Sunal & Sunal (1977, p. 209) parlent d'ailleurs du planétarium, lorsqu'il est utilisé de cette façon, comme d'une véritable station d'observation semblable à celle qu'installent les astronomes amateurs qui passent la nuit sous les étoiles au milieu d'un champ.

Davis (1978) a voulu mesurer l'impact de la visite d'un animateur du planétarium dans une classe de maternelle avant que celle-ci ne visite l'institution pour assister à un spectacle scolaire. Il a sélectionné au hasard deux classes qui avaient déjà fait une réservation pour visiter le planétarium. Un premier groupe (test), composé environ à part égale d'élèves de 5 et 6 ans, a reçu la visite d'un animateur et a assisté au spectacle le lendemain. Le second groupe, de composition semblable au premier, a assisté au spectacle

sans recevoir la visite de l'animateur. Le spectacle était identique dans les deux cas et abordait les thèmes du mouvement diurne du Soleil dans le ciel, les constellations, le système solaire et la Lune. Le spectacle, d'une durée de trente-cinq minutes, était préenregistré pour assurer l'uniformité de cet aspect du traitement.

La présentation en classe offerte au groupe traitement consistait en une présentation du planétarium et de ses équipements, ainsi que de la présentation des principaux thèmes couverts dans la représentation sous la voûte. Cette présentation durait environ trente minutes. Elle s'est déroulée sous la forme d'un dialogue entre l'animateur et les élèves, appuyée par la présentation de diapositives.

Au lendemain de leur visite, les deux groupes ont répondu oralement à une vingtaine de questions à propos des thèmes couverts par le spectacle. Il est à noter que le chercheur n'a pas soumis les élèves à un prétest. Les résultats du post-test indiquent que le groupe traitement a moins bien réussi que le groupe témoin. Ces résultats ne sont malheureusement pas concluants : le chercheur les explique *a posteriori* par le fait que l'enseignante du groupe témoin avait consacré neuf jours de classe à l'étude de l'astronomie environ un mois avant la visite au planétarium, tandis que celle du groupe traitement n'avait abordé le sujet que très superficiellement. Il semble donc que la préparation accrue du groupe témoin ait eu un effet dominant sur l'acquisition de connaissances par les élèves. L'auteur recommande donc l'utilisation d'un prétest pour départager les effets extérieurs au traitement à l'étude de même que la constitution d'un programme d'étude détaillé à l'intention des enseignants qui envisagent d'organiser une visite du planétarium avec leurs élèves, afin d'assurer une certaine uniformité dans la préparation des groupes.

Griffin (1978) a conçu un questionnaire de 25 questions utilisant une échelle de Likert pour estimer la valeur affective associée à l'utilisation du planétarium pour l'enseignement des sciences à des élèves du secondaire. Ces élèves ont été classés en trois catégories (fort, moyen, faible) selon leur rendement scolaire antérieur. Chaque catégorie de traitement a suivi deux sessions de planétarium en plus de faire des travaux en classe. La

recherche n'a démontré aucune différence significative dans l'attitude des élèves en ce qui concerne l'utilisation du projecteur d'étoiles, le lien entre les démonstrations sous la voûte et le travail complémentaire en classe, ni la manière dont l'astronomie est présentée comme sujet d'étude, et ce, quelle que soit la catégorie dont les élèves faisaient partie.

Urke (1993) s'est demandé si l'impact d'une séance de planétarium de type *StarLab* (planétarium portatif gonflable, voir Sadler (2004)) variait selon que la session avait lieu au début, au milieu ou à la fin d'une séquence d'enseignement entreprise en classe. Son étude portait sur 202 élèves norvégiens du primaire répartis en trois groupes : un premier groupe a assisté à une session dans le planétarium au début de la séquence, le second au milieu et le troisième à la fin. La séquence comprenait au total huit séances dont sept se déroulaient en classe et une au planétarium. Un quatrième groupe de 83 élèves (contrôle) a suivi les huit séances en classe sans se rendre au planétarium. Après le traitement, tous les élèves ont été soumis au même questionnaire comprenant 16 questions avec choix de réponses ou demandant un développement ou un dessin de la part de l'élève.

L'analyse des résultats indique que la visite du planétarium favorise les apprentissages des élèves lorsqu'elle est en lien direct avec le travail effectué en classe, d'autant plus lorsque la séance a lieu au milieu de la séquence d'enseignement. Le chercheur a trouvé peu de différences entre les garçons et les filles en ce qui concerne les apprentissages, sinon que les filles semblaient apprécier davantage la visite.

Par contre, Urke (1993) a pu mettre en évidence le fait que les élèves dont les résultats scolaires étaient moyens ou faibles s'amélioraient davantage que les plus forts lorsqu'ils assistaient à une session de planétarium, contrairement aux élèves au rendement scolaire supérieur qui semblaient profiter davantage des huit sessions en classe. Les élèves plus faibles semblent profiter davantage des séances au planétarium, sans doute à cause de l'aspect concret de l'expérience qu'ils y vivent. On peut aussi imaginer que les élèves qui réussissent bien dans un contexte scolaire traditionnel soient peut-être désavantagés lorsque

l'apprentissage se fait dans un milieu informel qu'ils connaissent moins bien et auquel ils ne sont pas habitués.

Un autre aspect très intéressant de cette étude concerne les raisons que les enfants invoquent pour justifier leurs réponses à certaines questions. En étudiant cet aspect, le chercheur voulait valider une observation faite par Viglietta (1986) concernant des réponses typiques d'enfants à propos des mouvements de la voûte céleste :

« [...] when answering a school test, pupils seem to turn to an official view, received from teachers, books, and mass-media, more than to what they can see with their own eyes. Very few students used their own knowledge of everyday events to answer the questions. It seems as if they had never looked at the sky during the day as well as during the night. » (M. L. Viglietta, 1986, citée dans Urke, 1993, p. 19)

Urke a donc demandé à tous les enfants « Comment savons-nous que la Terre tourne sur elle-même ? ». Les réponses ont été réparties en deux catégories : celles qui invoquaient un argument d'autorité (« mon professeur me l'a dit », « je l'ai lu ou vu à la télé », etc.) et celles qui faisaient appel à la propre expérience des élèves (« on peut voir le Soleil ou les étoiles se déplacer dans le ciel »). Il s'avère que les élèves qui ont assisté à une séance de planétarium portant, entre autres, sur les mouvements de la voûte céleste, ont fait plus fréquemment appel à leur expérience qu'aux arguments d'autorité et ce, de manière très significative. Ce point amène l'auteur à conclure que le planétarium a le plus d'impact lorsqu'il propose aux spectateurs des simulations de phénomènes astronomiques qui sont normalement difficiles, voire impossibles à observer par les principaux intéressés dans un contexte scolaire. Rajoutons que cet impact sera encore plus grand si la séance de planétarium est construite de telle façon qu'en plus de « donner à voir », elle guide le spectateur et lui enseigne quoi et comment observer (Johsua & Dupin, 1999).

Meyer (2000) rapporte son évaluation de trois types d'activités préparatoires et de prolongement bâties autour de la visite d'un planétarium portatif gonflable de type *StarLab*. L'auteure cherchait à déterminer laquelle des trois approches privilégiées dans son étude permettrait aux élèves de faire les gains les plus importants au niveau de la maîtrise des

concepts astronomiques étudiés. Elle s'intéressait également à l'impact de ces approches sur l'attitude des élèves par rapport à l'astronomie. Les trois types d'activités retenues par la chercheuse étaient : « main à la pâte » (*hands-on*), utilisant une approche behavioriste et expérientielle pour développer la modélisation; audio-visuelle, utilisant des présentations vidéo et des simulations sur ordinateur; et une troisième, plus traditionnelle, basée sur la simple lecture de textes descriptifs.

La chercheuse a soumis 181 élèves (neuf classes) de 6^e année à deux prétests et post-tests mesurant, d'une part, leurs connaissances par rapport au contenu de base du programme d'astronomie de leur niveau scolaire et, d'autre part, leur attitude par rapport à l'astronomie. Les neuf classes ont été réparties au hasard en trois groupes, chacun suivant pendant quatre jours un programme d'enseignement en astronomie utilisant des activités préparatoires et de prolongement basées sur l'une des trois approches présentées plus haut. Le troisième jour, le programme incluait pour tous les groupes une séance dans un planétarium portable de type *StarLab*. La présentation sous le dôme du *StarLab* était la même pour tous et reprenait, par le biais de simulations astronomiques, les concepts étudiés en classe. À la fin des quatre jours, un cinquième test mesurant le degré de satisfaction des élèves suite à la présentation du programme en astronomie leur a été soumis.

Les résultats statistiques issus de la comparaison des réponses aux prétests et aux post-tests n'ont montré aucune différence d'un groupe de traitement à un autre, que ce soit au niveau de l'acquisition de connaissances en astronomie, au niveau de l'attitude envers l'astronomie ni même en ce qui concerne le niveau de satisfaction des jeunes participants, mesuré au moment de la conclusion des activités.

1.2.3.1 Conclusion

On retrouve ici l'idée, déjà abordée dans la section précédente, que la visite au planétarium inscrite au milieu d'une séquence initiée et conclue en classe et dont la thématique est complémentaire au travail en classe favorise les apprentissages en astronomie par les élèves. De plus, l'idée du planétarium comme laboratoire d'astronomie

reviens, avec un rôle motivateur très important. En particulier, la visite au planétarium fournit aux élèves un bagage d'expériences d'observation du ciel auxquels ils n'ont pas normalement accès durant les heures normales de classe et qu'ils peuvent par la suite invoquer pour répondre à des questions d'évaluation. Enfin, les élèves dont les résultats scolaires sont moyens ou faibles semblent profiter davantage de leur visite au planétarium que ceux dont les résultats scolaires sont meilleurs.

De manière générale, au niveau des apprentissages en astronomie, il ne semble pas que la combinaison planétarium-salle de classe produise de résultats significativement supérieurs ou inférieurs, en terme d'apprentissage ou d'attitude, au travail mené en classe seulement ou au planétarium seulement. Un tel résultat mitigé indique sans doute que l'on n'a pas suffisamment étudié les caractéristiques intrinsèques, uniques du planétarium, ni peut-être ne s'est-on suffisamment interrogé sur les stratégies éducatives « gagnantes » sous la voûte du planétarium. C'est du moins la position exprimée par Etheridge (1974), qui écrit : « *[One should] conduct carefully controlled experiment on the variables that are intrinsic within the planetarium.* » (p. 50). Bishop (1980a) est du même avis :

« The finding that classroom methods are equally and sometimes more effective than planetarium methods indicate that planetarium methods which incorporate some of the features of classroom teaching should be developed and tested against traditional planetarium methods. [...] within-planetarium studies – studies which are concerned with specific planetarium variables – should provide more generalizable guidelines for planetarium education. » (Bishop, 1980a, p. 35)

En fait, une question fondamentale avait été posée par Barnes (1969), qui s'interrogeait déjà à propos des études comparatives en général au moment où les premières recherches du genre ont été menées dans les planétariums :

« Might these results indicate that [planetarium] educators need to study further this medium in order to develop programs that accomplish those features of the teaching-learning process which cannot be accomplished as readily by conventional classroom procedures ? » (Barnes, 1969, p. 59)

C'est justement pour tenter de répondre à cette importante question qu'ont été menées les études présentées dans la section suivante.

1.2.4 Le planétarium : lieu d'apprentissage autonome

Une troisième approche en recherche sur les aspects éducatifs du planétarium a consisté à étudier le planétarium en tant qu'outil pédagogique autonome, sans référence à un quelconque travail préliminaire ou complémentaire en classe. Ces études ont surtout cherché à identifier quels aspects intrinsèques d'une séance au planétarium et quelles approches pédagogiques ou d'animation étaient les plus susceptibles d'entraîner un accroissement des connaissances des spectateurs.

L. Pitluga (1968) a été le premier à comparer deux méthodes d'enseignement concurrentes utilisées dans un même planétarium. Il a réparti près de 400 élèves de 5^e année en groupes aléatoires d'environ 60 individus. La moitié des groupes ont assisté à une présentation sous la voûte du planétarium portant sur l'observation des phases de la Lune, suivi d'une session de manipulation de modèles (toujours au planétarium). Dans cette deuxième partie, les élèves, par équipe de deux, manipulaient des boules de styromousse représentant la Terre et la Lune tandis qu'une lampe allumée au centre du théâtre simulait le Soleil. On leur demandait de placer la boule-Lune à l'endroit approprié autour de la boule-Terre pour reproduire une phase donnée, puis de coller l'œil sur la sphère représentant la Terre afin d'avoir le point de vue d'un observateur terrestre.

L'autre moitié des groupes a assisté à la même présentation portant sur l'observation des phases de la Lune, suivie cette fois d'une discussion concernant la position de la Terre, de la Lune et du Soleil dans l'espace. Cette discussion s'accompagnait de la projection sur la voûte de diapositives montrant la position relative des trois astres dans l'espace sous forme de diagramme.

Immédiatement après la séance, les élèves ont répondu à un questionnaire écrit. Ce questionnaire ne portait que sur la vision du système Terre-Lune-Soleil depuis l'espace

(celui illustré par l'activité de manipulation), et non pas sur la vision qu'en a un observateur sur Terre (ce qui était précisément le point de vue simulé par le planétarium). L. Pitluga a découvert que les élèves qui avaient manipulé les modèles ont réussi significativement mieux au test que les autres. Le fait que les élèves qui n'ont pas manipulé de modèles aient eu droit à des présentations sensiblement plus courtes sous la voûte du planétarium y est peut-être pour quelque chose. Il est également possible que la manipulation de modèle ait simplement mieux préparé les élèves qui y ont été exposés à répondre à un questionnaire qui portait justement sur cet aspect du système Terre-Lune-Soleil. Quoi qu'il en soit, ces résultats semblent plaider en faveur de la manipulation de modèles durant la séance au planétarium.

L'étude de Wright (1968) avait pour but de mesurer l'impact du planétarium sur l'acquisition de connaissances par des élèves de 8^e année. Au total, 59 classes intactes ont été réparties au hasard dans quatre groupes de traitement différents. Le premier groupe a subi un test d'évaluation des connaissances avant d'aller au planétarium. Le second groupe a assisté à la présentation au planétarium et a ensuite répondu au questionnaire. Le troisième groupe a suivi une session spéciale offerte par l'enseignant visant à préparer la visite au planétarium, a assisté à la présentation sous la voûte et a ensuite participé à une activité de suivi avant de répondre au questionnaire. Le dernier groupe, enfin, a subi le même traitement que le troisième, à la seule différence que la préparation à la visite était sous la responsabilité de l'animateur du planétarium, et non de l'enseignant. La présentation au planétarium était préenregistrée afin d'assurer l'uniformité du traitement des quatre groupes. Le questionnaire, conçu par la chercheuse, comprenait 80 questions de type « vrai ou faux » faisant surtout appel à des connaissances de base en astronomie.

Wright a découvert que le groupe qui avait répondu au questionnaire après avoir assisté à la présentation au planétarium avait mieux réussi que celui qui y avait répondu avant le visionnement. La chercheuse conclut que le planétarium est un outil d'enseignement efficace et que même une courte visite peut provoquer des apprentissages chez les spectateurs. Par contre, contrairement à ce que Ridky (1975) allait démontrer plus tard, rien n'indique dans cette étude la supériorité du recours aux sessions de préparation

(démystification), que ces dernières soient présentées par l'enseignant ou par l'animateur du planétarium.

En 1971, Yee, Baer & Holt ont publié une monographie (Yee, Baer & Holt, 1971) dans laquelle ils rendent compte de leur évaluation de l'efficacité éducative d'une visite dans un planétarium par des élèves de 5^e année de la région de Madison (Wisconsin), aux États-Unis. Reconnaissant le fait qu'il est rare que les classes se rendent plus d'une fois par année au Planétarium pour assister à une relativement courte séance sous la voûte du planétarium (environ une heure en moyenne), les auteurs se sont donc intéressés à l'impact d'une courte visite une fois l'an sur les apprentissages des élèves.

Au total, 74 classes d'élèves de 5^e année ont été évalués selon un protocole quasi-expérimental utilisant un post-test unique administré tout de suite après la visite au planétarium puis à nouveau deux à trois semaines plus tard. Les classes ont été réparties au hasard dans le groupe traitement et le groupe contrôle. Le groupe traitement a répondu au test après avoir assisté à une séance sous la voûte du planétarium tandis que le groupe contrôle a répondu au même questionnaire avant d'effectuer la visite. Les chercheurs ont porté une attention toute particulière au profil socioéconomique des classes afin de s'assurer qu'il était comparable entre les deux groupes. Ils ont également noté le moment de la journée où avait lieu la visite et l'évaluation, de même que le niveau de préparation préalable offert en classe par les enseignants. Selon les chercheurs, l'effet de maturation des élèves dû au test lui-même et au vieillissement des enfants est négligeable, compte tenu de la courte durée de l'étude (moins de deux mois) et du fait que les élèves ne savaient pas qu'ils participaient à une étude scientifique, le test leur ayant été présenté comme une activité d'évaluation scolaire comme les autres. Dans tous les cas, c'est la moyenne de la classe qui a fait l'objet de la comparaison statistique entre les groupes, et non les résultats individuels de chaque élève.

La présentation sous la voûte du planétarium couvrait un grand nombre de thèmes et de notions en astronomie, de la présentation générale des équipements présents sous la voûte jusqu'au concept de magnitude des étoiles, en passant par les constellations, l'étoile

polaire et le concept d'année-lumière. Le test consistait en 45 questions à choix multiples, 30 à propos de notions et de concepts présentés lors du spectacle et 15 concernant l'attitude et la motivation des élèves en lien avec la séance. Parmi les questions concernant les notions astronomiques, environ la moitié faisaient appel à la mémoire et à la mémorisation de faits, tandis que l'autre moitié exigeaient une réflexion plus approfondie de la part des répondants.

Les résultats montrent un gain appréciable du groupe traitement par rapport au groupe contrôle en ce qui concerne les savoirs acquis et les réponses aux questions demandant plus de réflexion de la part des élèves. Le contraste entre les garçons et les filles montre que ces dernières ont bien répondu aux questions de connaissances, mais moins bien que les garçons aux questions demandant réflexion. Les chercheurs ont de plus constaté une forte corrélation entre une situation socioéconomique favorable et les bons résultats au test. Enfin, les élèves dont les enseignants avaient profité de la visite imminente au planétarium pour les préparer en abordant des thèmes astronomiques en classe ont significativement mieux réussi que ceux dont la visite au Planétarium constituait le début d'une séquence d'enseignement en astronomie. Pour ce qui est du second test administré deux à trois semaines plus tard, le résultat montre une bonne rétention des connaissances de la part des élèves. Règle générale, donc, les auteurs reconnaissent les avantages éducatifs d'une visite au planétarium :

« [...] the treatment may be considered educationally effective. In other words, the planetarium experience had a positive effect on learning and understanding of astronomy in line with its objectives. » (Yee, Baer & Holt, 1971, p. 10)

En ce qui concerne les attitudes et la motivation, aucune différence significative n'est apparue entre les groupes. Les chercheurs expliquent cette absence par le fait que les classes du groupe contrôle savaient qu'ils iraient au planétarium plus tard dans l'année, ce qui a peut-être augmenté leur intérêt et leur motivation au même niveau que les classes qui venaient d'assister à une séance. Enfin, les auteurs ont constaté une forte corrélation entre les réponses correctes aux questions de connaissances et celles demandant réflexion, mais

aucune corrélation entre ces dernières et la mesure de l'attitude et de la motivation, ce qui amène les chercheurs à conclure que « *a child's achievement does not tell how he might feel about astronomy* » (Yee, Baer & Holt, 1971, p. 13).

Akey (1973) s'est intéressé à l'apprentissage et à la compréhension de concepts astronomiques par divers groupes d'élèves de 2^e année à qui l'on a présenté l'un ou l'autre de trois spectacles différents sous la voûte d'un planétarium (« Introduction au ciel étoilé », « La Terre » et « La famille solaire »). À l'aide d'un prétest, d'un post-test administré immédiatement après la séance et à nouveau deux semaines plus tard, Akey a pu constater que les élèves connaissaient, avant d'assister à l'un ou l'autre des spectacles, en moyenne 39 des 56 concepts astronomiques visés par le programme. Les résultats du post-test indiquent une compréhension accrue de ces mêmes concepts immédiatement après une séance, peu importe le spectacle visionné. Le nombre de concepts effectivement retenus par les élèves après deux semaines était passé à 52 sur 56. Notons cependant que de nombreuses heures d'enseignement hors planétarium consacrées à l'étude de ces concepts expliquent probablement à elles seules une bonne partie de ces résultats.

Mallon (1974) s'est intéressé à l'impact de la présence physique du présentateur sous la voûte du planétarium sur des élèves de 2^e année. Il a pour cela réalisé deux présentations tout à fait identiques (contenu, durée, images, etc.) portant sur les constellations, à la seule exception que l'une était préenregistrée et l'autre commentée en direct par le présentateur. Dans aucun cas, les questions ou remarques de la part des spectateurs n'étaient prises en compte ou ne recevaient de réponse. Les élèves participant à l'étude ont été répartis au hasard entre les deux groupes de traitement et ont dû répondre à un prétest et un post-test portant sur leurs connaissances à propos des constellations. Les élèves du groupe ayant bénéficié de la présence physique du présentateur ont significativement mieux réussi que les autres, ce qui souligne l'importance de la présence d'un animateur dans la salle de même que la relative inefficacité des présentations préenregistrées, du moins en ce qui concerne les représentations scolaires.

Reed (1975) a tenté de mesurer la valeur affective rattachée au planétarium par des étudiants de niveau *College* inscrits à un cours d'astronomie et un cours de physique. À l'aide d'un questionnaire d'opinion contenant huit questions, il a sondé 112 étudiants inscrits à un cours d'astronomie et 146 autres inscrits à un cours de physique. Notons que la description du cours d'astronomie contenait une référence explicite au fait que le cours se déroulerait en partie sous la voûte du planétarium. L'auteur a cherché à savoir quelle importance la présence du planétarium dans le syllabus du cours a eu dans le choix de s'y inscrire ou non.

Il s'avère que le planétarium a été un élément important dans le choix de plus des deux tiers des étudiants inscrits au cours d'astronomie. L'auteur en conclut que le planétarium présente un grand intérêt pour ces élèves et possède un pouvoir de motivation important. L'auteur rapporte également que le cours d'astronomie, auquel le nombre d'inscription est limité, est le premier cours de science à atteindre la pleine capacité d'inscription au début de chaque semestre. De plus, 16 % des étudiants sondés lors de l'étude s'étaient inscrits à ce cours en dehors de leur cheminement normal; ils suivaient le cours sachant très bien que les quatre crédits alloués ne compteraient pas pour l'obtention de leur diplôme.

Ridky (1975) a cherché à mesurer plus précisément l'aura de mystère (*the mystique effect*, dans ses propres termes) qu'il a mise en évidence dans une étude précédente (Ridky, 1973). Selon lui, la nouveauté du lieu et les multiples questions qu'il fait naître dans l'esprit des jeunes les empêcheraient de se concentrer véritablement sur les thèmes et les concepts abordés au cours de la représentation. Pour vérifier son hypothèse, Ridky a réparti au hasard 46 élèves de 8^e année en deux groupes de 20 et 26 élèves respectivement. Les deux groupes ont d'abord répondu à un prétest portant sur leurs connaissances préalables à propos du mouvement diurne du ciel. Il se sont ensuite rendu au planétarium à deux moments différents pour assister à un spectacle identique préenregistré portant sur ce thème. Dans le cas du groupe traitement, la présentation était précédée d'une session de démystification dans le théâtre où le fonctionnement du projecteur ainsi que les

caractéristiques physiques de la salle et du dôme ont été exposés. Le même questionnaire a été à nouveau soumis aux deux groupes lors d'un post-test.

Les résultats montrent effectivement un gain significativement plus important pour le groupe qui a bénéficié de la session de démystification avant la présentation du spectacle, confirmant l'existence de l'aura de mystère qui, pour bien des spectateurs, entoure le planétarium et ses équipements¹⁸. Ridky en conclut que :

« The implication to be drawn from this study is that if a planetarium experience is contemplated, the teacher needs to provide for an orientation session or schedule a number of sessions in the planetarium before content objectives can successfully be taught. » (Ridky, 1975, p. 508)¹⁹

Reed (1976) a publié le compte-rendu de ses travaux concernant l'apprentissage du concept de mouvement diurne de la Terre (l'alternance du jour et de la nuit) par des élèves de 1^e année. Se basant sur les travaux de Bruner et Piaget concernant l'apprentissage de

¹⁸ Les travaux de Cohen (2001) ayant montré l'importance des représentations des visiteurs concernant le musée de science en tant que tel dans leur appréciation d'une visite scolaire au musée, il nous apparaît judicieux de débiter toute séquence didactique par une activité ayant pour but d'amener les enfants à exprimer leurs conceptions concernant le planétarium lui-même. Par exemple, une activité de bricolage leur permettra de démystifier le fonctionnement du projecteur d'étoiles et de certains autres équipements qui seront mis à contribution lors du visionnement du spectacle. Cette familiarisation des visiteurs avec les équipements devrait permettre de diminuer l'impact « négatif » de la nouveauté sur les apprentissages.

¹⁹ Akey (1973) arrivait à une conclusion similaire dans le cadre d'une séance destinée à des élèves de 2^e année : *« Since the second grade is the first exposure to the planetarium, the reaction of these students to a new situation is an important consideration. Therefore, a great deal of learning should not be expected to occur because of the excitement of the first planetarium experience. »* (Akey, 1973, p. 71)

concepts scientifiques par des enfants de ce groupe d'âge, Reed a conçu une séquence d'enseignement se déroulant en une séance de planétarium, sollicitant la participation active des élèves et utilisant divers objets pour illustrer le concept (un tabouret pivotant, une lampe de poche et un globe terrestre). Il est à noter que l'auteur signale les conceptions les plus fréquentes exprimées par des élèves de cet âge à propos de l'alternance du jour et de la nuit, mais n'y fait pas référence explicitement dans sa séquence d'enseignement. Un total de 207 élèves (10 classes) provenant de deux écoles ont participé à l'étude. Chaque classe a eu droit à une séance individuelle animée par le chercheur lui-même.

Afin de mesurer les apprentissages des élèves, le chercheur a conçu un questionnaire simple qui demandait aux enfants de noircir le côté nuit de la Terre selon sa position par rapport au Soleil, ou encore de dessiner la position du Soleil par rapport à la Terre selon le côté de la planète plongé dans l'ombre. Le questionnaire a été soumis aux élèves comme prétest quelques semaines avant la visite.

L'analyse des résultats du post-test indique une amélioration notable des bonnes réponses pour une des deux écoles (67,4 % des élèves ont répondu correctement à toutes les questions), mais une régression plus importante encore pour la seconde école (seulement 25,6 % des élèves ont obtenu un pointage parfait). L'auteur rappelle qu'un élève n'avait qu'une chance sur seize d'obtenir un pointage parfait en répondant au hasard. Reed explique ces résultats *a posteriori* par des différences socioéconomiques importantes entre les deux écoles : celle où les élèves ont obtenu de meilleurs résultats est située dans un milieu plus aisé. De plus, ces mêmes élèves ont bénéficié d'un enseignement des sciences plus approfondi que ceux de l'autre école.

Reed se dit tout de même déçu des résultats, qu'il espérait plus probants. Il soupçonne que le planétarium n'est peut-être pas le meilleur endroit pour enseigner le concept de jour et nuit (Sonntag (1982) arrive à une conclusion similaire pour des élèves plus âgés), et que ce concept a peut-être besoin qu'on y revienne souvent, sous diverses formes, afin que les élèves parviennent à le maîtriser. Le planétarium pourrait alors être l'un des endroits où ce concept est présenté aux enfants, mais pas le seul.

Cottrill (1976) s'est intéressé aux connaissances de base acquises par des élèves de classes de 4^e année à qui l'on a enseigné des concepts en astronomie sous la voûte d'un planétarium selon deux approches qu'il désigne comme l'approche directe et l'approche indirecte. Dans l'approche directe (*show and tell*), l'animateur présentait les concepts de façon purement magistrale, décourageant toute forme d'initiative, de questionnement ou de réponse de la part des élèves. Ses seules interventions directes auprès des élèves ne visaient qu'à faire respecter la discipline durant la séance. L'approche indirecte (*ask and do*), au contraire, invitait les élèves à participer de façon active à la présentation. Leurs questions, commentaires et réponses aux questions de l'animateur étaient les bienvenues, encouragées et reconnues de façon positive.

Dix-huit classes intactes de 4^e années issues de huit écoles élémentaires (510 élèves au total) ont été réparties au hasard en deux groupes, neuf classes assistant à trois présentations de 45 minutes chacune utilisant l'approche directe et les neuf autres assistant à trois présentations de même durée utilisant l'approche indirecte. Les thèmes abordés dans ces trois représentations étaient les mêmes pour les deux approches, thèmes imposés par le programme scolaire obligatoire en vigueur pour la 4^e année. Il est à noter que la plupart de ces élèves en étaient au moins à leur seconde visite dans un planétarium depuis leur entrée en classe maternelle.

Les apprentissages des élèves ont été évalués en comparant leurs réponses à trois prétests administrés avant les séances de planétarium (un prétest par séance) ainsi qu'à trois post-tests portant sur les mêmes thèmes et administrés après les visites. Les vingt questions de chacun des trois post-tests étaient les mêmes que celles des trois prétests; seul l'ordre de présentation (aléatoire dans tous les cas) était différent.

Des tests statistiques ont permis au chercheur de constater que les élèves des dix-huit classes ont mieux répondu aux questions des post-tests qu'à celles des prétests, peu importe qu'ils aient assisté à une séance « directe » ou « indirecte ». Mais dans sa conclusion, l'auteur reconnaît que les gains (différence entre les moyennes des prétests et des post-tests pour chaque classe) ne sont pas très élevés.

Il est de plus impossible d'affirmer que ces gains sont dus uniquement à la séance de planétarium et non en partie à l'influence du prétest, puisque le chercheur n'a pas utilisé de groupe contrôle qui aurait répondu aux pré- et post-tests sans assister à une séance sous la voûte du planétarium. D'autres analyses ne montrent aucune différence significative entre les groupes en ce qui concerne l'influence de la présentation directe ou indirecte. Ces deux approches n'ont donc pas pu être départagées dans les limites de cette étude.

L'auteur reconnaît toutefois que les questions posées aux élèves ne mesuraient que des connaissances de base qui, pour la plupart, ne font appel qu'à la mémoire et ne mesurent donc pas leur niveau de compréhension des phénomènes étudiés. Des questions à propos de concepts plus abstraits ou faisant appel à leurs capacités de raisonnement auraient, selon lui, permis de mieux départager les deux approches (directe et indirecte). L'auteur remet également en question la procédure consistant à soumettre des élèves de 4^e année à un test écrit, puisque rien n'assure que les élèves comprennent bien le libellé des questions. Il suggère plutôt d'effectuer un *Sky Test* (Dean & Lauck, 1972) au cours duquel les élèves répondent aux questions posées verbalement par l'animateur sous la voûte du planétarium ou sous le vrai ciel.

Etheridge (1976) a lui aussi comparé deux modes de présentation dans un planétarium, insistant cette fois sur l'aspect visuel du médium. Utilisant le même commentaire préenregistré, il a soumis deux groupes d'étudiants de niveau *College* à deux présentations visuelles très différentes. Pour un premier groupe, le chercheur a utilisé le projecteur d'étoiles pour simuler la voûte étoilée. Pour le second groupe, il a plutôt utilisé des projections de diapositives montrant un diagramme de la même voûte céleste qui avait été présentée au premier groupe. Un post-test administré immédiatement après les séances n'a montré aucune différence entre les groupes en ce qui concerne l'acquisition de connaissances en astronomie.

Par contre, ce même chercheur a pu mettre en évidence un lien entre les capacités de projection et d'orientation spatiales et les résultats au post-test. Selon ses résultats, les

élèves qui ont déjà une forte capacité à percevoir une situation de deux points de vue différents bénéficient davantage de l'enseignement au planétarium que les autres.

Fletcher (1977; voir aussi Friedman et al., 1981) a comparé un programme de planétarium participatif (Friedman, 1975; Friedman et al., 1976) conçu en 1972 par le Planétarium Holt du *Lawrence Hall of Science* de Berkeley, en Californie (Friedman, 1993) avec un autre programme de facture plus traditionnelle (présentation magistrale). Les deux spectacles, d'une durée de 50 minutes, abordaient les mêmes thèmes (Stonehenge, le mouvement apparent diurne du Soleil et le phénomène des saisons) et utilisaient le même scénario. Les mêmes images diapositives étaient utilisées dans les deux cas. La différence venait du fait que, dans le programme du Planétarium Holt, l'animateur suscitait la participation active des spectateurs pour prévoir la position du lever et du coucher du Soleil à différents moments de l'année en fixant des marqueurs aux endroits appropriés à la base du dôme.

Trente-deux classes intactes d'élèves de 8^e année réparties au hasard en deux groupes de traitement ont assisté à l'un ou l'autre de ces spectacles, présentés par huit animateurs différents dans autant de planétariums répartis dans plusieurs états des États-Unis. Il est à noter que le chercheur n'a pas assisté aux représentations et ne peut donc assurer l'uniformité du traitement pour tous les groupes. Un questionnaire comportant 20 questions (8 questions conceptuelles et 12 questions faisant appel à la mémoire) administré après la représentation interrogeait les élèves sur leurs connaissances et leur appréciation du spectacle. Le même test leur a également été administré quatre semaines plus tard.

Aucune différence significative entre les deux groupes de traitement n'a pu être mise en évidence, ni à court, ni à moyen terme. Fletcher a par contre découvert que l'animateur avait un impact majeur sur l'appréciation du spectacle et la rétention des messages, davantage en fait que l'une ou l'autre des approches préconisées dans les deux spectacles. En particulier, les résultats des élèves étaient significativement plus élevés si l'animateur en était à sa seconde prestation, ce qui semble souligner l'importance de la

formation et de l'expérience des animateurs de planétarium dans le contexte de spectacles scolaires.

Schafer (1977) s'est interrogé sur les préférences du public entre des spectacles de type participatifs – comme celui évalué par Fletcher (1977) – et des présentations multimédia plus « magistrales ». Les résultats sont les suivants : 48 % préfèrent les programmes participatifs, 21 % les présentations multimédias et 31 % leur accordent leur préférence à part égale. De ceux qui préfèrent les programmes participatifs, 34 % ont affirmé qu'ils apprenaient davantage dans ce type de spectacle et 31% ont dit que l'aspect de participation du public leur plaisait. Il est clair que les spectacles participatifs constituent pour le public une façon agréable d'apprendre. Malheureusement, cette étude n'a pas cherché à mesurer la rétention des connaissances.

Wooten (1979) a évalué l'impact de la trame sonore des spectacles scolaires sur les apprentissages réalisés par des spectateurs de 5^e et 6^e années de même que sur leur évaluation de la qualité de la représentation. Aucune différence notable n'a pu être observée entre des spectacles avec et sans musique.

Mallon (1980; Mallon & Bruce, 1982) a comparé expérimentalement deux approches pédagogiques dans un planétarium : la présentation magistrale et l'approche participative. Dans cette dernière approche, on privilégie la réalisation d'activités concrètes sous la voûte du planétarium et l'on favorise de nombreux échanges verbaux entre les spectateurs et l'animateur.

Le chercheur a choisi deux programmes de planétarium déjà existant et traitant des constellations, l'un magistral et l'autre plus participatif. Le spectacle plus traditionnel était préenregistré tandis que le spectacle plus participatif a été présenté par cinq personnes différentes. Mallon a sélectionné au hasard 556 élèves de la 3^e à la 5^e année qui ont assisté à l'une ou l'autre des représentations sous la voûte de cinq planétariums de taille moyenne (moins de 100 places).

Les mesures ont été effectuées à l'aide de questionnaires (prétest et post-test) utilisant une échelle de Likert et interrogeant les spectateurs sur leurs connaissances et leurs opinions en astronomie. Le chercheur a pris la peine de valider son questionnaire écrit en interrogeant quelques élèves directement sous la voûte d'un planétarium, afin de s'assurer que les résultats aux tests écrits étaient bien corrélés aux résultats d'une interrogation verbale sous le ciel étoilé.

Le traitement statistique des résultats montre que le programme privilégiant une approche participative donne de meilleurs résultats que l'approche traditionnelle pour ce qui est de l'acquisition de connaissances. Les résultats concernant l'attitude par rapport aux sciences et à l'astronomie sont statistiquement moins significatifs (à cause de la petite taille de certains sous-groupes) mais donnent tout de même un léger avantage au programme participatif. Le chercheur conclut : « *Utilizing an activity based format and extensive verbal interaction is clearly the most effective utilization of a small planetarium facility for teaching.* » (Mallon, 1980, p. 77-78)

Dans son étude portant sur l'impact des médiateurs d'apprentissages (*mediators of learning*), soient l'échafaudage et le regroupement des concepts (*advanced organizers* et *clustering*) sur l'apprentissage dans un planétarium, Giles (1981; Giles & Bell, 1982) a réparti trente-six classes intactes d'élèves de la fin du secondaire (832 élèves au total) en quatre groupes. Les classes étaient réparties selon leur rendement scolaire. Ainsi, chacun des quatre groupes comportait trois sous-groupes de rendement scolaire élevé, trois de rendement scolaire moyen et trois de rendement scolaire faible.

Un groupe contrôle a reçu un enseignement sous la voûte du planétarium sans recours aux médiateurs d'apprentissage; un premier groupe traitement a suivi le même programme, mais avec l'aide de l'échafaudage; un second groupe traitement a bénéficié du regroupement des concepts; enfin, le troisième groupe traitement a bénéficié des deux types de médiateurs d'apprentissage. Le même enseignant a présenté le programme à tous les groupes sans exception.

Giles a conçu lui-même le questionnaire d'évaluation qu'il a validé dans le cadre d'une étude préliminaire. Ce questionnaire a été soumis aux élèves avant la visite, puis immédiatement après. La comparaison des résultats de chacun des groupes montre que les élèves qui ont bénéficié de tous les types de médiateurs d'apprentissage ont obtenu des résultats supérieurs à ceux des trois autres groupes. De la même manière, les groupes qui ont bénéficié soit de l'échafaudage, soit du regroupement des concepts ont mieux réussi que le groupe témoin. Le chercheur n'a découvert aucune différence significative entre les résultats des élèves de rendement scolaire élevé et moyen, mais a constaté une différence significative entre ces deux sous-groupes et les élèves de rendement scolaire faible. Par contre, les élèves de rendement scolaire faible faisant partie des trois groupes traitement ont obtenu des résultats comparables aux élèves de rendement scolaire élevé faisant partie du groupe témoin.

Selon Giles (1981), ces résultats démontrent que l'utilisation répétée de différents médiateurs d'apprentissage dans le cadre d'un spectacle de planétarium augmente de façon significative l'apprentissage par les spectateurs. L'échafaudage et le regroupement des concepts aident les élèves à s'approprier des concepts en astronomie.

Johnston (1981) a comparé deux approches différentes en ce qui concerne l'utilisation du planétarium à des fins éducatives : la présentation magistrale traditionnelle et une seconde approche que l'on pourrait qualifier de « découverte guidée ». Le but de cette étude était de déterminer laquelle de ces deux approches favorisait des apprentissages en astronomie et le développement d'une attitude positive des spectateurs par rapport à l'école, le planétarium et l'astronomie en général.

Johnston a étudié douze classes d'élèves de 5^e année qui ont visité le planétarium durant les heures normales de classe. Les classes ont été réparties en deux groupes, chacun assistant à une séance de planétarium selon l'une des deux approches décrites plus haut. La comparaison des réponses à un prétest et un post-test utilisant des diapositives projetées en classe plutôt que sous le dôme du planétarium n'a montré aucune différence significative entre les deux approches en ce qui concerne l'acquisition de connaissances ou le

développement d'attitudes positives. On doit sans doute voir dans ces résultats l'illustration de la difficulté qu'ont les élèves à transférer des connaissances acquises dans un contexte particulier (la voûte du planétarium) à un autre contexte (des diapositives en classe) (Dean & Lauck, 1972).

Edoff (1982) a lui aussi voulu comparer deux approches éducatives différentes au planétarium. L'une de ces approches incluait des manipulations directes de la part des spectateurs sous la voûte du planétarium, tandis que l'autre n'en prévoyait aucune. Le but était de déterminer quelle approche était la plus efficace pour augmenter la réussite scolaire en astronomie et améliorer l'attitude des élèves par rapport à cette science.

Pour ce faire, le chercheur a étudié au total 542 élèves de 5^e et de 8^e années. Les élèves ont d'abord été répartis au hasard en trois groupes : un groupe traitement à qui l'on a présenté trois sessions dans le planétarium abordant les thèmes de la sphère céleste, la mesure du temps, les saisons ainsi que les phases et les mouvements de la Lune. Pour ce groupe, les spectacles incluaient le marquage par les spectateurs de diverses positions du Soleil et de la Lune sur un hémisphère de plastique transparent représentant la voûte céleste. Un second groupe (témoin) a lui aussi assisté aux mêmes spectacles, mais les manipulations ont plutôt été remplacées par des interactions verbales avec les spectateurs à qui l'on demandait de pointer du doigt en direction d'images projetées sur le dôme et représentant diverses situations significatives. Un troisième groupe, enfin, n'a assisté à aucun spectacle.

Les élèves des trois groupes ont été soumis à trois post-tests immédiatement après la représentation et à nouveau trois semaines plus tard. Chaque test comportait des questions faisant appel à la mémoire, d'autres demandant d'appliquer des concepts, et d'autres enfin évaluant le sens de l'observation et de l'orientation des élèves. Les deux groupes ayant assisté aux représentations dans le théâtre ont de plus été soumis à un questionnaire d'opinion concernant leur attitude par rapport à l'astronomie.

Le chercheur a découvert que l'inclusion de manipulations directes dans le théâtre au cours d'une représentation améliorerait grandement la compréhension de phénomènes comme les phases et les mouvements de la Lune et augmentait le niveau de connaissances des spectateurs, autant à court qu'à moyen terme. Les élèves qui ont assisté au spectacle « manipulatoire » ont démontré par la suite une plus grande facilité à se remémorer des informations pertinentes et à appliquer ces concepts à d'autres situations. Par contre, l'attitude vis-à-vis de l'astronomie n'a pas évolué de manière significative pour aucun des deux groupes expérimentaux. Comme d'autres avant lui, le chercheur a également constaté qu'une session de démystification du planétarium et de ses équipements améliore la compréhension des concepts par les spectateurs.

Baxter & Preece (2000) ont étudié l'impact sur l'apprentissage de notions en astronomie de deux types de planétarium, un mini théâtre muni d'un dôme mesurant deux mètres de diamètre et équipé de tous les projecteurs nécessaires pour reproduire l'apparence et les mouvements de la voûte céleste, et un logiciel d'astronomie qui reproduit à l'écran d'un ordinateur l'apparence et les mouvements du ciel de jour comme de nuit. Les sujets de l'étude étaient un groupe de 48 élèves âgés de 9 et 10 ans de même que 26 étudiants universitaires suivant une formation pour devenir enseignants. Les notions astronomiques abordées traitaient du mouvement diurne du Soleil et de la voûte céleste, de la rotation de la Terre et de l'aspect du ciel vu de la Terre.

La recherche a eu lieu au cours d'une « foire des sciences » qui s'est tenue à l'Université d'Exeter, en Angleterre, et à laquelle étaient conviés plusieurs classes d'écoles primaires des environs. De nombreuses activités scientifiques leur étaient offertes, dont un atelier sur la chimie culinaire et deux autres portant sur l'astronomie, un sous la voûte du mini-planétarium et l'autre devant quelques ordinateurs. Les chercheurs ont évalué l'impact éducatif de la séance sous la voûte du mini-planétarium de même que l'utilisation par les élèves du logiciel d'astronomie. L'activité était supervisée par les 26 futurs enseignants.

Au début de la journée, tous les élèves et les futurs enseignants ont complété un questionnaire (le prétest) puis les élèves ont été répartis au hasard en sous-groupes qui ont

passé environ une heure à chaque station d'activité. Les futurs enseignants ont animé les deux stations d'astronomie de même que les autres stations abordant des thèmes non astronomiques. Bien sûr, les élèves qui ont assisté à la présentation sous la voûte du planétarium ou qui ont utilisé le logiciel d'astronomie ont répondu au post-test avant de suivre l'autre activité d'astronomie, permettant la comparaison des acquis des deux groupes. Les futurs enseignants ont répondu au post-test à la fin de l'exercice. Dans ce cas, la comparaison a eu lieu entre les futurs enseignants qui avaient animé les ateliers d'astronomie et ceux qui avaient animé des ateliers non astronomiques.

L'analyse statistique des résultats n'a montré aucune différence significative entre les deux traitements : les élèves qui ont utilisé le logiciel d'astronomie ont autant amélioré leurs connaissances des sujets traités que ceux qui ont assisté à la séance de planétarium. Par contre, les élèves féminins ont amélioré leurs connaissances de manière significativement plus importante que les garçons, chez qui on a même constaté une diminution de la moyenne des réponses au post-test. Alors que les filles avaient de moins bons résultats que les garçons au prétest, la situation s'était inversée après le traitement. Pour les futurs enseignants, la comparaison des résultats du pré- et du post-test a aussi montré une amélioration significative et très importante de leur compréhension des sujets abordés lors des ateliers, planétarium et ordinateur confondus, par rapport à leurs collègues qui ont animé les ateliers non astronomiques.

De l'aveu même de Baxter & Preece (2000), le résultat de leur étude concernant les élèves est surprenant et intrigant, en particulier le fait que les filles se soient autant démarqué des garçons. Cela suggère, comme le fait remarquer Bishop (1980a), que le planétarium est peut-être un outil très important pour permettre aux filles de combler l'écart que l'on constate souvent entre elles et les garçons dans les capacités de projection et d'orientation spatiales (Linn & Petersen, 1985; Hacker, 1986), capacités essentielles pour comprendre de nombreux phénomènes astronomiques. Quant aux futurs enseignants, l'amélioration de leurs résultats est moins surprenante et montre bien que de devoir

préparer et diriger un atelier sur un sujet que l'on ne maîtrise pas est souvent le meilleur moyen de se l'approprier. Comme le soulignent Baxter & Preece (2000) :

« We suggest that this indicates the value of combining the incentives to learn induced by having to teach a difficult topic with the support and guidance provided by a tutor with appropriate expertise. » (Baxter & Preece, 2000, p. 68)

Summers (2001) a évalué l'impact d'un spectacle de planétarium sur des élèves de 4^e année et de l'équivalent étasunien de la 1^e année du secondaire dans le cadre d'une visite incluant également la visite d'un laboratoire de science, un film IMAX et une visite guidée d'un musée de science. Le spectacle de planétarium incluait une partie interactive commentée en direct par un animateur de même qu'une partie préenregistrée utilisant les capacités immersives d'un système de projection vidéo pleine voûte. Au total, 438 élèves de 4^e année provenant de milieux défavorisés et 96 élèves de la 1^e année du secondaire provenant d'une école de milieu plus aisé ont fait l'objet de l'étude.

Une combinaison d'un prétest (45 questions à choix multiples au primaire, 70 au secondaire) administré dans les semaines précédant la visite et d'un post-test (les mêmes questions) administré durant la semaine suivant la visite a permis à la chercheuse de conclure que la visite du planétarium se traduisait par des gains cognitifs significatifs dans tous les domaines évalués (connaissances, concepts et applications des concepts). Les gains, qui ne dépendaient ni du sexe du répondant ni d'expériences préalables dans un planétarium, ont été les plus élevés dans les domaines où les élèves avaient le moins bien répondu lors du prétest. La chercheuse a également constaté que la visite du musée et de ses diverses composantes a provoqué une hausse significative de l'intérêt des élèves pour les sciences en général; en particulier, l'intérêt démontré par les élèves pour les livres de vulgarisation scientifique disponibles à la bibliothèque de l'école a plus que doublé suite à la visite.

Dans une étude qui n'est pas sans rappeler celle de L. Pitluga (1968), Rusk (2003) a évalué l'impact d'une démonstration de type *hands on* suivant immédiatement un spectacle

scolaire à propos de la Lune. Soixante-quatre classes intactes d'élèves de 5^e année (près de 1 900 élèves au total) ont été réparties en deux groupes et appariées pour former trente-deux paires. Les deux groupes formant chaque paire ont d'abord assisté ensemble à une représentation d'un spectacle de planétarium expliquant un certain nombre de phénomènes à propos de la Lune (l'illusion lunaire, les phases de la Lune, les marées, etc.).

Après la représentation, un des deux groupes (témoin) s'est rendu dans une salle attenante au théâtre où l'on a proposé aux élèves de répondre à un questionnaire pour évaluer leurs connaissances à propos de la Lune. Pendant ce temps, le second groupe est demeuré dans le théâtre et a participé à une activité consistant à simuler le phénomène des phases de la Lune en manipulant des boules blanches montées sur un manche représentant la Lune tandis qu'une puissante lampe située au centre du théâtre simulait le Soleil (la tête des élèves représentait la Terre). Cette activité renforçait l'explication des phases de la Lune donnée dans le spectacle. Le chercheur souligne qu'une telle activité est plus difficile à mener en classe, où il est souvent impossible d'obtenir un niveau de noirceur adéquat.

À la fin de l'activité de manipulation, les deux groupes ont inversé les rôles : le groupe test s'est rendu dans la salle attenante pour répondre au questionnaire tandis que le groupe témoin participait dans le théâtre à l'activité de manipulation. L'instrument de mesure comportait quatorze questions à choix de réponse. Certaines questions faisaient uniquement appel à la mémoire tandis que d'autres demandaient un niveau de raisonnement plus élevé. Dans la majorité des cas, les choix de réponses reprenaient des conceptions fréquentes exprimées par des élèves de ce groupe d'âge, utilisés comme éléments distrayeurs.

L'analyse des résultats a montré que les moyennes des notes des groupes ayant assisté à la démonstration après le spectacle avant de répondre au questionnaire étaient près de 20 % supérieures à celles des groupes qui ont répondu au questionnaire avant de participer à la session de manipulation. Les résultats montrent sans équivoque que la session de manipulation renforce ce que les élèves ont appris en assistant au spectacle de planétarium. On ne sait cependant pas si la simple manipulation des modèles,

indépendamment de la séance au planétarium, aurait donné d'aussi bons résultats, quoi qu'il est souvent difficile de trouver à l'école un local adéquatement sombre pour ce genre d'exercice, ce qui n'est bien sûr pas le cas du planétarium, où le noir est très profond. Quoiqu'il en soit, le chercheur a remarqué que les gains les plus importants ont été le fait de classes provenant d'écoles situées en milieu défavorisé. Rusk (2003) conclut en rappelant deux faits essentiels :

« The planetarium experience has been shown by previous researchers to be a valuable learning environment. The data presented in this study, however, show that whenever possible, planetarium should provide students with live science demonstrations in addition to the planetarium program itself. This study also reinforce the idea that the planetarium is a unique resource for school districts, providing students with learning and laboratory experiences that cannot be obtained in most classrooms. » (Rusk, 2003, p. 6)

Dans son étude, Plummer (2009) a interrogé des élèves de 1^e et 2^e année à propos de leurs conceptions des mouvements de la voûte céleste (mouvements diurne, mensuel et annuel du Soleil, de la Lune et des étoiles) avant et après une séance éducative d'une durée de 45 minutes sous le dôme d'un petit planétarium situé dans un musée d'histoire naturelle (*University of Michigan's Exhibit Museum*). La séance incluait de nombreuses occasions où les élèves étaient invités à mimer le mouvement des corps célestes en étendant leurs bras vers le ciel et en tournant sur eux-mêmes dans la même direction que le Soleil, la Lune ou les étoiles. À d'autres occasions, les élèves étaient invités à pointer vers la direction où, selon eux, le Soleil se lèverait ou la Lune devrait se trouver, selon le scénario du moment. Il s'agissait en fait d'un enseignement kinesthésique, qui favorise l'apprentissage des concepts visés par le biais des mouvements du propre corps de l'apprenant (Bishop, 1988).

Les entrevues pré- et post-traitement ont été menées sous un dôme d'un mètre vingt de diamètre (un gros parapluie, en quelque sorte) ressemblant au planétarium où avait eu lieu le traitement. L'auteure a demandé aux élèves d'illustrer leur compréhension des mouvements des corps célestes sur ce plus petit dôme à l'aide d'une lampe de poche. Les dialogues ont été enregistrés et les mouvements que les élèves ont illustré à l'aide de la lampe de poche ont été notés par la chercheuse sur un plan du dôme. Ces données

qualitatives ont ensuite été cotées en quatorze catégories représentant les divers phénomènes célestes à l'étude (mouvement diurne du Soleil, de la voûte céleste, de la Lune, etc.) et notées de 1 à 3 en fonction du caractère scientifique ou non de la réponse de l'élève.

L'analyse des résultats obtenus en comparant les réponses des élèves avant et après la session dans le théâtre du planétarium montrent une remarquable amélioration des concepts utilisés par les élèves, autant pour décrire les mouvements diurnes du Soleil que les autres mouvements à l'étude. L'auteure explique ces excellents résultats de la manière suivante :

« Some of the power of using one's own kinesthetic actions to learn may derive from students encoding information in multiple modalities. During the program, students associated their memory of the motions they performed with the verbal codes for apparent celestial motion and the visual images observed. Thus, conceptual growth could be the result of a combination of sensory, visual, and auditory stimuli. » (Plummer 2009, p. 205)

Un autre facteur important est, selon elle, le fait que les élèves étaient invités à faire des prédictions sous le dôme du planétarium concernant les divers mouvements à l'étude, et que ces prédictions étaient directement mises en relation avec les mouvements réels de la voûte céleste, forçant les apprenants à remettre en question leur conceptions premières lorsqu'elles ne correspondaient pas à la réalité. Cela bénéficiait autant aux élèves qui avaient déjà des idées bien arrêtées concernant les mouvements de la voûte céleste que ceux dont les conceptions étaient beaucoup moins développées. Sadler (1992) était arrivé à la même conclusion quelques années auparavant dans le cadre de sa propre étude portant sur les conceptions d'élèves en astronomie :

« [...] we have found that experiences of wrongly predicting events are not detrimental, but rather can be beneficial. They provide the motivation for students to explore the inconsistency and hold the potential for students to change their ideas. Without such obvious examples of the powerlessness of student conceptions, students will learn new material by rote and promptly forget it after the term is over. » (Sadler 1992, p. 16)

1.2.4.1 Conclusion

À la lumière des très nombreuses études qui viennent d'être décrites dans cette section, on constate qu'il existe des approches intrinsèques au planétarium qui semblent donner de meilleurs résultats que d'autres. En particulier, l'adaptation au contexte particulier d'une séance de planétarium de certains éléments issus des méthodes d'enseignement qui donnent de bons résultats en classe – pensons aux médiateurs d'apprentissage comme l'échafaudage et le regroupement des concepts, par exemple – apparaît comme une avenue fructueuse pour améliorer la valeur éducative d'une visite au planétarium. On pense aussi aux approches concrètes permettant la participation active des spectateurs, la manipulation d'objets ou de modèles, l'observation ciblée de phénomènes astronomiques, le travail d'équipe et l'enseignement par les pairs, l'approche kinesthésique, etc.

Le planétarium demeure un élément de motivation très fort pour les élèves et semble, dans certains cas, avoir un plus grand impact sur les filles que sur les garçons. La présence physique d'un animateur compétent et bien formé et la démystification du planétarium sont également des facteurs de succès. Quant à l'évaluation des connaissances acquises sous la voûte d'un planétarium, il semble inadéquat d'utiliser un test écrit et plusieurs auteurs préconisent plutôt d'utiliser l'environnement du théâtre. Nous reviendrons sur ce point un plus loin. Faire prédire aux élèves l'apparence de certains phénomènes astronomiques pour ensuite les confronter à la simulation sur le dôme du planétarium est aussi un puissant outil d'apprentissage.

Mais il est d'autres aspects plus spécifiques de l'expérience planétarium, en particulier les aspects visuels du médium et les concepts de projection et d'orientation spatiales, qui ont déjà été abordés dans cette section mais qui méritent qu'on s'y attarde davantage et qu'on les évalue, comme l'ont fait les études que nous examinerons dans les sections suivantes.

1.2.5 Le planétarium, un médium audiovisuel

Il semble *a priori* inutile de démontrer que le planétarium est, d'abord et avant tout, un musée de science qui « donne à voir ». Pourtant, quelques études se sont penchées sur la question de l'impact visuel d'un planétarium, que ce soit dans un contexte d'enseignement ou non, et ont obtenu des résultats intéressants et, surtout, porteurs d'enseignements valables pour notre propre thèse. Nous les présentons brièvement dans ce qui suit.

Gutsch (1978) a testé l'utilisation d'un système électronique de votation qu'il a lui-même conçu et construit pour évaluer *in situ* l'impact cognitif et affectif des images et des sons utilisés en cours de représentation sous la voûte d'un planétarium. Des questionnaires et des entrevues de groupe ont aussi été utilisés pour dresser des « profils de réponse affectifs » individuels et de groupe. Les résultats nous apprennent que les stimuli visuels dominent largement sur les autres types de stimuli et que ce sont eux qui ont le plus grand impact affectif. En particulier, la réponse affective est fortement corrélée avec le mouvement dans les images ou le mouvement des images elles-mêmes. Les images réalistes pleine-voûte, qui remplissent complètement le champ de vision du spectateur, ont également un impact très fort. Le type d'images de même que le contexte de leur utilisation jouent aussi un rôle important. Les résultats suggèrent de plus que les stimuli visuels dominent les réactions affectives des spectateurs au détriment des éléments sonores. Du point de vue de la bande sonore, les sons très forts ou très aigus ont en général déplu aux spectateurs.

Bishop (1981) rapporte les résultats d'une étude sur la rapidité et la justesse avec laquelle des sujets étaient capables de reconnaître des groupes d'étoiles donnés. Il s'avère que les sujets ont plus de difficulté à identifier des étoiles ou des groupes d'étoiles, sont plus lents et commettent plus d'erreurs d'identification lorsque leur champ de vision est restreint (moins de 25 degrés). Les difficultés s'estompent avec un champ de vision supérieur à 25 degrés. Ces conclusions, si on les applique à la situation particulière des planétariums, signifient que les éducateurs de ces institutions auraient avantage à présenter de vastes sections du ciel plutôt que simplement les régions couvertes par des constellations

particulières. Corollairement, le planétarium serait, toujours selon les conclusions exposées plus haut, un outil plus efficace que la présentation de diapositives pour l'apprentissage des constellations, puisque le champ de vision de chaque sujet sous la voûte du théâtre n'est limitée d'aucune façon.

Hunt (1991) rapporte les résultats de recherches sur l'apprentissage par l'utilisation d'éléments visuels (schémas, graphiques, photos en noir et blanc ou en couleur) et tente d'en tirer des conclusions utiles dans le domaine des planétariums. Il semble qu'un des facteurs les plus importants pour faciliter l'apprentissage lorsque des éléments visuels sont en jeu soit le temps de présentation des images : plus l'apprenant aura de temps pour analyser l'élément visuel qui lui est proposé, meilleure en sera sa compréhension. De plus, l'apprenant apprendra mieux s'il peut déterminer lui-même le temps qu'il prendra pour regarder telle ou telle image. Pour les planétariums, cela pourrait signifier qu'il vaut mieux montrer moins d'images, mais chacune pendant plus longtemps.

D'autre part, il semble que les techniques permettant de signaler quels éléments sont importants dans une image revêtent une importance considérable lorsque l'image en question est plus complexe ou plus difficile à analyser. Ces techniques permettent à l'apprenant de se concentrer sur les éléments les plus pertinents d'une image. Cette approche pourrait aussi s'appliquer dans les planétariums. Hunt trace un parallèle entre l'effet de ces signaux visuels (flèches, textes, etc.) et l'impact démontré par Bisard (1979a; 1979b) qu'ont les présentations avant le début de la séance de planétarium sur l'apprentissage des spectateurs. En d'autres termes, on apprend mieux lorsque l'on sait où et quoi regarder.

D'autres études citées par Brunello (1992) semblent démontrer que les enfants apprennent davantage grâce aux stimuli visuels qu'audio, qui peuvent même parfois les distraire. Il faut, en tout cas, que les stimuli vidéos et audio soient pertinents l'un par rapport à l'autre si l'on souhaite qu'ils se renforcent l'un l'autre, comme l'ont montré Vasu & Howe (1989). Pour les adultes, la différence serait moins importante; dans leur cas, on

constate plutôt la supériorité des textes écrits sur les autres modes de présentations (audio, visuel ou une combinaison des deux).

1.2.5.1 Conclusion

Cette courte section nous amène à conclure que ce sont bel et bien les éléments visuels de l'expérience du planétarium qui dominent dans ce que le spectateur perçoit, en particulier les images pleine voûte qui sont uniques au médium. Le réalisme des images est aussi un facteur important, le planétarium devenant alors un simulateur de réalité virtuelle immersif capable de reproduire les phénomènes astronomiques avec une telle vraisemblance qu'il emporte l'adhésion des spectateurs qui se croient véritablement transportés « ailleurs ». Nous verrons à quel point cet aspect est fondamental lorsque nous comparerons le planétarium et les environnements de réalité virtuelle au chapitre 2.3. Quant aux aspects sonores, Wooten (1979) avait déjà montré que leur impact était négligeable; cela ne signifie pas que la trame sonore soit inutile, mais qu'elle doit être conçue avec soin pour ne pas interférer avec la composante visuelle du spectacle.

La prédominance visuelle du planétarium est directement liée à un autre aspect éducatif important qui a, lui aussi, fait l'objet de nombreuses études, soient les concepts de projection et d'orientation spatiales, que nous abordons dans la section suivante.

1.2.6 Le planétarium et les concepts de projection et d'orientation spatiales

Un aspect important des concepts astronomiques fréquemment exposés en classe et au planétarium est le fait que nombre d'entre eux, même ceux qui sont facilement perceptibles dans la vie quotidienne, ne présentent pas le même aspect selon que l'observateur est sur Terre – et sa position exacte sur Terre entre également en ligne de compte – ou encore en un point de l'espace situé loin de la Terre. Il est par conséquent extrêmement difficile de comprendre un tel phénomène à moins d'être capable de coordonner différents points de vue, c'est-à-dire se représenter un phénomène sous

différents angles à la fois, ce que les chercheurs dont nous citerons les travaux plus loin appellent les capacités de projection et d'orientation spatiales (*spatial orientation ability*). Sonntag (1988a) définit les capacités de projection et d'orientation spatiales de la manière suivante : « *One's ability to mentally juxtapose, manipulate, and rotate an object and to create structures in the mind from written or verbal directions* » (p. 34). Pour Linn & Petersen (1985), « *[s]patial ability generally refers to skill in representing, transforming, generating, and recalling symbolic, nonlinguistic information* » (p. 1482). Gardner (1977) parle plutôt d'intelligence spatiale, mais ce terme englobe une réalité possédant les mêmes attributs et caractéristiques : aptitude à percevoir une forme ou un objet, aptitude à reconnaître le même élément sous différents angles, aptitude à reconnaître ou à opérer mentalement une transformation (rotation, translation, torsion...), capacité à évoquer une image et à la transformer ensuite, capacité à produire une représentation graphique ressemblante d'une représentation spatiale, etc.

Comprenant les difficultés de projection et d'orientation spatiales que nous venons d'évoquer pour les élèves en général et l'importance de ces questions en ce qui concerne l'évaluation des apprentissages dans les planétariums, Dean & Lauck (1972) se sont montrés très sceptiques face aux résultats mitigés de nombreuses études que nous avons déjà cités dans les sections précédentes. Il existe selon eux une certaine ambiguïté (pour ne pas dire une ambiguïté certaine...) dans ces recherches due à l'utilisation presque exclusive de questionnaires sur papier (montrant des illustrations bidimensionnelles de phénomènes astronomiques) pour évaluer les apprentissages des élèves à qui l'on avait proposé l'étude de concepts astronomiques sous la voûte du planétarium (environnement immersif tridimensionnel).

Pour lever cette ambiguïté, Dean & Lauck (1972) ont donc conçu un programme d'étude en trois sessions de 45 minutes chacune portant sur l'identification des constellations qu'ils ont proposé à deux groupes d'élèves de 6^e année. Un premier groupe de 24 élèves a étudié ces concepts en classe à l'aide du tableau et d'une sphère céleste tandis que l'autre (de taille identique) suivait les mêmes leçons au planétarium. L'originalité de leur approche a consisté à mener l'évaluation de nuit, à la campagne sous le

vrai ciel étoilé, tandis qu'on a demandé à chaque élève d'identifier les constellations en pointant vers le ciel le faisceau d'une lampe de poche.

Les résultats indiquent que les élèves qui ont étudié au planétarium ont mieux réussi à ce test que ceux qui sont demeurés en classe, démontrant selon les chercheurs la supériorité de l'environnement immersif du planétarium en ce qui concerne l'identification des constellations dans un environnement tridimensionnel. On remarque surtout une meilleure adéquation entre le mode d'enseignement au planétarium et le mode d'évaluation sous la voûte céleste, deux expériences très similaires et fort différentes d'un questionnaire sur papier. Warneking (1970) avait déjà signalé qu'un sujet réussira toujours mieux à un test d'évaluation qui reprend des éléments importants de la situation d'enseignement avec laquelle il s'est familiarisé.

Smith (1978) a rapporté les résultats d'une étude portant sur la reconnaissance des constellations par des enfants de 11-12 et 13-15 ans, de même que par des adultes âgés de 18 à 55 ans. Il a comparé les résultats de sujets à qui l'on avait montré des constellations dans un planétarium à d'autres à qui l'on avait montré des diapositives en classe. Il a demandé aux sujets d'identifier les constellations sous un vrai ciel puis sur une feuille où les champs d'étoiles (sans les lignes imaginaires) avaient été imprimés.

Le chercheur a découvert que les deux groupes démontraient des performances équivalentes lorsque interrogés sous le vrai ciel étoilé. Par contre, les sujets ayant étudié à l'aide des diapositives ont mieux réussi le test papier-crayon que ceux ayant visité le planétarium. Il semble que les sujets à qui l'on a présenté les diapositives aient été plus facilement capables de transférer leurs connaissances sur les constellations de deux à trois dimensions (de diapositives à vrai ciel) que les autres, qui devaient transposer leurs connaissances acquises au planétarium sur des feuilles de papier (de ciel tridimensionnel à représentation bidimensionnelle sur la feuille).

S'intéressant aux capacités d'orientation spatiale des sujets et aux liens entre ces capacités et l'apprentissage de notions concernant l'astronomie de position, Sonntag (1981)

a comparé l'efficacité relative de trois approches éducatives différentes auprès d'étudiants universitaires en formation pour devenir eux-mêmes enseignants au primaire : le planétarium seul, la classe seule (incluant l'utilisation d'une sphère céleste) et une combinaison planétarium-salle de classe avec la sphère céleste.

Au total, 76 étudiants en fin de Baccalauréat ont été répartis au hasard en trois groupes. Le premier groupe a suivi quatre heures de présentations au planétarium, où le projecteur d'étoiles et les projecteurs auxiliaires ont été utilisés pour présenter des notions concernant la sphère céleste, le mouvement diurne, la mesure du temps et les saisons. Le second groupe a étudié les mêmes thèmes pendant quatre heures en classe à l'aide d'une sphère céleste. Le troisième groupe a étudié les mêmes sujets pendant deux heures en classe à l'aide de la sphère céleste et pendant deux heures au planétarium.

Le chercheur a lui-même conçu deux tests, un premier visant à évaluer les capacités de projection et d'orientation spatiales (administré aux trois groupes avant le début des sessions) et un second (60 questions avec choix de réponses) mesurant les connaissances acquises par les répondants, et qui leur a été soumis à la fin des séquences. Les notes obtenues par les répondants au test sur les capacités de projection et d'orientation spatiales a permis au chercheur de répartir les étudiants en trois sous-groupes égaux, soit un sous-groupe pour le tiers supérieur qui a obtenu les meilleures notes (capacités spatiales élevées), un pour le tiers médian (capacités spatiales moyennes) et un pour le tiers inférieur (capacités spatiales faibles).

Les résultats montrent que l'enseignement en classe utilisant la sphère céleste est significativement supérieur seulement à la combinaison planétarium-salle de classe. La différence entre la salle de classe seule et le planétarium seul n'est pas significative. Par contre, des différences hautement significatives dans les résultats au test de connaissances acquises sont apparues entre les trois groupes, corrélées avec leurs capacités de projection et d'orientation spatiales, démontrant que ces capacités sont extrêmement importantes dans la maîtrise des concepts d'astronomie de position. Ainsi, pour les étudiants possédant des capacités moyennes ou faibles, le planétarium seul ou la combinaison du planétarium et de

la salle de classe a produit de meilleurs résultats que la classe seule. Au contraire, les étudiants du groupe possédant des capacités d'orientation spatiales élevées ont mieux réussi en classe.

Le chercheur en déduit que les élèves dont les capacités de projection et d'orientation spatiales sont moyennes ou faibles profitent davantage de l'environnement immersif plus concret du planétarium, un résultat que l'on retrouve également ailleurs (Bondurant, 1975; Bishop, 1980a). Le planétarium semble donc un bon outil pour que les élèves mettent en pratique leurs habiletés de projection et d'orientation spatiales.

On a déjà mentionné la difficulté majeure reliée au concept de projection et d'orientation spatiales qui consiste à passer de la représentation bidimensionnelle d'une situation astronomique à une représentations tridimensionnelle et vice-versa. Par exemple, Ankney (1981) propose quelques raisons qui expliquent que les élèves aient de la difficulté à transposer des connaissances sur les constellations acquises dans un environnement bidimensionnel (dessin au tableau, diapositives, illustrations dans un livre, etc.) à une situation tridimensionnelle comme l'observation du vrai ciel étoilé (ou d'une simulation sous la voûte d'un planétarium), comme l'a constaté Smith (1974a; 1974b; 1974c; 1976; 1977; 1978).

Ankney (1981) fait d'abord remarquer qu'accepter le fait que des points sur une illustration représentent des étoiles dans le ciel exige un niveau d'abstraction qui n'est pas à la portée de tous. La situation est davantage compliquée lorsque l'illustration est « en négatif » (points noirs sur fond blanc). Il existe en outre une grande différence d'échelle entre ces représentations et le vrai ciel. Finalement, peu d'élèves sont familiers avec les points cardinaux et l'orientation en général, même de jour.

Ajoutons à cela le fait que la rotation de la Terre sur elle-même et sa révolution autour du Soleil entraînent des changements diurne et saisonnier importants dans la visibilité des constellations ainsi que dans leur orientation par rapport à l'horizon. Le mouvement annuel des planètes contribue lui aussi à modifier constamment l'apparence du

ciel au-dessus de nos têtes, contrairement à ce que des images fixes peuvent nous laisser croire (Ankney, 1981). Malheureusement, peu d'auteurs ont tenu compte de ces difficultés conceptuelles en concevant leur recherche ou en analysant leurs résultats.

Bishop (1980a) est l'exception à la règle. Dans une étude d'une grande ampleur, elle s'est intéressée aux capacités d'élèves de 8^e année de se représenter une même situation tridimensionnelle de deux points de vue différents, les capacités de projection et d'orientation spatiales qu'elle appelle les *projective spatial ability*. Par exemple, un élève capable de réconcilier l'apparence de la Lune à une phase quelconque (vue depuis la surface de la Terre) avec la position correspondante de notre satellite sur son orbite autour de la Terre (vue depuis un point éloigné de l'espace) est réputé posséder une bonne capacité de projection et d'orientation spatiales. Les thèmes astronomiques abordés dans son étude faisaient tous appel à ces habiletés spatiales : la rotation de la Terre et les mouvements de la sphère céleste, les saisons, les phases de la Lune ainsi que la position et les mouvements apparents des planètes. L'intervention de Bishop sous la voûte du planétarium suscitait fortement la participation des spectateurs, entre autres en leur proposant la manipulation de modèles tridimensionnels et la réalisation de dessins.

La chercheuse a réparti une centaine d'étudiants en trois groupes : le premier a suivi huit sessions au planétarium où les thèmes astronomiques leur ont été présentés de manière traditionnelle (sans manipulation, dessins ou interaction particulière entre les spectateurs et l'animateur; seule la prise de note par les spectateurs les rendait « actifs »). L'autre groupe (traitement) a suivi le même nombre de sessions mettant en pratique les approches décrites dans le paragraphe précédent (apprentissage participatif, incluant la manipulation de modèles et la réalisation de croquis sous la voûte du planétarium). Un troisième groupe contrôle n'a participé à aucune session dans le théâtre. La chercheuse a elle-même supervisé toutes les sessions dans le théâtre.

Des tests ont été administrés aux élèves immédiatement après chacune des séances, puis six semaines plus tard. Une partie des questions ont été soumises aux élèves alors qu'ils étaient encore assis sous la voûte du planétarium, afin d'éviter toute ambiguïté à

propos de la pertinence de tests écrits pour mesurer l'acquisition de notions tridimensionnelles (Dean & Lauck, 1972; Smith, 1974a; 1974b; 1974c; 1976; 1977; 1978). Tous les élèves ont également répondu à un pré- et à un post-test standardisés pour évaluer leurs capacités de projection et d'orientation spatiales.

La chercheuse a découvert que les deux groupes expérimentaux obtenaient de meilleurs résultats que le groupe contrôle, mais que le groupe traitement retenait significativement mieux à court et moyen terme les concepts présentés. De plus, parmi les élèves du groupe traitement, les garçons se sont plus améliorés que les filles en ce qui concerne les habiletés spatiales; ceci étant dit, un élève qui possédait déjà de bonnes capacités de projection spatiale réussissait mieux que les autres, peu importe son sexe. Aucun changement significatif de ce type n'a été observé pour les autres groupes.

Bishop (1980a) cite également deux études préparatoires à sa recherche principale qu'elle a réalisées durant l'année scolaire 1976-1977 auprès d'élèves de 2^e et de 6^e années (voir Bishop, 1977a et 1977b). Elle s'intéressait déjà aux capacités de projection et d'orientation spatiales des élèves à propos du cycle diurne pour les élèves de 2^e année et des phases de la Lune en 6^e année. Dans les deux cas, il était nécessaire pour les élèves de réconcilier deux points de vue différents (vue de la Terre et vue d'un point éloigné dans l'espace) afin de faire le lien entre les diverses images présentées en classe et au planétarium et la manipulation de modèles tridimensionnels. Outre le fait que les enfants de 2^e année (et, dans une moindre mesure, ceux de 6^e année) ont beaucoup de difficulté à se décentrer pour se représenter une scène de deux points de vue à la fois, la chercheuse a découvert que le fait de manipuler des modèles tridimensionnels et de réaliser dans le planétarium des dessins d'images et de phénomènes projetés sur la voûte étaient d'une aide précieuse pour faciliter l'acquisition de ces concepts. Elle a également découvert que les élèves bénéficient grandement d'activités d'exploration menées sous la voûte du planétarium.

Il semble en outre qu'il soit possible, grâce au planétarium, de développer les capacités de projection et d'orientation spatiales chez les élèves (Bishop, 1980a) et que cela

se révèle même primordial si l'on désire que les élèves dont les capacités sont faibles au départ puissent se hisser au niveau des élèves plus forts et réalisent de véritables apprentissages sous la voûte du planétarium, comme le note Sonntag (1989) :

« [Research] shows that spatial ability scores can be improved for all students after exposing them to hands-on laboratory activities and planetarium demonstrations, and that those scoring low in spatial ability [...] can significantly improve their spatial ability scores and overcome any initial deficiency they had in this construct. » (Sonntag, 1989, p. 48)

Bishop (1980a) a aussi remarqué une importante différence entre les sexes à propos des capacités de projection et d'orientation spatiales, les garçons performant en moyenne mieux que les filles. Elle note toutefois que cette différence peut être comblée :

« The study of projective astronomy concepts such as lunar phases may be a method of compensating at a critical time in developing spatial ability (verging adolescence) for what normally develops into increased gender difference in spatial ability. » (Bishop 1980a, p. 329)

Dans une étude menée exclusivement en classe, mais dont les conclusions sont facilement applicables au domaine des planétariums, Reynolds (1990) s'est penché sur cette même question, remarquant que bon nombre de concepts astronomiques sont, par leur nature même, des phénomènes tridimensionnels (pensons aux phases de la Lune ou au mécanisme des saisons). Par contre, la présentation de ces concepts en classe est la plupart du temps bidimensionnelle, confinée à la surface du tableau ou à une page du manuel scolaire (Diakidoy & Kendeou, 2001; Whitehorne, 2003).

Dans son étude, Reynolds (1990) a apparié au hasard des élèves de même sexe inscrits en classe de physique de l'équivalent étasunien de la 4^e année du secondaire (13 paires de garçons et autant de paires de filles). Le regroupement des élèves deux par deux avait pour but de créer une forme d'émulation et de susciter les discussions permettant au chercheur de mieux observer l'évolution de la pensée des élèves. Reynolds (1990) leur a présenté 16 images représentant deux cycles lunaires complets et leur a ensuite demandé d'utiliser le matériel disponible en classe (papier, crayons, disques de plastique, sphères de

différentes tailles, lampe de poche, etc.) pour expliquer le mécanisme des phases de la Lune. Toutes les manipulations ont été filmées à des fins d'analyse par le chercheur.

Le chercheur a constaté que les paires d'élèves qui avaient conçu un modèle tridimensionnel pour simuler le mécanisme des phases de la Lune (au lieu, par exemple, de dessiner un diagramme sur une feuille ou de fournir une simple description verbale) réussissaient mieux que les autres à en expliquer les détails et ce, indépendamment de leur intérêt pour les sciences, des cours qu'ils avaient ou non suivis auparavant, ou de leur sexe. Le chercheur conclut que les phénomènes astronomiques tridimensionnels devraient toujours, dans la mesure du possible, faire l'objet d'une modélisation en trois dimensions de la part des élèves à qui l'on essaie de les enseigner.

Toujours dans cet esprit de favoriser le développement des concepts de projection et d'orientation spatiales chez les élèves, Bishop (1988) prêche en faveur de l'utilisation de ce qu'elle nomme les modèles humains dynamiques et leur application en astronomie et au planétarium (voir également Van Doren (2008), Plummer (2009) et Richards (2012)). Les modèles humains dynamiques sont basés sur le concept du jeu de rôle; les élèves sont appelés à « jouer » le rôle du Soleil, de la Lune, d'une planète, d'un atome, etc. selon le scénario à illustrer. Bishop (1988) donne quelques raisons pour justifier l'utilisation de ces modèles. Selon elle, les élèves apprécient grandement un modèle dans lequel ils doivent à la fois s'impliquer et coopérer avec d'autres. Elle cite d'ailleurs des études qui concluent que l'apprentissage et la rétention sont favorisés par des situations de coopération entre élèves. D'autre part, Bishop soutient que le temps passé à expliquer, organiser puis « mettre en marche » le modèle humain favorise la compréhension des concepts exposés. Elle conclut en écrivant que la projection et l'orientation spatiales représentent des activités mentales difficiles; plus les modèles présentés seront concrets, tridimensionnels et illustreront l'évolution ou les mouvements d'un système, plus l'apprentissage en sera facilité.

1.2.6.1 Conclusion

Les études recensées dans cette section se sont surtout attardées au phénomène des capacités de projection et d'orientation spatiales des élèves et de leur impact sur l'apprentissage sous la voûte d'un planétarium. Il ressort des conclusions des auteurs de ces études qu'il s'agit là d'un facteur très important de réussite d'une séance éducative au planétarium, en particulier pour les élèves plus jeunes qui sont exposés pour la première fois à des concepts astronomiques difficiles, pour les élèves dont les capacités de projection et d'orientation spatiales sont moyennes ou faibles, ou encore pour les jeunes filles, dont les capacités sont généralement plus faibles que chez les garçons du même âge (plus particulièrement en ce qui concerne la rotation mentale et la perception spatiale, voir Linn & Petersen, 1985), mais pour qui le planétarium s'avère un bon moyen de combler cet écart. Quoi qu'il en soit, les capacités de projection et d'orientation spatiales peuvent faire l'objet d'un apprentissage et le planétarium est l'endroit idéal pour ce faire. Tout moyen concret permettant d'appuyer l'apprentissage de notions astronomiques complexes, comme la modélisation tridimensionnelle, la manipulation de modèles, les modèles humains dynamiques, etc., favorise les apprentissages sous la voûte d'un planétarium.

Enfin, l'évaluation des connaissances acquises sous la voûte du planétarium devrait idéalement avoir lieu à l'endroit même de leur apprentissage. Il semble que les outils d'évaluation traditionnels utilisant un papier et un crayon mesurent des connaissances distinctes de celles acquises au planétarium, ce qui fausse considérablement les conclusions obtenues par un grand nombre d'études que nous avons citées dans les sections précédentes. C'est justement au planétarium comme outil d'évaluation que s'intéressent les études que nous aborderons à la section suivante.

1.2.7 Le planétarium comme outil d'évaluation

Nous présentons ci-dessous les résultats de quelques études qui ont utilisé le planétarium, non pas comme outil d'enseignement, mais plutôt comme outil de mesure et d'évaluation. Malgré le fait qu'elles ne visaient pas à évaluer spécifiquement l'impact

éducatif du planétarium, les conclusions de ces études présentent tout de même un intérêt certain pour notre propos.

Dans son étude, Battaglini (1971) s'intéressait au développement des concepts de position et de mouvements relatifs des astres tels qu'enseignés dans le cadre d'un programme de formation en sciences mis en vigueur aux États-Unis au cours des années précédentes, le *Science Curriculum Improvement Study*. Il cherchait à savoir si des élèves de 4^e année qui avaient étudié ces concepts en classe à l'aide du nouveau programme possédaient une meilleure compréhension des concepts de projection et d'orientation spatiales que des élèves du même âge ayant étudié à l'aide d'un autre programme.

Pour cela, il a développé une session de planétarium suscitant la participation active des spectateurs au cours de laquelle il a soumis divers groupes d'élèves à un test de 30 questions portant sur ces mêmes concepts. Battaglini conclut que le groupe qui a étudié à l'aide du nouveau programme démontre une meilleure compréhension des concepts de projection et d'orientation spatiales que l'autre, ce qui démontre selon lui que ces concepts peuvent effectivement être enseignés.

Smith (1974a; 1974b; 1974c; 1976; 1977) a comparé deux approches favorisant l'apprentissage des constellations par des élèves de 3^e et 4^e années. Il a divisé les classes en deux groupes aléatoires stratifiés en fonction des notes scolaires et de divers autres facteurs (résultats à des tests psychométriques, tests en science et en mathématiques, etc.). Un premier groupe de 19 élèves a assisté à la présentation en classe de diapositives montrant les champs d'étoiles d'une douzaine de constellations (représentations bidimensionnelles), sans les lignes imaginaires reliant les étoiles entre elles. Le chercheur utilisait simplement un pointeur pour tracer les lignes entre les étoiles sur l'écran de projection.

Le second groupe de 17 élèves a eu droit à une présentation similaire, sauf que cette fois les étoiles sur les diapositives étaient reliées entre elles pour dessiner les constellations. Les deux groupes ont ensuite été évalués à l'aide d'un questionnaire écrit sur lequel les groupes d'étoiles apparaissaient (une constellation par page) et que les élèves devaient

identifier en cochant le nom correspondant parmi un choix de quatre réponses. Ce test a été répété sept puis quatorze jours plus tard.

Immédiatement après l'administration du premier test écrit, les élèves se sont rendus au planétarium où le chercheur a évalué leurs connaissances des constellations en utilisant cette fois le ciel étoilé simulé. S'inspirant des travaux de Dean & Lauck (1972), Smith les a interrogé directement sous la voûte du planétarium : le présentateur pointait vers un groupe d'étoiles, en dessinait les contours en traçant des lignes imaginaires et les élèves devaient en identifier le nom sur une feuille parmi un choix de réponses.

Il appert que la grande majorité des élèves ont amélioré de façon significative leur reconnaissance des constellations, autant à court qu'à moyen terme, que la mesure ait été effectuée à l'aide du test écrit ou sous la voûte du planétarium. Par contre, le chercheur n'a découvert aucune différence significative entre les groupes de traitement : les élèves à qui l'on a présenté les lignes reliant les étoiles n'ont pas mieux réussi que ceux à qui l'on avait montré uniquement les champs d'étoiles.

L'auteur note toutefois que les élèves des deux groupes ont légèrement moins bien réussi le test au planétarium par rapport au test écrit. Cette différence s'explique, selon lui, par la différence entre l'environnement d'apprentissage bidimensionnel (diapositives) et l'environnement d'évaluation tridimensionnel (la voûte du planétarium). Rappelons les réserves de Warneking (1970) à propos du fait de tester des connaissances acquises dans un environnement ou à l'aide d'outils différents de la situation d'apprentissage.

Dans un même ordre d'idées, Bondurant (1975) a lui aussi utilisé le planétarium – de même qu'un test écrit administré en classe – comme outils d'évaluation afin de déterminer quelles compétences possédaient des élèves de 5^e années parmi celles jugées nécessaires pour reconnaître et identifier les constellations. Il a pour cela conçu un test d'évaluation comprenant 48 questions abordant six compétences distinctes : évaluation de la brillance relative des étoiles, orientation par rapport à une direction donnée, mesure de distances angulaires sur la voûte céleste, reconnaissance d'un groupe d'étoiles spécifique,

détection du changement de position relatif d'un groupe d'étoiles spécifique et utilisation d'une carte du ciel (cherche-étoiles) pour localiser un groupe d'étoiles spécifique sur la voûte céleste.

Son étude portait sur 120 élèves répartis au hasard en deux groupes. Le premier groupe a été soumis au test décrit plus haut directement sous la voûte du planétarium. Les élèves devaient répondre aux questions oralement et individuellement. L'autre groupe a répondu en classe aux mêmes questions posées par écrit et accompagnées d'illustrations bidimensionnelles.

La majorité des élèves ont démontré de bonnes aptitudes en ce qui concerne les compétences visées, sauf pour l'orientation par rapport à une direction donnée et la détection du changement de position relatif d'un groupe d'étoiles spécifique. Dans ce cas, moins de la moitié des élèves participant à l'étude ont été capables de répondre correctement aux questions concernant ces deux compétences, ce qui amène le chercheur à conclure que ces sujets devraient faire l'objet d'une attention particulière lors de l'enseignement si l'on veut que les élèves soient bien outillés pour reconnaître et identifier des constellations sous la voûte du planétarium.

D'autre part, il ne semble pas y avoir de lien entre les compétences utilisées pour reconnaître les constellations sous la voûte du planétarium et celles utilisées pour répondre au test papier-crayon mené en classe, ce qui amène le chercheur à conclure que les tests mettent en évidence des compétences et des connaissances différentes selon le lieu où ils sont administrés. Ce résultat concorde avec les plus récentes conclusions de Smith (1978) et Bishop (1980a) : les tests tridimensionnels menés sous la voûte d'un planétarium mesurent les connaissances en astronomie différemment (peut-être même des connaissances différentes en astronomie !) que des tests bidimensionnels au contenu similaire menés en classe.

Enfin, Hayward (1975) a mené une étude visant à concevoir, développer et tester un questionnaire, le *Planetarium Test on Annual Motion*, afin de vérifier l'acquisition de

connaissances et de concepts en lien avec les mouvements annuels de la Lune, du Soleil et des planètes. Ce test a été conçu pour être appliqué sous la voûte d'un planétarium et pour mesurer l'acquisition d'un grand nombre d'objectifs cognitifs, procéduriers et intellectuels, en plus d'assurer son applicabilité dans d'autres contextes éducatifs visant les mêmes objectifs.

Pour concevoir son questionnaire, le chercheur s'est appuyé sur une vaste recension des écrits, de même que sur son expérience personnelle. Les concepts et les questions de son test ont ensuite été soumis à un jury composé de membres issus de divers horizons scientifiques ainsi que du monde de l'éducation. Quatre études pilotes ont été menées auprès d'élèves de sixième année afin de valider le test et ses procédures d'application.

Le test a ensuite été utilisé pour évaluer l'efficacité de deux programmes distincts présentés au *Fernbank Science Center*. Les élèves de 6^e année participants à l'étude ont été répartis au hasard dans trois groupes : un premier qui a assisté à un programme dans un planétarium, un second qui a étudié les mêmes concepts dans une salle de classe et un troisième qui n'a pas étudié ces concepts. Les trois groupes ont été évalués à l'aide du questionnaire, mais uniquement après traitement. Le chercheur s'est en outre attardé à évaluer l'effet des distracteurs et de certains indices contenus dans son questionnaire. Enfin, il a proposé le questionnaire à nouveau à 34 élèves et a conduit avec eux des entrevues de suivi pour mieux établir la validité du contenu et des objectifs de son test. Le chercheur n'a par contre pas cherché à vérifier si les savoirs et compétences acquis sous la voûte du planétarium étaient transférables sous le vrai ciel.

Les résultats montrent que l'instrument est valide et fiable pour évaluer les connaissances acquises en rapport avec les concepts à l'étude. Les deux groupes traitement (planétarium et salle de classe) ont significativement mieux performé que le groupe témoin. Le groupe qui a suivi la leçon au planétarium a même mieux performé que le groupe classe en ce qui concerne l'évaluation de relations observationnelles et des habiletés de haut niveau pour utiliser de telles relations. Les élèves du groupe planétarium ont également mieux maîtrisé les relations spatiotemporelles, l'inférence et l'application de concepts. Le

groupe classe a quant à lui mieux performé dans les domaines qui demandaient la classification, la mémorisation et la discrimination de données. Hayward (1975) conclut donc que le planétarium est mieux placé pour enseigner des concepts d'orientation et d'observation de phénomènes célestes que la salle de classe.

1.2.7.1 Conclusion

Malgré que l'objectif des études citées dans la présente section ait été différent de celui de la section précédente, on y retrouve des conclusions assez similaires, par exemple le fait que les capacités de projection et d'orientation spatiales peuvent effectivement faire l'objet d'un apprentissage de la part des élèves, ou encore que les tests papier-crayon évaluent des connaissances différentes des tests menés sous la voûte du planétarium ou sous le vrai ciel étoilé.

1.3 Conclusion

Nous avons recensé et commenté dans la présente annexe près de soixante ans de recherche concernant les aspects éducatifs des planétariums. Le lecteur trouvera au point 2.1.3 (chapitre 2) les conclusions que nous tirons de cette revue de la littérature dans le cadre de notre travail.

Annexe 3 : Questionnaires pré- et post-tests utilisés

Nous présentons ici les cinq questionnaires que nous avons utilisés tant en prétest qu'en post-test. Notons que les questionnaires pré-tests et post-tests étaient identiques, mais que ce fait n'a pas été mentionné explicitement aux répondants. Nous présentons également la démarche que nous avons suivi pour développer et valider les questions.

Pour concevoir nos questions, nous avons d'abord identifié le contenu notionnel requis pour décrire le mécanisme des phases de la Lune, par le biais d'une simple transposition didactique (voir Bell & Trundle, 2008). Ces notions sont les suivantes :

- La Lune est sphérique;
- La Lune a un diamètre équivalent au quart de celui de la Terre, tandis que la Terre a un diamètre 110 fois plus petit que celui du Soleil;
- La Lune est située 400 fois plus près de la Terre que le Soleil;
- La Lune ne produit pas sa propre lumière, elle brille en réfléchissant vers nous la lumière émise par le Soleil. Il y a donc toujours une moitié de la Lune éclairée et une moitié sombre;
- La Lune est en orbite autour de la Terre, qui est elle-même en orbite autour du Soleil.

Nous avons aussi voulu explorer la familiarité des apprenants avec l'observation des phases de la Lune (vision géocentrique) de jour comme de nuit en les interrogeant sur divers aspects du phénomène : forme réelle de la Lune, apparence des phases, nomenclature, etc.

Dans les cas où de multiples réponses étaient offertes aux répondants, les choix offerts reprenaient le plus possible des conceptions fréquentes attribuées à des élèves de ce groupe d'âge par divers auteurs qui ont effectué une recension de ces théories personnelles les plus courantes (Treagust, 1988). Selon Sadler (1998), « *distractor-driven multiple choice questions which pit students' previous ideas versus scientific views are very effective in examining conceptual change* » (p. 287). Le chercheur ajoute que les distracteurs doivent

être aussi attrayants que la bonne réponse. Le lecteur trouvera une recension des principales conceptions concernant les phases de la Lune au tableau I de l'annexe 1.

Plusieurs exemples de tests et questionnaires ont été étudiés pour la préparation de nos propres instruments. Slater (1993) insiste sur l'importance de consulter un grand nombre de sources différentes, plutôt que de n'utiliser que des questions conçues par le chercheur lui-même, pour éviter ce qu'il appelle un « conflit d'intérêt » entre les buts poursuivis par le chercheur et la réalité de la situation qu'il cherche à étudier.

Par exemple, nous avons retenu les leçons de Hufnagel, Slater, Deming, Adams, Lindell Adrian, Brick & Zeilik (s.d.) qui ont construit le *Astronomy Diagnostic Test (ADT)* dans le but d'évaluer les connaissances en astronomie d'étudiants de niveau universitaire²⁰. Les auteurs recommandent de ne tester qu'un seul concept par question, d'éviter le jargon scientifique et de s'assurer que le répondant soit en mesure de comprendre chaque question et de répondre avant même d'avoir lu les choix de réponse (selon le cas).

Ils recommandent également de valider les questionnaires en les soumettant à des experts du domaine à l'étude afin, entre autres, de s'assurer qu'il n'y a qu'une seule bonne réponse par question à choix multiples. Dans notre cas, nous avons demandé aux professeurs Paul Charbonneau, Olivier Hernandez et Robert Lamontagne, tous trois astrophysiciens au Département de physique de l'Université de Montréal, de répondre aux questionnaires. Ceux-ci ont été corrigés et précisés suite à leurs conseils, puis leur ont été soumis à nouveau afin de confirmer qu'il ne subsistait pas d'erreur.

Nous nous sommes aussi beaucoup inspiré du *Astronomy Concept Inventory* de Sadler (1992) et du *Lunar Phases Concept Inventory* de Lindell & Olsen (2002) pour la

²⁰ Michael Zeilik a également développé le *Survey of Attitudes Toward Astronomy* (<http://www.flaguide.org/tools/attitude/astpr.php>) et l'*Introductory Astronomy Diagnostic Survey* (www.flaguide.org/tools/diagnostic/adt.php), tous deux basés sur les mêmes principes généraux.

rédaction de nos questions. Par contre, nous avons cherché à éviter ce qui nous apparaît comme une grave lacune de ce dernier test, à savoir le fait que la formulation de certaines questions donne au répondant de précieux indices (souvent visuels) pour trouver la bonne réponse à d'autres questions. Sadler (1992) note que cela rend malheureusement les questions dépendantes les unes des autres. Nous croyons que cela peut aisément faire dérailler l'entreprise de recueil des conceptions et biaiser le résultat d'un tel test. Nous avons donc pris beaucoup de précautions pour éviter de faire la même erreur dans nos propres questionnaires, en particulier en ramassant les questionnaires complétés avant de distribuer les suivants.

Des questionnaires développés dans le cadre de recherches sur la valeur éducative des planétariums ont également été consultés (Sunal, 1973; Burnette, 1976; Cottrill, 1976; Fletcher, 1977; Gutsch, 1978; Bishop, 1980; Johnston, 1981; Edoff, 1982; Twiest, 1989; Schoon, 1992; Tousignant, 1994; Meyer, 2000). Mais rappelons qu'aucune de ces études n'a tenu compte des conceptions des apprenants ni ne les ont incluses comme éléments de réponses dans les questions à choix multiples.

Nom : _____ Âge : _____

1. Peux-tu nommer des astres que l'on peut voir dans le ciel le jour ? Inscris-en autant que tu veux.

2. Peux-tu nommer des astres que l'on peut voir dans le ciel la nuit ? Inscris-en autant que tu veux.

Nom : _____ Âge : _____

1. As-tu déjà vu la Lune dans le ciel la nuit ? Encerle ta réponse.

OUI NON

2. As-tu déjà vu la Lune dans le ciel le jour ? Encerle ta réponse.

OUI NON

3. Si tu as répondu OUI à l'une ou l'autre des questions précédentes, dessine ci-dessous de quoi avait l'air la Lune la dernière fois que tu l'as observée.

4. Explique brièvement comment, selon toi, la Lune peut être visible en plein jour ou sinon, pourquoi on ne peut pas voir la Lune en plein jour.

Nom : _____ Âge : _____

1. Est-ce que la Lune a toujours la même apparence dans le ciel ? Est-ce qu'elle nous apparaît toujours sous la même forme ? Encerle ta réponse.

OUI NON

2. Si tu as répondu NON à la question précédente, dessine ci-dessous toutes les formes que peut prendre la Lune dans le ciel. Tu peux faire autant de dessins que nécessaire.

Nom : _____ Âge : _____

1. Selon toi, qu'est-ce qui fait que la Lune change d'apparence d'un jour à l'autre ? Décris ta réponse.

2. Selon toi, quelle est la forme réelle de la Lune ? Par exemple, a-t-elle la forme d'un croissant, est-elle plate et ronde comme une assiette ou sphérique comme un ballon ? A-t-elle une autre forme ? Décris ta réponse.

3. Selon toi, d'où vient la lumière de la Lune ? Est-ce que la Lune produit sa propre lumière ? Est-ce qu'elle réfléchit vers nous la lumière de la Terre ? Du Soleil ? La lumière des étoiles ? Est-ce autre chose qui fait briller la Lune ? Décris ta réponse.

4. Selon toi, comment la Lune se déplace-t-elle dans le ciel ? Est-ce qu'elle tourne autour de la Terre, ou du Soleil, ou des deux ? Est-ce plutôt le Soleil et la Terre qui tournent autour de la Lune ? Est-ce autre chose ? Dessine ta réponse ci-dessous en montrant qui tourne autour de quoi. Utilise des flèches pour indiquer le sens des déplacements. Décris ensuite les mouvements de la Lune dans tes mots sur les lignes ci-dessous.

5. Si tu pouvais placer le Soleil, la Terre et la Lune côte à côte et les classer du plus petit au plus grand, laquelle des listes ci-dessous indiquerait le bon ordre ? Encerle ta réponse.

Plus petit < Moyen < Plus grand

- A Terre < Lune < Soleil
 B Lune < Terre < Soleil
 C Soleil < Lune < Terre
 D Soleil < Terre < Lune
 E La Terre, la Lune et le Soleil ont environ la même taille

6. Imagine que tu construis un modèle réduit de la Terre, de la Lune et du Soleil. Si, dans ton modèle, la Terre avait la taille d'un ballon de basket ball, quelle serait la taille de la Lune et du Soleil à la même échelle ? Encerle tes réponses.



Dans mon modèle, la Lune aurait la taille...

- A d'une bille
 B d'une balle de tennis
 C d'un autre ballon de basket ball
 D d'un gros ballon de plage
 E d'une montgolfière

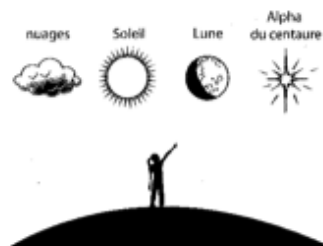
Dans mon modèle, le Soleil aurait la taille...

- A d'une bille
 B d'une balle de tennis
 C d'un autre ballon de basket ball
 D d'un gros ballon de plage
 E d'une montgolfière

7. Laquelle des listes suivantes situe les objets par ordre de distance croissante par rapport à toi, du plus proche de toi au plus éloigné ? Encerle ta réponse.
 (Note : Alpha du Centaure est une étoile semblable au Soleil.)

Plus proche ———> Plus éloigné

- A Nuages, Alpha du Centaure, Soleil, Lune
 B Alpha du Centaure, Soleil, Lune, nuages
 C Soleil, Lune, Alpha du Centaure, nuages
 D Lune, nuages, Soleil, Alpha du Centaure
 E Nuages, Lune, Soleil, Alpha du Centaure



Nom : _____ Âge : _____

À l'aide d'un trait, relie chaque photo de la Lune à gauche avec le nom de la phase correspondant à droite.



PLEINE LUNE



LUNE CROISSANTE



NOUVELLE LUNE



DERNIER QUARTIER



LUNE GIBBEUSE DÉCROISSANTE



LUNE GIBBEUSE CROISSANTE



PREMIER QUARTIER

Annexe 4 : Fiche d'observation des phases de la Lune (le calendrier lunaire)



EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____



EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche date : 03/29 heure : 18:25	lundi date : 03/30 heure : 18:28	mardi date : 03/31 heure : 18:32	mercredi date : 04/01 heure : 18:35	jeudi date : 04/02 heure : 18:38	vendredi 	samedi
dimanche 	lundi 	mardi 	mercredi 	jeudi 	vendredi 	samedi
dimanche 	lundi 	mardi 	mercredi 	jeudi 	vendredi 	samedi
dimanche 	lundi 	mardi 	mercredi 	jeudi 	vendredi 	samedi



EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : 27-03 heure : 18:25	date : 28-03 heure : 18:28	date : 29-03 heure : 18:32	date : 30-03 heure : 18:35	date : 31-03 heure : 18:38	date : 01-04 heure : 18:29	date : 02-04 heure : 18:30
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : 03-04 heure : 18:31	date : 04-04 heure : 18:30	date : 05-04 heure : 18:32	date : 06-04 heure :	date : 07-04 heure : 25:56	date : 08-04 heure : 23:55	date : 09-04 heure : 23:55
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : 10-04 heure : 2:54	date : 11-04 heure :	date : 12-04 heure : 05:11	date : 13-04 heure : 6:08	date : 15-04 heure : 05:03	date : 16-04 heure : 02:03	date : 17-04 heure : 02:03
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : 18-04 heure : 3:03	date : 19-04 heure : 3:03	date : 20-04 heure : 05:00	date : 21-04 heure :	date : 23-04 heure : 18:48	date : heure :	date : heure :

EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- ❶ Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- ❷ Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- ❸ Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date: 18/02/04 heure: 18:25	date: 25/02/04 heure: 18:28	date: 27/02/04 heure: 18:30	date: 28/02/04 heure: 18:35	date: 31/03/04 heure: 18:58	date: 1 avril heure: 18:29	date: 2 avril heure: 18:30
date: 2 avril heure: 18:32	date: 4 avril heure: 18:33	date: 5 avril heure: 18:33	date: 6 avril heure: 23:55	date: 7 avril heure: 23:55	date: 8 avril heure: 23:53	date: 9 avril heure: 24:00
date: 10 avril heure: 24:00	date: 11 avril heure: 24:00	date: 12 avril heure: 5:00	date: 13 avril heure: 5:00	date: 14 avril heure: 5:00	date: 15 avril heure: 5:02	date: 16 avril heure: 5:05
date: 17 avril heure: 3:04	date: 18 avril heure: 5:00	date: 19 avril heure: 5:00	date: 20 avril heure: 5:00	date: 21 avril heure: 5:00	date: 22 avril heure: 5:00	date: 23 avril heure: 18:47



EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert l'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : 2-1-08 heure : 19:48	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____	date : _____ heure : _____



EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



<p>dimanche</p> <p>date : 27 Mars heure : 18h30</p>	<p>lundi</p> <p>date : 28 Mars heure :</p>	<p>mardi</p> <p>date : 29 Mars heure : 18h02</p>	<p>mercredi</p> <p>date : 30 Mars heure : 18h30</p>	<p>jeudi</p> <p>date : 31 Mars heure : 18h30</p>	<p>vendredi</p> <p>date : 1 Avril heure : 18h30</p>	<p>samedi</p> <p>date : 2 Avril heure : 18h30</p>
<p>dimanche</p> <p>date : 5 Avril heure : 10h30</p>	<p>lundi</p> <p>date : 6 Avril heure : 18h30</p>	<p>mardi</p> <p>date : 7 Avril heure : 18h30</p>	<p>mercredi</p> <p>date : 8 Avril heure : 18h30</p>	<p>jeudi</p> <p>date : 9 Avril heure : 18h30</p>	<p>vendredi</p> <p>date : 10 Avril heure : 18h30</p>	<p>samedi</p> <p>date : 11 Avril heure : 23h30</p>
<p>dimanche</p> <p>date : 10 Avril heure :</p>	<p>lundi</p> <p>date : 11 Avril heure :</p>	<p>mardi</p> <p>date : 12 Avril heure :</p>	<p>mercredi</p> <p>date : 13 Avril heure :</p>	<p>jeudi</p> <p>date : 14 Avril heure :</p>	<p>vendredi</p> <p>date : 15 Avril heure :</p>	<p>samedi</p> <p>date : 16 Avril heure :</p>
<p>dimanche</p> <p>date : 17 Avril heure :</p>	<p>lundi</p> <p>date : 18 Avril heure :</p>	<p>mardi</p> <p>date : 19 Avril heure :</p>	<p>mercredi</p> <p>date : 20 Avril heure :</p>	<p>jeudi</p> <p>date : 21 Avril heure :</p>	<p>vendredi</p> <p>date : 22 Avril heure :</p>	<p>samedi</p> <p>date : 23 Avril heure :</p>

EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !


Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.








- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?








Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune








Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.








Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
						
date : 04/08	date : 05/08	date : 06/08	date : 07/08	date : 08/08	date : 09/08	date : 10/08
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
						
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
						
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
						
date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____	date : _____
heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____	heure : _____

EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date: 27 mai heure: 18:25	date: 28 mai heure: 17:20	date: 29 mai heure: 16:52	date: 30 mai heure: 16:35	date: 31 mai heure: 18:38	date: 1 juin heure: 18:01	date: 2 juin heure: 18:30
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date: 3 avril heure: 16:31	date: 4 avril heure: 18:38	date: 5 avril heure: 18:32	date: 10 avril heure: 18:33	date: 7 avril heure: _____	date: 8 avril heure: _____	date: 9 avril heure: _____
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date: 10 avril heure: _____	date: 11 avril heure: _____	date: 12 avril heure: _____	date: 13 avril heure: _____	date: 14 avril heure: _____	date: 15 avril heure: _____	date: 16 avril heure: _____
dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date: 17 avril heure: _____	date: 18 avril heure: _____	date: 19 avril heure: _____	date: 20 avril heure: _____	date: 21 avril heure: _____	date: 22 avril heure: _____	date: 23 avril heure: _____



EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !


Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.





























- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
						
date : 28 AVR heure : 18 H 47	date : 29 AVR heure : 18 H 49	date : 30 AVR heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :
						
date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :
						
date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :
						
date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :	date : heure :

EXPÉRIENCE

Observons les phases de la Lune !

Pour réaliser cette activité, il te faut un crayon de même que la fiche d'observation ci-dessous.

- 1 Note la date et l'heure à laquelle tu fais tes observations.
- 2 Dessine la forme de la Lune telle qu'elle t'apparaît dans le ciel.
- 3 Refais la même observation tous les jours pendant quelques semaines. Que remarques-tu ? La Lune a-t-elle toujours la même forme ? Es-tu capable de prévoir de quoi la Lune aura l'air au cours des prochains jours en te basant sur son aspect actuel ?

Truc : Si le temps couvert t'empêche d'observer la Lune, navigue sur le site Internet des Astro-Jeunes <http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Astro-Jeunes/> et consulte la liste des hyperliens. L'un d'eux te guidera vers un site présentant l'aspect actuel de la Lune

Consulte le livre « La Terre, la Lune et le Soleil » (Éditions Michel Quintin) aux pages 26 et 27 pour comprendre l'origine des phases de la Lune.

Les phases de la Lune



dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
date: 27/04 heure: 18:30	date: 28/04 heure: 18:30	date: 29/04 heure: 18:30	date: 30/04 heure: 18:30	date: 31/04 heure: 18:30	date: 1/05 heure: 18:30	date: 2/05 heure: 18:30
date: 3/05 heure: 18:30	date: 4/05 heure: 18:30	date: 5/05 heure: 18:30	date: 6/05 heure: 18:30	date: 7/05 heure: 18:30	date: 8/05 heure: 18:30	date: 9/05 heure: 18:30
date: 10/05 heure: 18:30	date: 11/05 heure: 18:30	date: 12/05 heure: 18:30	date: 13/05 heure: 18:30	date: 14/05 heure: 18:30	date: 15/05 heure: 18:30	date: 16/05 heure: 18:30
date: 17/05 heure: 18:30	date: 18/05 heure: 18:30	date: 19/05 heure: 18:30	date: 20/05 heure: 18:30	date: 21/05 heure: 18:30	date: 22/05 heure: 18:30	date: 23/05 heure: 18:30

Annexe 5 : Réponses aux questionnaires post-tests ne montrant pas de différence significative par rapport aux réponses aux questionnaires pré-tests

Nous présentons ici les réponses aux questionnaires post-tests qui ne montraient pas de différence importante et significative par rapport aux réponses aux questionnaires pré-tests. Le lecteur est invité à se référer à la section 4.2.3 pour les réponses aux autres questions des questionnaires post-tests.

Questionnaire no 1

2. Peux-tu nommer des astres que l'on peut voir dans le ciel la nuit ? Inscris-en autant que tu veux.

Adam : La Lune, étoiles.

Benoît : Vénus, Lune, Mars, les étoiles.

Bernard : Les étoiles, les planètes, la Lune.

Louis : Vénus, Mercure, Lune et Mars.

Nadine : Des étoiles, la Lune, certaines planètes.

Maude : La Lune, les étoiles, parfois d'autres planètes, des météores.

Les réponses au post-test sont demeurées assez semblables à ce qu'elles étaient en prétest, certains ajoutant les planètes, Mercure ou les étoiles aux éléments déjà mentionnés. Ces réponses assez semblables du pré- au post-test sont tout-à-fait prévisibles et s'expliquent par le fait que le ciel de nuit n'a fait l'objet d'aucune mention particulière durant la session. Aucun apprentissage particulier n'était donc attendu à ce sujet.

Questionnaire no 2

1. As-tu déjà vu la Lune dans le ciel la nuit ? Encerle ta réponse.

Tous les répondants ont répondu oui à cette question, tant en prétest qu'en post-test, un résultat tout-à-fait prévisible et peu surprenant. La Lune est en effet un objet facile à repérer dans le ciel, même par de très jeunes enfants.

Questionnaire no 3

1. Est-ce que la Lune a toujours la même apparence dans le ciel ? Est-ce qu'elle nous apparaît toujours sous la même forme ? Encerle ta réponse.

Tous les répondants ont répondu non à cette question, tant en prétest qu'en post-test, un résultat tout-à-fait prévisible et peu surprenant. Les phases de la Lune demeurent un phénomène courant qui apparaît sur les calendriers et est facilement observable en quelques jours à l'œil nu, même par de très jeunes enfants.

Questionnaire no 4

2. Selon toi, quelle est la forme réelle de la Lune ? Par exemple, a-t-elle la forme d'un croissant, est-elle plate et ronde comme une assiette ou sphérique comme un ballon ? A-t-elle une autre forme ? Décris ta réponse.

- Adam : Ronde comme un ballon.
- Benoît : Elle est sphérique.
- Bernard : C'est une sphère.
- Louis : Elle a la forme sphérique comme un ballon.
- Nadine : Sphérique comme un ballon.
- Maude : Elle a une forme sphérique.

La forme sphérique de la Lune ne semble pas poser problème aux participants, qui ont répondu de manière adéquate tant au prétest qu'au post-test.

4. Selon toi, comment la Lune se déplace-t-elle dans le ciel ? Est-ce qu'elle tourne autour de la Terre, ou du Soleil, ou des deux ? Est-ce plutôt le Soleil et la Terre qui tournent autour de la Lune ? Est-ce autre chose ? Dessine ta réponse ci-dessous en montrant qui tourne autour de quoi. Utilise des flèches pour indiquer le sens des déplacements. Décris ensuite les mouvements de la Lune dans tes mots sur les lignes ci-dessous.

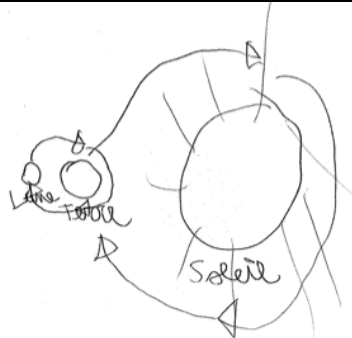



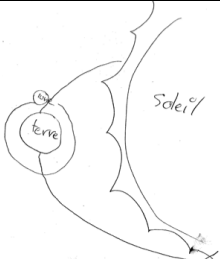
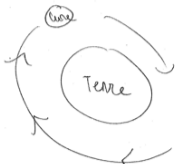
Adam : [Pas de texte.]	
Benoît : La Lune tourne autour de la Terre qui tourne autour du Soleil.	
Bernard : La Lune va tourner autour de la Terre. La Lune va aussi tourner sur elle-même.	
Louis : La Terre tourne autour du Soleil, tandis que la Lune tourne autour de la Terre.	
Nadine : La Lune tourne autour de la Terre et la Terre autour du Soleil.	
Maude : La Lune tourne autour de la Terre et tourne autour d'elle-même.	

Figure 24. Dessins des participants en réponse à la question 4 du questionnaire post-test no 4.

Il semble très clair dans l'esprit des six participants que la Lune tourne autour de la Terre et que la Terre tourne autour du Soleil (voir figure 24). Le sens de révolution (antihoraire pour un observateur situé au-dessus du pôle nord de la Terre) n'est pas respecté par la majorité, mais il s'agit d'un détail qui n'a pas fait l'objet d'une démonstration

explicite sous le dôme. Ce fait pourrait toutefois être mentionné de manière explicite lorsque nous nous trouvons devant une vue polaire de l'orbite de la Lune autour du Soleil et que le mouvement antihoraire est alors évident.

5. Si tu pouvais placer le Soleil, la Terre et la Lune côte à côte et les classer du plus petit au plus grand, laquelle des listes ci-dessous indiquerait le bon ordre ? Encerle ta réponse.

- Plus petit < Moyen < Plus grand**
- A Terre < Lune < Soleil**
B Lune < Terre < Soleil
C Soleil < Lune < Terre
D Soleil < Terre < Lune
E La Terre, la Lune et le Soleil ont environ la même taille

Adam : B [D est à demi encerclé]
 Benoît : D
 Bernard : B
 Louis : B
 Nadine : B
 Maude : B

Les réponses sont demeurées remarquablement semblables entre le prétest et le post-test.

6. Imagine que tu construis un modèle réduit de la Terre, de la Lune et du Soleil. Si, dans ton modèle, la Terre avait la taille d'un ballon de basket ball, quelle serait la taille de la Lune et du Soleil à la même échelle ? Encerle tes réponses.

- | | |
|---|---|
| Dans mon modèle, la Lune aurait la taille... | Dans mon modèle, le Soleil aurait la taille... |
| A d'une bille | A d'une bille |
| B d'une balle de tennis | B d'une balle de tennis |
| C d'un autre ballon de basket ball | C d'un autre ballon de basket ball |
| D d'un gros ballon de plage | D d'un gros ballon de plage |
| E d'une montgolfière | E d'une montgolfière |

Adam : B – D
 Benoît : B – D

Bernard : A – D
 Louis : B – E
 Nadine : B – E
 Maude : B – E

Ici aussi les réponses sont demeurées remarquablement semblables entre le prétest et le post-test. Dans sa réponse au post-test, Bernard a réduit la taille relative de la Lune. Maude s'est corrigée pour donner une bonne réponse au post-test, elle qui avait hésité entre D et E au prétest. Cette notion de la taille relative des objets ne semble toutefois pas poser problème et la séance sous le dôme n'a aucun effet sur elle – d'ailleurs, il n'a pas été question de manière explicite des tailles relatives sous le dôme.

7. Laquelle des listes suivantes situe les objets par ordre de distance croissante par rapport à toi, du plus proche de toi au plus éloigné ? Encerle ta réponse.

(Note : Alpha du Centaure est une étoile semblable au Soleil.)

Plus proche ———> Plus éloigné
A Nuages, Alpha du Centaure, Soleil, Lune
B Alpha du Centaure, Soleil, Lune, nuages
C Soleil, Lune, Alpha du Centaure, nuages
D Lune, nuages, Soleil, Alpha du Centaure
E Nuages, Lune, Soleil, Alpha du Centaure

Adam : E
 Benoît : E
 Bernard : E
 Louis : E
 Nadine : E
 Maude : E

Ici encore, les réponses sont demeurées remarquablement semblables entre le prétest et le post-test, sauf pour Benoît, qui a répondu incorrectement au prétest, mais s'est repris au post-test pour offrir une bonne réponse, soit E. Le fait de devoir traverser les nuages pour se rendre en orbite autour de la Terre, puis voyager encore pour se rendre à la Lune, aide sans doute à situer les objets les uns par rapport aux autres. Cette notion de distances relatives n'a toutefois pas fait l'objet d'un enseignement explicite sous le dôme.