



HAL
open science

L'image de l'activité scientifique au travers de l'histoire de la dioptrique : élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement pour la classe de seconde; rapport des enseignants tunisiens à l'enseignement des sciences et à l'innovation

Mohamed Moncef Slaïmia

► **To cite this version:**

Mohamed Moncef Slaïmia. L'image de l'activité scientifique au travers de l'histoire de la dioptrique : élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement pour la classe de seconde; rapport des enseignants tunisiens à l'enseignement des sciences et à l'innovation. Education. Université Paris Sud - Paris XI; Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue (Tunis), 2014. Français. NNT : 2014PA112030 . tel-00978508

HAL Id: tel-00978508

<https://theses.hal.science/tel-00978508>

Submitted on 14 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse en cotutelle internationale soutenu par la
Région  Île de France

UNIVERSITE PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE EA 400 : "*Savoirs scientifiques : épistémologie, histoire des sciences, didactique des disciplines* "

Laboratoires : *Didactique des Sciences d'Orsay -EST / Laboratoire de didactique et de psychologie de l'Institut Supérieur de l'Éducation et de la Formation Continue-Tunis.*

DISCIPLINE Didactique de la physique

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenu le 13 février 2014

Par

Mohamed Moncef Slaïmia

L'image de l'activité scientifique au travers de l'histoire de la dioptrique: élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement pour la classe de seconde; rapport des enseignants tunisiens à l'enseignement des sciences et à l'innovation.

Directeur de thèse :
Co-directeur de thèse :

Laurence Maurines
Nebil Ben Nassib

Professeur : Université Paris-Sud
Professeur : Université de Carthage

Composition du jury :

Président du jury :
Rapporteurs :

Hélène Gispert
Jean Marie Boilevin
Yousef Ben Othman
Hélène Gispert
Mourad Bahloul

Professeur : Université Paris-Sud
Professeur : Université Européenne de Bretagne
Maître de conférences: Université de Tunis El Manar
Professeur : Université Paris-Sud
Professeur : Université de Sfax

Dédicaces

A la mémoire de mon père et de ma mère

AMOR et ZEIDA

A mes enfants

A tous ceux qui m'aiment

Remerciements

*Au terme de ce travail je tiens à remercier vivement **Mme Laurence Maurines** d'avoir accepté d'encadrer cette thèse, de m'avoir apporté de l'aide, des conseils, de l'encouragement, du soutien et de la confiance dans les pires moments de doutes et de réticences. Veuillez trouver ici l'expression de ma reconnaissance et ma haute considération.*

*Mes remerciements les plus respectueux à **Mr Nebil Bennessib** qui m'a toujours accueilli avec bienveillance. On regrette son absence ces dernières années.*

*Je souhaiterais exprimer toute ma gratitude à Messieurs **Jean Marie Boilevin** et **Yousef Ben Othman** pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.*

*Mes sincères remerciements vont aussi à **Mme Hélène Gispert** qui a accepté de présider le jury et d'accorder du temps à l'examen de mon manuscrit ainsi qu'à **Mr Mourad Bahloul** qui a accepté de faire partie du jury et d'examiner mon travail.*

*Un grand merci pour les élèves du lycée secondaire de Zarzis, à son proviseur **Mr Mohamed Ben Daou**, au professeur **Mr Habib Khémiri**, au professeur Formateur **Mr Mongi Laoueib**, aux membres de l'audio-visuel du CREFOC de Médenine. Grâce à eux tous, j'ai pu réaliser les expérimentations.*

Mon travail est né dans deux laboratoires : le laboratoire DidaSco-Didactique des Sciences d'Orsay - et le laboratoire de didactique et de psychologie de l'Institut Supérieur de l'Education et de la Formation Continue à Tunis. Que tous leurs membres soient remerciés.

Je remercie aussi pour leur accueil chaleureux, tous les membres du groupe GHDSO d'Orsay.

Sommaire

Introduction	1
Partie 1 : Objet et cadre de l'étude	6
Chapitre 1 : Scientific literacy et culture scientifique.....	8
Chapitre 2 : La Nature des Sciences dans l'enseignement des sciences.....	24
Chapitre 3 : Les représentations de la nature des sciences chez les élèves et enseignants	60
Chapitre 4: Les approches pour travailler la NoS dans l'enseignement des sciences	74
Chapitre 5 : Problématique, hypothèses et questions de recherche.....	83
Partie 2 : Cadre théorique de référence	86
Chapitre 1 : Cadre théorique historique	87
Chapitre 2 : Cadre théorique didactique	139
Partie 3 : Conception de l'étude	177
Chapitre 1 : Méthodologie 1 : conception de la situation d'enseignement innovante et la formation de l'enseignant.....	178
Chapitre 2 : Méthodologie 2 : le suivi des ingénieries didactiques.....	195
Partie 4 : Les résultats obtenus lors de la séance de formation des enseignants	201
Introduction	202
Chapitre 1 : Le rapport à l'enseignement des sciences des enseignants	203
Chapitre 2 : Les représentations de la nature des sciences des enseignants	212
Chapitre 3 : La posture face à l'innovation pédagogique	218
Chapitre 4 : La posture face à la séance de formation	228
Conclusion	230
Partie 5 : Les résultats obtenus lors des deux expérimentations	232
Chapitre 1 : La première expérimentation avec les élèves.....	233
- Du côté des élèves : les questionnaires	
- Du côté de l'enseignant : le film/ l'entretien	
Chapitre 2 : La deuxième expérimentation avec les élèves	256
- Du côté des élèves : les questionnaires	
- Du côté de l'enseignant : l'entretien	
Chapitre 3 : La comparaison des deux expérimentations avec les élèves	271
Chapitre 4 : La comparaison des conceptions des enseignants et des élèves	283
Conclusion	391
Conclusion générale	392
Références bibliographiques	300
Annexes	324
1. Textes historiques	325
2. Questionnaires	343
3. Les tests de chi 2	357

Table des matières

Introduction	1
1. Choix du sujet	1
2. Plan du mémoire	4
Partie 1 : Objet et cadre de l'étude	6
Introduction.....	7
Chapitre 1	8
Scientific literacy et culture scientifique	8
1. Introduction.....	8
2. Les enjeux et les arguments en faveur de la « scientific literacy »: aperçu historique.....	9
2.1. Les années 50	9
2.2 Le début des années quatre-vingts	10
2.3 La fin des années 80 : argument économique vs argument démocratique.....	11
3. Les différents types de culture scientifique et les compétences et connaissances en jeu	15
4. La culture scientifique et les programmes d'enseignement.....	21
Chapitre 2	24
La nature des sciences dans l'enseignement des sciences.....	24
1. Enjeux et contenus d'enseignement	24
1.1. Introduction.....	24
1.2. Les enjeux.....	25
1.3. Les contenus d'enseignement relatifs à la NoS : aperçu historique	30
1.4. L'approche de Lederman : le point de vue consensuel.....	32
1.5. L'approche de Irzik et Nola : la ressemblance familiale	51
1.6. Conclusion	58
Chapitre 3	60
Les représentations de la nature des sciences chez les élèves et enseignants.....	60
1. Introduction.....	60
2. Analyses des conceptions des élèves sur la nature des sciences.....	61
2.1. Introduction.....	61
2.2. Sur les sciences.....	62
2.3. Sur les scientifiques	64
2.4. Conclusion	67

3. Les conceptions spontanées des enseignants.....	68
3.1. Introduction.....	68
3.2. Étude menée par Désautels et Larochelle.....	69
3.3. Étude menée par Roletto	70
Chapitre 4	74
Les approches pour travailler la NoS dans l'enseignement des sciences	74
1. Introduction.....	74
2. L'approche implicite	75
3. L'approche explicite et réflexive	77
4. L'approche historique.....	77
4. Conclusion	82
Chapitre 5	83
Problématique, hypothèses et questions de recherche.....	83
Partie2	86
Cadre théorique de référence.....	86
Chapitre1	87
Cadre théorique historique	87
1. Epistémologie et Histoire	87
1.1. La nature des sciences au travers de l'histoire des sciences.....	87
2. Histoire de la dioptrique.....	92
2.1. Optique antique	92
2.2. Moyen Âge : la dioptrique dans la civilisation musulmane.....	105
2.3. La dioptrique en Occident	115
2. 3. Synthèse générale	136
Chapitre2	139
Cadre théorique didactique.....	139
1. Introduction.....	139
2. Le choix d'une approche de transposition didactique : savoir savant vs pratiques sociales	141
2.1. Le concept de transposition didactique	141
2.2. Le concept de « pratique sociale de référence »	144
3. Le choix des objectifs d'enseignement en lien avec les pratiques des scientifiques	147
3.1. La notion d'objectif – obstacle	147
3.2. L'inductivisme : une conception qui fait obstacle à la diversité des démarches et consolide le mythe de la méthode scientifique.	150

3.3. La découverte des lois, une conception qui fait obstacle à la diversité des enjeux poursuivis par le scientifique.	152
4. L'élaboration d'un contenu d'enseignement visant à montrer la diversité des démarches scientifiques et des enjeux	153
4.1. La transposition didactique des démarches scientifiques	153
4.2. La transposition didactique des enjeux poursuivis par les scientifiques	161
4.3. La transposition didactique des documents historiques originaux.....	163
5. Le choix d'une organisation pour la situation d'enseignement	165
5.1. La démarche d'investigation	165
5.2. Démarche d'investigation et situation-problème	171
5.3. Démarche d'investigation et socio-constructivisme	172
5.4. Démarche d'investigation et démarche hypothético-déductive	173
5.5. Démarche d'investigation et situation adidactique	175
Partie 3	177
Conception de l'étude.....	177
Chapitre 1	178
Méthodologie 1 : conception de la situation d'enseignement innovante et de la formation de l'enseignant	178
1. Introduction.....	178
2. Ingénierie didactique.....	178
2.1. Définition.....	178
2.2. Les différentes phases de la méthodologie d'ingénierie didactique.....	180
3. Panorama de la recherche	181
4. Élaboration des séquences d'enseignement.....	182
4.1. Objectifs d'apprentissage de nature épistémologique	182
4.2. Des situations d'investigation documentaire et une synthèse collective sous forme de tableau.....	183
5. Organisation de la séquence	185
6. La première expérimentation.....	187
6.1. Les contraintes et les solutions trouvées	187
6.2. La séance de formation-test et la modification de la séquence envisagée	188
7. La deuxième expérimentation.....	189
7.1. Introduction.....	189
7.2. La formation de l'enseignant.....	190
7.3. Modification de la séquence	192

8. Comparaison des deux séquences mises en place	193
Chapitre 2	195
Méthodologie 2 : le suivi des ingénieries didactiques	195
1. Introduction	195
1.1. Le suivi des élèves	195
1.2. Le suivi des enseignants	195
2. Elaboration des questionnaires	196
3. Le film et les questionnaires de retour sur la mise en œuvre des séquences d'enseignement et de la séance de formation	198
3.1. Le film	198
3.2. Les questionnaires	198
4. Traitement des questionnaires	199
4. 1. Analyse des données	199
3. 2. Cadre interprétatif	199
Partie 4	201
Les résultats obtenus lors de la séance de formation des enseignants	201
Introduction	202
Chapitre 1	203
Le rapport à l'enseignement des sciences des enseignants	203
1. Les objectifs d'enseignement	203
2. Le type de cours	204
3. La place de l'erreur dans l'enseignement	205
4. L'apport de l'histoire des sciences dans l'enseignement	206
5. La place de l'histoire des sciences dans l'enseignement	207
6. Les activités à proposer dans l'enseignement de physique-chimie	208
7. Conclusion	211
Chapitre 2	212
Les représentations de la nature des sciences des enseignants	212
1. L'élaboration de la loi de la réfraction	212
2. Les enjeux	213
3. Le rôle des expériences	213
4. Le rôle des mathématiques	214
5. Les méthodes	215
6. Le rôle de l'imagination et de la créativité	215
7. Conclusion	216

Chapitre3	218
La posture des enseignants face à l'innovation pédagogique.....	218
1. Question 1 : faire réfléchir les élèves sur l'élaboration des connaissances scientifiques.....	219
2. Question 2 : la diversité des enjeux et des démarches.....	219
3. Question 3 : le travail sur documents	220
4. Question 4 : les activités proposées aux élèves	220
5. Question 5 : l'intérêt des élèves.....	224
6. Question 6 : les difficultés prévisibles des élèves	224
7. Question 7 : les difficultés prévisibles de mise en œuvre de l'innovation.....	225
8. Question 8 : une banque de séquences d'enseignement fondées sur l'histoire des sciences ...	226
9. Une banque de situations d'enseignement fondées sur des démarches d'investigation	226
Chapitre4	228
Les enseignants face à la séance de formation	228
1. Question 1 : Ce qui est important	228
2. Question 2 : Ce qui est inutile	228
3. Question 3 : Ce qui a manqué	229
4. Question 4 : Suivre des formations complémentaires.....	229
Conclusion	230
Partie 5	232
Les résultats obtenus lors des deux expérimentations.....	232
Chapitre 1	233
La première expérimentation avec les élèves.....	233
1. Du côté des élèves : Les questionnaires.....	233
1.1. Questionnaire 1 : les conceptions des élèves au début de la séquence d'enseignement...	233
1.2. Questionnaire 2 : le rapport à l'innovation des élèves	241
1.3. Questionnaire 3 : les conceptions des élèves un mois après la séance innovante.....	246
2. Du côté de l'enseignant.....	249
2.1. Analyse du film	249
2.2. Analyse des questionnaires du formateur et de l'enseignant	254
Chapitre 2	256
La deuxième expérimentation avec les élèves.....	256
1. Du côté des élèves : Les questionnaires.....	256
1.1. Questionnaire 1 : les conceptions des élèves au début de la séquence innovante.....	256
1.2. Questionnaire2 : le rapport à l'innovation des élèves	262
1.3. Questionnaire3 : les conceptions des élèves un mois après la séquence innovante	267

2. Du côté de l'enseignant : le Questionnaire E2	270
Chapitre 3	271
Comparaison des résultats des deux expérimentations	271
1. Le rôle de l'expérience et de l'observation	271
2. Le rôle des mathématiques	273
3. L'imagination et la créativité	274
4. le nombre de scientifiques ayant contribué à l'élaboration de la loi des sinus	275
5. La diversité des enjeux	277
6. la diversité des méthodes	278
7. Le rapport à l'innovation des élèves	280
8. Conclusion	282
Chapitre 4	283
Comparaison des conceptions spontanées des enseignants à celles des élèves.....	283
1. Le rôle de l'expérience	283
2. Le rôle des mathématiques	285
3. L'imagination et la créativité.....	286
4. le nombre de scientifiques ayant contribué à l'élaboration de la loi des sinus.....	287
5. La diversité des enjeux	288
6. la diversité des méthodes	289
7. Conclusion	291
Conclusion générale	292
1. À propos des conceptions des élèves et des enseignants sur la nature des sciences.	292
1.1. Conceptions des élèves	292
1.2. Conceptions des enseignants	293
1.3. Similitude entre les conceptions des élèves et celles des enseignants sur la NoS	294
2. À propos du rapport des élèves à l'innovation et des enseignants à la séance de formation et à l'innovation.....	295
2.1. Rapport des élèves à l'innovation	295
2.2. Rapport des enseignants à la séance de formation et à l'innovation	296
3. Les limites de cette recherche et les perspectives.....	296
4. Implications pour l'enseignement.....	298
Références bibliographiques	300
Annexes.....	324
1. Les textes historiques	325
1.1. Ptolémée (v. 100-v. 170)	326

1.2. Abû Sa'd Alâbn Sahl (? 940-1000?).....	328
1.3. Al- Hasan abû Ali ben al-Hasan ben al- Haytham (965 - 1039- 40 ?).....	330
1.5. Galileo Galilei (1564-1642).....	334
1.6. Johannes Kepler (1571, 1630).....	336
1.7. Willebrord Snell van Royen ou Snellius (1580-1626).....	338
1.8. René Descartes (1596-1650).....	339
1.9. Pierre de Fermat (1601?-1665).....	341
2. Les questionnaires.....	343
2.1. Les questionnaires des élèves.....	344
2.2. Les questionnaires pour les professeurs en formation.....	349
2.3. Les questionnaires pour le formateur et l'enseignant.....	354
2.3.1. Le formateur : Questionnaire F.....	354
2.3.2. Le professeur qui a fait les séquences d'enseignement.....	355
3. Les tests de chi 2.....	357
1. Les enjeux.....	359
1.1. Comparaison des résultats obtenus avant expérimentation.....	359
1.2 Comparaison des résultats obtenus après expérimentation.....	359
1.3 Comparaison des résultats obtenus avant et après expérimentation.....	360
2. Les démarches.....	361
2.1. Comparaison des résultats obtenus avant expérimentation.....	361
1.2 Comparaison des résultats obtenus après expérimentation.....	361
1.3 Comparaison des résultats obtenus avant et après expérimentation.....	362
3. Les enjeux et les démarches.....	363
3.1. Avant expérimentation.....	363
3.2 Après expérimentation.....	363
3. Conclusion.....	364

Introduction

1. Choix du sujet

Depuis son indépendance, la Tunisie a entrepris plusieurs réformes de son système éducatif afin d'asseoir son développement sur une société qui soit en mesure de répondre aux besoins changeants d'une nation en développement. La dernière loi d'orientation pour « l'école de demain » (2002, articles 66 et 67) appelle à une amélioration continue de « *la qualité de l'apprentissage et du rendement de l'école et ce, par la recherche en éducation qui couvre les domaines de la pédagogie, les méthodes d'enseignement, les programmes, les moyens didactiques, les pratiques des enseignants, ...* ». Au travers de l'article 57, libellé en termes de compétences et capacités générales, elle appelle à la promotion d'un enseignement des sciences qui contribue à une éducation à la citoyenneté et à l'acquisition d'une culture scientifique, devenue depuis plusieurs années, à l'échelle internationale, un enjeu majeur de formation pour tous, futurs scientifiques ou non. Elle souligne qu'il lui revient aussi [à la recherche en éducation] de suivre les nouveautés à l'échelle internationale pour en tirer profit.

De nombreuses recherches soulignent que la culture scientifique à visée citoyenne suppose qu'un élève sache apprécier les sciences comme des éléments majeurs de la culture contemporaine, maîtrise non seulement les savoirs scientifiques de base mais possède aussi des connaissances sur la nature de ces savoirs, sur la façon dont ils ont été élaborés et dont ils sont utilisés en vue d'expertise (Driver et al, 1996 ; Hurd, 1958; Laugksch, 2000 ; Norris & Philips, 2003 ; PISA, 2006; Schamos, 1995). Ces connaissances sur la nature des sciences doivent lui permettre d'en comprendre les fondements idéologiques, sociaux, culturels ainsi que les rapports entretenus avec les sphères politiques, économiques, religieuses, militaires, de donner un sens à des questions socio-scientifiques et de participer au processus de prise de décision (Hodson, 1988 ; Matthews, 1994 ; Driver et al, 1996).

Conformément à la loi d'orientation de 2002 et aux recherches précitées, les actuels programmes de sciences physiques tunisiens mettent en avant l'acquisition d'une culture scientifique à visée citoyenne. Ils précisent ainsi, dans la partie introductive « *que*

l'enseignement au secondaire vise chez les élèves à développer des éléments de culture scientifique qui les aideront à se faire une représentation rationnelle des phénomènes naturels environnants et à se situer dans le monde contemporain ».

Alors que l'enjeu d'une culture scientifique citoyenne vise non seulement la compréhension des connaissances en sciences (théories, lois, concepts scientifiques fondamentaux) mais aussi la compréhension des connaissances à propos des sciences elles-mêmes, c'est-à-dire, de la nature des sciences, les actuels programmes et manuels de sciences physiques se centrent seulement sur les contenus scientifiques (savoirs et savoir-faire) et passent sous silence le processus de génération des connaissances et du contexte de leur élaboration. Ce silence porte sur les aspects de la nature des sciences susceptibles d'être enseignés comme objectifs précis d'apprentissage, sur la façon de mettre en œuvre un tel enseignement en classe et sur la nature de la formation à dispenser aux enseignants afin de les adapter avec succès à ces nouvelles approches.

Certaines activités préconisées par ces documents, en particulier les expériences de laboratoire, sont souvent présentées comme des recettes que les élèves doivent exécuter étape par étape, loin de toute prise de décision à leur encontre, pour obtenir finalement des résultats prédestinés totalement dissociés de l'influence humaine. On est donc loin d'une compréhension des sciences comme processus et entreprise humaine où foisonnent dimensions sociales et culturelles.

En outre, les programmes¹ tunisiens véhiculent une image erronée des sciences, en particulier en ce qui concerne les démarches utilisées par les scientifiques. Dans la partie introductive, on continue à voir apparaître « la démarche » scientifique et « la méthode » scientifique au singulier : « *Ils peuvent ainsi mettre en œuvre la démarche scientifique aussi bien pour une reconstruction du savoir que pour répondre à des questions susceptibles de les intéresser directement* » ; « [...] former l'esprit à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique constructive et à l'honnêteté intellectuelle. » Un tel langage n'aide ni les enseignants, ni les élèves à se construire une image adéquate des sciences.

La volonté politique, formulée dans les textes de la loi d'orientation de l'éducation et dans la partie introductive des programmes, de promotion d'un enseignement des sciences contribuant

¹ Programmes de sciences physiques, 1^{ère} & 2^{ème} année de l'enseignement secondaire- Direction générale des programmes & de la formation continue. Ministère de l'éducation de la République tunisienne.

à une éducation à la citoyenneté et à la formation de personnes critiques se heurte à un constat plutôt négatif. Les programmes et les manuels semblent strictement liés à une tradition de communiquer les faits et les produits finaux des sciences tout en négligeant comment cette connaissance a été construite. En fait, la dimension épistémologique de l'apprentissage est totalement absente dans ces documents.

À l'étranger, un vaste mouvement s'est développé outre-Atlantique et en Europe visant l'introduction de la dimension épistémologique dans l'apprentissage des sciences grâce à l'utilisation de l'histoire des sciences et des techniques. Il est en œuvre depuis plus de trois décennies dans les pays anglo-saxons (Matthews, 1994, 2003 ; Rutherford, 2001). Ce positionnement est connu sous le nom de NoS : Nature of Science. Il permet de décliner des objectifs précis d'apprentissage sur le plan épistémologique comme le montrent les publications récentes du groupe d'experts travaillant au Project 2061 lancé en 1986 aux États-Unis par l'AAAS (*American Association for the Advancement of Science*). En Europe, un projet intitulé HiPST (*History and Philosophy in Science Teaching*) a rassemblé les chercheurs de sept pays et Israël pendant trois ans (Höttecke et al, 2010 ; Höttecke & Silva, 2010).

Différents documents de réformes et études indiquent que l'inclusion de la nature des sciences dans l'enseignement permet d'améliorer les conceptions des élèves et des enseignants sur les sciences et l'activité scientifique (American Association for the Advancement of Science [AAAS], 1990, 1993; Klopfer, 1969; National Research Council [NRC], 1996 ; National Science Teachers Association [NSTA], 1982 ; Niaz, 2009), d'accroître leur intérêt pour les sciences (Matthews, 1994 ; Mc Comas, 1998), de motiver les élèves pour les études scientifiques (Solbes & Traver, 2003), d'améliorer leur apprentissage des contenus scientifiques (Lederman, 1998) et de promouvoir chez eux une meilleure prise de décision sociale (Hodson, 2003 ; Mc Comas, 1998).

Les constats précédents nous ont conduits à examiner la possibilité d'introduire des propositions innovantes pertinentes afin de travailler l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique et d'inculquer aux élèves une culture humaniste.

C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de débiter une recherche afin de contribuer à la réflexion sur les objectifs d'enseignement à poursuivre et sur les méthodes susceptibles d'aider à les atteindre pour répondre à cette demande. Le processus de réformes engagées depuis le printemps 2011 en Tunisie, devrait conduire à une modification des programmes d'enseignement.

Notre travail est donc ancré dans le cadre de la didactique curriculaire (Martinand, 2003) et s'inscrit dans la continuité du programme de recherche mené en 2009 et 2011 par le groupe Didasco en France. Il examine la possibilité d'introduire des éléments historiques dans les cours de physique du secondaire en réponse à un enjeu d'apprentissage d'ordre épistémologique relatif à l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. Cette position, originale en France, l'est également en Tunisie. Le thème scientifique retenu a donné lieu à peu de travaux en didactique : il s'agit de l'histoire de la dioptrique. Il amène à questionner les conditions de transfert de propositions innovantes d'un contexte éducatif à un autre car penser la réforme des programmes non seulement au niveau de ce qui est formel ou prescrit, mais aussi, de ce que disent les enseignants, le déclaré, et de ce qu'ils font en salle de classe, le réel ou le co-construit avec les élèves, c'est aussi penser, le *perfectionnement* ou, le développement professionnel des enseignants afin de les adapter aux innovations préconisées (de Landsheere, 1972).

2. Plan du mémoire

Ce mémoire comporte cinq parties.

La première partie présente l'objet et le cadre de l'étude.

Nous exposons tout d'abord l'état des recherches portant sur la « Scientific literacy » et la culture scientifique, puis dégageons l'importance de la prise en compte d'une réflexion sur la nature des sciences dans l'enseignement d'une part et examinons les enjeux assignés à l'introduction de l'histoire des sciences dans les cours de sciences d'autre part. Cela contribuera à positionner notre recherche par rapport aux travaux didactiques antérieurs. Nous terminons par développer la problématique, les hypothèses et les questions de recherche.

La deuxième partie présente le cadre historique et didactique.

Le cadre historique comporte une analyse épistémologique permettant une définition appropriée de la nature des sciences. Les sciences y sont présentées comme une entreprise humaine réalisée dans un contexte socio-culturel, technique et politique d'une époque donnée. Suit un panorama de l'histoire de la dioptrique orientée par les objectifs d'apprentissage épistémologiques retenus pour la séquence innovante : les enjeux de la physique et les démarches du physicien.

Le cadre didactique relatif à l'enseignement/apprentissage des objectifs épistémologiques précisés ci-dessus couvre la didactique curriculaire, cadre d'ancrage de notre travail, la transposition didactique, la théorie d'apprentissage socio-constructiviste, la démarche d'investigation et l'ingénierie didactique.

La troisième partie présente la conception de l'étude.

Nous commençons par la présentation du panorama de la méthodologie utilisée. Celle-ci repose sur deux types d'études. Les études théoriques visent la construction d'un cadre historique et didactique de référence pour fonder l'élaboration de l'innovation pédagogique et l'expérimentation en classe. Les études empiriques ont été conduites au cours de deux ingénieries. La première concerne la transmission de l'innovation pédagogique aux enseignants, la seconde l'expérimentation de l'innovation pédagogique en classe. Le suivi de ces ingénieries a été réalisé essentiellement à l'aide de questionnaires ouverts ou fermés. Un film et deux entretiens sous forme de questionnaires les complètent.

La quatrième partie est consacrée aux résultats obtenus lors de la séance de formation des enseignants. Ceux-ci concernent les conceptions de la nature des sciences, leurs rapports à l'enseignement des sciences ainsi que leurs postures face à l'innovation pédagogique et à la séance de formation.

Enfin, la cinquième et dernière partie présente les résultats obtenus lors des deux expérimentations en classe. Ceux-ci portent sur les conceptions des élèves de la nature des sciences ainsi que sur leur rapport à l'innovation. Suivent la comparaison des résultats des deux expérimentations et celle des conceptions des enseignants et des élèves sur les sciences et l'élaboration des connaissances scientifiques.

Dans la conclusion générale, nous commençons d'abord, par récapituler les principaux résultats obtenus relatifs aux conceptions des élèves et enseignants d'une part, les rapports des élèves et enseignants à l'innovation d'autre part, ensuite les rapports des enseignants à la séance de formation. Enfin, nous présentons les limites de notre travail, les questions à creuser puis proposons quelques pistes de recherche ultérieures.

Partie 1 : Objet et cadre de l'étude

Chapitre 1 : Scientific literacy et culture scientifique

Chapitre 2 : La Nature des Sciences dans l'enseignement des sciences

Chapitre 3: Les représentations de la nature des sciences chez les élèves et enseignants

Chapitre 4: Les approches pour travailler la NoS dans l'enseignement des sciences

Chapitre 5 : Problématique, hypothèses et questions de recherche

Introduction

Depuis plus de deux décennies, la « culture scientifique » est devenue un slogan internationalement reconnu pour l'éducation aux sciences, un enjeu de formation pour tous, un leitmotiv pour une éducation à la citoyenneté, à la responsabilité civique et sociale en vue d'une prise de décision fondée rationnellement (Albe, 2011 ; Hodson, 2003).

Mais il n'y a pas d'accord unanime sur une définition précise de ce concept. La diversité des interprétations et objectifs associés rend sa signification complexe et controversée.

Un aperçu des débats existant dans la littérature autour de ce concept permet d'en identifier les enjeux socio-éducatifs et les différentes significations, de cerner les connaissances qu'elle mobilise. Il vise par ailleurs à déterminer les caractéristiques sur lesquelles se forge un consensus et à montrer l'interrelation entre culture scientifique et l'une de ses composantes essentielles : la nature des sciences.

Nous nous intéressons ensuite à la nature des sciences dans l'enseignement.

Nous commençons par préciser sa signification en référence aux différents courants de recherches et aux documents standards puis indiquons les aspects de la nature des sciences sur lesquelles existe un accord. Nous poursuivons par les conceptions des enseignants et des élèves sur les sciences et les scientifiques, en particulier celles portant sur les modalités d'élaboration des savoirs.

Nous examinons ensuite les méthodes pédagogiques recommandées pour remédier aux conceptions des élèves et enseignants. Nous développons en particulier celles relatives à l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement.

Nous concluons cette partie par la présentation de la problématique, des questions et hypothèses de recherche.

Chapitre 1

Scientific literacy et culture scientifique

1. Introduction

Depuis plusieurs années, beaucoup d'associations et d'institutions internationales, parmi lesquelles l'AAAS (American Association for the Advancement of Science), l'OCDE, l'UNESCO, les concepteurs de programmes, des groupes de réflexion (think tanks), appellent à la promotion de la « scientific literacy » et en font un objectif éducatif contemporain.

Si l'expression « scientific literacy » est utilisée depuis quatre décennies, ce n'est pas toujours avec le même sens (Bybee, 1997). Ainsi, aux Etats-Unis, elle « désigne ce que le grand public doit savoir sur la science » (Durant, 1993, p. 129). En Grande Bretagne, la Royal Society (1985) affirme qu'elle « peut être un élément important dans la promotion de la prospérité nationale, en améliorant la qualité de la prise de décision publique et privée et dans l'enrichissement de la vie de l'individu » (p. 29) ou bien encore « commonly implies an appreciation of the nature, aims, and general limitations of science, coupled with some understanding of the more important scientific ideas » (Jenkins, 1994, p. 5345).

À cette diversité de visions s'ajoutent les controverses suscitées par la traduction de l'anglais vers le français. Selon Albe (2011), le terme correspond à différentes nominations selon les pays, ainsi « Une éducation aux sciences pour tous visant ce que d'aucuns nomment une culture scientifique et d'autres une alphabétisation ou une « littératie scientifique », en traduction de la « scientific literacy » des anglophones, est alors largement promue dans les pays concernés » (p. 119).

Alors que certains reconnaissent que le sens à accorder à l'expression « scientific literacy » réside dans son analogie avec la « littératie » (lire et écrire) (Baumert, 1997) et que cette expression a pour avantage majeur de résumer, au niveau de l'école, les intentions de l'enseignement des sciences, d'autres, lui préfèrent celui de « culture scientifique » afin de

désigner un sens plus complexe allant au-delà de la compréhension de l'écrit. Ainsi, le terme français de « *culture scientifique et technologique* » a été proposé lors du forum sur « l'alphabétisation » scientifique et technologique pour tous (UNESCO, 1993). Selon cette instance, cette traduction reflète clairement l'intention culturelle et suggère qu'une personne scientifiquement et technologiquement cultivée est une « *person who can function within society as a whole, rather than simply as a scientist in the workplace* » (Holbrook & Rannikmae, 2009, p. 276). Pour Solomon (1998), cité par Albe (2011), le terme « culture » exprime une connotation « élitiste » qui le place à un niveau supérieur par rapport au terme « alphabétisation ». D'autres s'opposent à une signification de la « culture scientifique » qui trace une ligne de partage entre sciences et humanités et invitent à intégrer les sciences au cœur de la culture humaniste (Robine, 2009, cité par Albe, 2011).

Laquelle des expressions « science literacy », « scientific literacy » ou « culture scientifique » est celle qui exprime le plus ce que l'on entend par une personne ou un individu « scientifiquement cultivé » ? La réponse n'est pas évidente. Cependant, nous adoptons la position prise par Albe (2011) qui « *consiste à suivre au plus près les termes employés dans les différents textes étudiés, et ainsi à reprendre souvent les termes anglais science literacy ou scientific literacy, voire à les traduire par 'culture scientifique'* » (p. 122).

Nous notons que ces débats ne sont pas surprenants vu la diversité des visions et interprétations associées à la culture scientifique ainsi que des objectifs poursuivis. Ceux-ci vont de la lecture et la compréhension d'articles scientifiques de journaux à l'acquisition de connaissances, compétences et attitudes essentielles à une carrière de scientifique, ingénieur ou technicien, en passant par la refondation du programme scientifique en vue d'en élargir la base de connaissances afin de prendre davantage en compte les interactions entre les sciences, la technologie et la société.

2. Les enjeux et les arguments en faveur de la « scientific literacy »: aperçu historique

2.1. Les années 50

Le terme « scientific literacy » a été inventé dans les années 1950 par Paul Hurd (Laugksch, 2000, p. 72). Il l'a utilisé pour la première fois dans un article intitulé « Science Literacy: *Its Meaning for American Schools* » pour décrire la compréhension des sciences et ses applications dans la société (Hurd, 1958, cité par Laugksch, 2000 ; Bybee et al, 2009). L'intérêt initial pour

la « scientific literacy » dans les années 1950 semble être lié à la volonté de la communauté scientifique américaine de susciter un soutien public à la science en réaction au lancement du Spoutnik soviétique (Laugksch, 2000). Selon Hurd, les américains motivés par la course à l'espace ont commencé à s'inquiéter du type d'éducation reçue par leurs enfants : leur permettrait-elle de faire face à une société scientifique et technologique de sophistication croissante (cité par Laugksch, 2000, p. 72). L'élaboration et la mobilisation de *« l'idée de culture scientifique est alors considéré comme un moyen de trouver du soutien dans le champ de l'éducation aux sciences afin d'examiner à nouveau les finalités de l'enseignement des sciences et d'élaborer des curriculums »* pour les *« 90 % d'étudiants [qui ne sont pas considérés comme des] scientifiques potentiels »* (Albe, 2011, p. 121).

Compte tenu de l'importance du soutien à la science et à l'enseignement des sciences, de nombreux auteurs ont commencé à promouvoir divers aspects liés à la « scientific literacy », sans cependant fournir une définition claire de ce qu'ils entendaient par ce concept. La période qui s'étend de la fin des années soixante à la fin des années soixante-dix marque la fin de la première vague de la « culture scientifique ». Elle est caractérisée par un ensemble abondant et varié de définitions. Se référant à Roberts (2007), Albe (2011) présente la « scientific literacy » comme *« un concept parapluie, suffisamment large, au sens composite tel qu'il signifie tout et rien de particulier en éducation aux sciences »* (p.121). Elle ajoute que *« Le développement de la culture scientifique vise une compréhension large et fonctionnelle de la science dans un but d'éducation générale, et non pas de préparation des futurs scientifiques et technologues »* (p.121).

2.2 Le début des années quatre-vingts

Le début des années quatre-vingts marque la deuxième vague de la « science literacy » et a conduit à la renaissance du concept.

C'est une période où les U.S.A. se trouvent confrontés à deux défis importants. Le premier est lié à l'émergence du Japon et d'autres pays côtiers du Pacifique (les tigres asiatiques) comme puissances économiques capables de rivaliser avec les Etats-Unis, semant ainsi le doute sur sa compétitivité économique internationale et sur son leadership industriel (Bloch, 1986, cité par Laugksch, 2000, p. 73). Le deuxième est lié au déclin de la base de recherches en science et en ingénierie comme en témoignent les résultats des tests de la jeunesse américaine (AAAS, 1989). Il était donc inévitable que la politique scientifique des États-Unis soit mise aux « projecteurs ». À cette époque, une croyance largement partagée sur l'existence d'une crise

dans l'enseignement des sciences et la perception de menaces quant à la compétitivité économique des États-Unis sont à l'origine du fameux rapport de la commission nationale sur l'excellence en éducation (1983) : *A Nation at Risk: The Imperative for Educational Reform*.

Dès lors, on assiste à un mouvement de mondialisation : s'affirme une volonté de développer une culture scientifique et technique à des fins de préoccupations sociales, économiques et environnementales, affirmation largement soutenue par plusieurs pays et institutions internationales telles que l'UNESCO et l'OCDE. Ces préoccupations conduisent des groupes de réflexion à proposer que la formation en sciences des futurs citoyens devienne une priorité d'égale importance que la sélection et la formation de générations de futurs scientifiques. La promotion de la culture scientifique pour tous est devenue un axe principal des enseignements dans de nombreux pays.

2.3 La fin des années 80 : argument économique vs argument démocratique

La visée économique

Vers la fin des années 1980, la promotion d'une culture scientifique pour tous repose sur un argument économique. Dans les pays du nord de l'Amérique, des appels d'urgence ont été lancés afin de clarifier les objectifs éducatifs et d'engager les réformes curriculaires nécessaires pour préparer un citoyen scientifiquement cultivé capable de rivaliser avec succès dans une économie mondialisée et un monde en évolution rapide. Ainsi, le projet 2061 intitulé «Science For All Americans» publié en 1989 par The American Association for the Advancement of Science [AAAS] définit une personne scientifiquement cultivée comme:

One who is aware that science, mathematics, and technology are interdependent human enterprises with strengths and limitations; understands key concepts and principles of science; is familiar with the natural world and recognizes both its diversity and unity; and uses scientific knowledge and scientific ways of thinking for individual and social purposes. (p.4)

Dans la même veine, en 1991, le gouvernement canadien tente d'établir un lien entre l'enseignement des sciences à l'école et une culture d'apprentissage continu présentée comme clé de la prospérité du pays. L'argument économique est à la fois puissant et persuasif, comme l'illustre ce discours gouvernemental :

Our future prosperity will depend on our ability to respond creatively to the opportunities and challenges posed by rapid change in fields such as information technologies, new materials, biotechnologies and telecommunications [. . .]. To meet the challenges of a technologically driven economy, we must not only upgrade the skills of our work force, we must also foster a lifelong learning culture to encourage the continuous learning needed in an environment of constant change (Gouvernement du Canada, 1991, pp 12, 14, cité par Hodson, 2003, p. 651).

Dans ce contexte, certains (Bencze, 2001 ; Hodson, 2003 ; Lankshear & Gee & Hull, 1996) attirent l'attention sur cette tendance qu'ils qualifient de dangereuse, tant pour les individus que pour la société toute entière, qui consiste à promouvoir une culture scientifique favorisant la mondialisation de l'économie, l'augmentation de la production et l'expansion illimitée. Le système éducatif sera intégré dans le mécanisme d'un tel marché et les programmes seront élaborés afin de « concevoir, optimiser, produire et commercialiser des biens et services destinés au marché mondial » et de lui procurer la main d'œuvre compatible. La déclaration du ministre de l'éducation et de la formation (2000) à propos du curriculum du département de l'Ontario confirme cette tendance :

The new Ontario curriculum establishes high, internationally competitive standards of education for secondary school students across the province. The curriculum has been designed with the goal of ensuring that graduates from Ontario secondary schools are well prepared to lead satisfying and productive lives as both citizens and individuals, and to compete successfully in a global economy and a rapidly changing world. (cité par Hodson, 2003, p. 651).

Dans cette nouvelle économie axée sur un climat éducatif, l'école engendre ce que Bencze (2001) appelle « un apprentissage pour un navire à consommation » où les élèves ne sont plus considérés comme des personnes qui participeront à la lutte pour construire et reconstruire le social, l'éducatif, le politique et l'économique future mais des citoyens qui servent à la fois comme « travailleurs loyaux et consommateurs voraces et inconditionnels ».

La visée démocratique

Ce cri d'alarme trouve son écho parmi les éducateurs aux sciences et les concepteurs de documents de référence. Pour améliorer cette situation, ceux-ci proposent d'accroître parmi les citoyens du monde un type de culture scientifique, qui, selon les auteurs de *Science For All*

Americans (AAAS, 1989), implique une démocratie plus socialement « compassion-ante » et écologiquement responsable. Ils affirment ainsi que les sciences et les technologies peuvent engendrer les connaissances « *to develop effective solutions to its global and local problems* » et peuvent favoriser « *the kind of intelligent respect for nature that should inform decisions on the uses of technology* » sans lequel, disent-ils « *we are in danger of recklessly destroying our life-support system* » (p.12). De leur côté les auteurs des « *Benchmarks for Scientific Literacy* » suggèrent que :

People who are literate in science [. . .] are able to use the habits of mind and knowledge of science, mathematics, and technology they have acquired to think about and make sense of many of the ideas, claims, and events that they encounter in everyday life (AAAS, 1993, p. 322, cité par Hodson, 2003, p. 652).

En vue d'écarter l'école de l'influence des groupes d'intérêts économiques, le conseil des ministres de l'éducation du Canada (1997) propose une définition de la « scientific literacy » pour guider la construction du curriculum qui insiste sur les attitudes, les compétences et les connaissances nécessaires à l'investigation, la résolution de problème, la capacité de prendre des décisions et à se former tout au long de la vie ainsi qu'à maintenir un sentiment de satisfaction et d'émerveillement face au monde :

Scientific literacy is an evolving combination of the science-related attitudes, skills, and knowledge students need to develop inquiry, problem-solving, and decision-making abilities, to become lifelong learners, and to maintain a sense of wonder about the world around them. (Conseil des ministres de l'éducation du Canada, 1997, p.4, cité par Hodson, 2003, p.653).

Par ailleurs, différentes définitions de la « scientific literacy » ont été proposées afin de préciser certains objectifs d'enseignement lors de la refondation de nouveaux programmes. Ainsi, le conseil consultatif écossais sur les programmes (the Scottish Consultative Council on the Curriculum [SCCC], 1996) adopte la capacité scientifique au lieu du terme « scientific literacy ». L'accent n'est pas seulement mis sur l'acquisition de connaissances et de savoir-faire, mais aussi sur la capacité à les mettre en œuvre, à penser et agir de façon créative et nuancée face à un problème critique lié au rôle des sciences dans la société. Ainsi une personne scientifiquement capable « *is not only knowledgeable and skilled but is also able to draw together and apply her/his resources of knowledge and skill, creatively and with sensitivity, in response to an issue, problem or phenomenon* » (SCCC, 1996, p.15).

Si, cette définition de la capacité scientifique occulte l'aspect sociopolitique qui vise la participation significative des futurs citoyens aux décisions que les sociétés doivent prendre à l'égard de questions socio- scientifiques et sociotechniques toujours plus complexes, le rapport sur la politique éducative de l'Angleterre et du pays de Galles , Qualifications and Curriculum Authority (QCA), s'oriente vers une plus grande socialisation et recommande la mise en œuvre immédiate de l'éducation à la citoyenneté. Celle-ci comporte trois volets, la responsabilité sociale et morale, la participation communautaire et la culture politique :

We aim at no less than a change in the political culture of this country both nationally and locally: for people to think of themselves as active citizens, willing, able and equipped to have an influence in public life and with the critical capacities to weigh evidence before speaking and acting; to build on and to extend radically to young people the best in existing traditions of community involvement and public service, and to make them individually confident in finding new forms of involvement and action among themselves (QCA, 1998, p.8).

En résumé, plusieurs arguments ont été avancés afin de justifier que plusieurs types de « culture scientifique » peuvent orienter l'éducation aux sciences :

- un argument démocratique ou politique (Thomas et Durant, 1987) visant une participation significative et informée des citoyens aux prises de décisions à l'égard des questions scientifiques et techniques socialement vives ;
- un argument utilitaire (Brooks, 1991) qui appelle à armer les citoyens d'une société socio-scientifique d'un socle de connaissances et de compétences scientifiques et techniques utiles pour le monde du travail et la confrontation des problèmes ;
- un argument économique (Walberg, 1983 ; Hodson, 2003) qui consiste à mettre en avant le rôle des sciences et des technologies dans l'insertion professionnelle, le soutien de la croissance économique et la compétitivité dans le marché mondial ;
- un argument qualifié de culturel (Shortland, 1988) qui promeut l'apprentissage des sciences de la nature pour ses attraits intellectuels, esthétiques et moraux, et considère les sciences en tant qu'entreprise culturelle et sociale comme les arts, la musique et la littérature.

3. Les différents types de culture scientifique et les compétences et connaissances en jeu

La tendance au développement de la « culture scientifique » soulève chez les chercheurs de nombreux débats et réflexions. Bien qu'elle soit largement considérée comme étant d'une importance fondamentale pour l'éducation aux sciences, son élaboration conceptuelle reste souvent peu précise et fait l'objet d'une multitude de définitions et interprétations souvent composites et controversées. Différents types de « scientific literacy », correspondant à des finalités éducatives diverses, ont été signalés dans la littérature. Certains y voient une possibilité de familiariser tout le monde (élèves et citoyens) avec les sciences et les technologies, d'autres considèrent que la promotion de la culture scientifique rend l'enseignement plus attrayant, enfin d'autres comme Hodson (2003) y voient une composante essentielle pour guider et concevoir la reconstruction des programmes, reconstruction devenue nécessaire si l'on souhaite qu'ils permettent de bien préparer les élèves à participer activement à l'édification du bien commun, à mener une vie satisfaisante et productive à la fois comme citoyens et individus, et à rivaliser avec succès dans une économie mondialisée et dans un monde en pleine expansion et évoluant très rapidement. Ils soutiennent une culture scientifique qui forme un citoyen conscient des risques qui menacent les libertés individuelles, le bien être des sociétés et l'avenir de la planète.

Une révision de la littérature portant sur ce concept n'a pas permis de dégager un consensus sur une définition claire et pertinente, largement acceptée et utilisée, de ce qu'on appelle « science literacy » ou « scientific literacy ». Tout en reconnaissant qu'il n'existe pas une définition consensuelle de la culture scientifique, nous tentons, à travers l'examen de la littérature, à obtenir une meilleure compréhension de l'expression, mais, surtout, à cerner les domaines fondamentaux sur lesquels elle se développe.

Les travaux de Pella, O'Hearn et Gale (1966) représentent l'une des premières tentatives visant à fournir une première définition de la « scientific literacy ». Ils suggèrent qu'elle sous-tend une compréhension des concepts de base de la science, de la nature des sciences, de l'éthique qui contrôle le savant dans son travail, des interrelations entre la science et les humanités, des interrelations entre la science et la société et des différences entre la science et la technologie.

La définition de Pella et al de la « scientific literacy » a été retravaillée par Schowalter (1974). Celui-ci explicite sept dimensions signifiant ce qu'est une personne scientifiquement cultivée et

propose ainsi une définition de la « scientific literacy » relativement avancée par rapport à celles qui existent à cette époque :

1. *The scientifically literate person understands the nature of scientific knowledge.*
2. *The scientifically literate person accurately applies appropriate science concepts, principles, laws, and theories in interacting with his universe.*
3. *The scientifically literate person uses processes of science in solving problems, making decisions, and furthering his own understanding of the universe.*
4. *The scientifically literate person interacts with the various aspects of his universe in a way that is consistent with the values that underlie science.*
5. *The scientifically literate person understands and appreciates the joint enterprises of science and technology and the interrelationship of these with each and with other aspects of society.*
6. *The scientifically literate person has developed a richer, more satisfying, more exciting view of the universe as a result of his science education and continues to extend this education throughout his life.*
7. *The scientifically literate person has developed numerous manipulative skills associated with science and technology.* (cité par Rubba et Anderson, 1978, p. 450, Laugksch, 2000, p. 76).

Shen (1975a) distingue trois catégories de culture scientifique : pratique, civique et culturelle. La culture « *pratique* », consiste en « *la possession de connaissances scientifiques qui peuvent être utilisées pour aider à résoudre des problèmes pratiques* » (Shen, 1975a, p.46). Ce sont des connaissances qui abordent les besoins les plus fondamentaux de l'être humain liés par exemple à la vie, à la santé, au logement, tandis que la culture « *civique* » est destinée à « *permettre au citoyen de devenir plus conscient des questions de sciences qu'il a à affronter et par conséquent le conduit à participer plus significativement aux procédés démocratiques dans une société de plus en plus technologique* » (Shen, 1975a, p.48). Enfin dans l'optique « *culturelle* », « *l'élève est motivé par un désir de connaître les sciences comme une production majeure de l'homme* » (Shen, 1975a, p.49).

Miller (1983) soutient que dans une société démocratique, le niveau de culture scientifique dans une population a des implications importantes sur les décisions de la politique scientifique. Il propose une définition de la « scientific literacy » dans ce qu'il appelle la « situation

contemporaine » c'est-à-dire la société scientifique et technologique d'aujourd'hui, comme étant composée de trois dimensions

- (a) *An understanding of the norms and methods of science (i.e., the nature of science);*
- (b) *an understanding of key scientific terms and concepts (i.e., science content knowledge); and (c) an awareness and understanding of the impact of science and technology on society.* (cité par Laugksch, 2000, p. 78).

Arons (1983) étend les dimensions de Miller de la culture scientifique et insiste sur les capacités intellectuelles requises par les personnes scientifiquement cultivées. Pour lui, ces individus devraient être capables d'appliquer correctement les connaissances scientifiques et les compétences de raisonnement pour résoudre des problèmes et prendre des décisions dans leur vie personnelle, civique et professionnelle. Il soutient que ces personnes possèdent la capacité

- (a) *to recognize that 'scientific concepts are invented or created by acts of human intelligence and imagination . . .';*
- (b) *to 'comprehend the distinction between observation and inference . . .';*
- (c) *to comprehend ' . . . the deliberate strategy of forming and testing hypotheses';*
- (d) *to ' . . . recognize when questions such as 'How do we know . . . ? Why do we believe . . . ? What is the evidence for . . . ? have been addressed, answered, and understood, and when something is taken on faith'.* (Arons, 1983, pp. 92-93, cité par Laugksch, 2000, p. 78).

Les trois types de « scientific literacy » (Shen, 1975a) ont été repris et retravaillés (Shamos, 1995) pour établir une progression dans les programmes de sciences. Ils ont été aussi étendus (Bybee, 1997) pour confectionner le curriculum scientifique à la suite de la polémique engendrée par la tendance à étendre un discours économique aux écoles et au système éducatif.

Shamos(1995) préfère l'utilisation de la *sensibilisation à la science* plutôt que la *scientifc literacy* et suggère trois niveaux de littératie : la « scientifc literacy » *culturelle* consiste en la forme la plus simple de la culture qui fait référence à un ensemble d'informations que des communicants supposent que leur public possède déjà, tandis que la forme *fonctionnelle* est telle que « *l'individu non seulement possède un lexique scientifique, mais est aussi capable de discuter, lire et écrire de façon cohérente, en utilisant ces termes scientifiques dans un contexte qui n'est peut-être pas technique mais néanmoins signifiant* » (Shamos, 1995, p. 88.). En d'autres termes une personne fonctionnellement cultivée ne serait pas seulement capable de lire et comprendre un article scientifique, mais d'être aussi capable de communiquer son contenu à

un tiers. Enfin, la forme *vraie*, qualifiée de la « véritable culture scientifique » est la plus difficile à atteindre car elle exige de l'individu en plus des formes précédentes, des connaissances sur l'ensemble de l'entreprise scientifique. Pour l'auteur, elle constitue un objectif approprié pour les étudiants qui se destinent à l'étude des sciences :

À ce niveau, l'individu a des connaissances sur l'ensemble de l'entreprise scientifique, [...] les cadres conceptuels majeurs [...] de la science, comment ils ont été élaborés, et pourquoi ils sont largement acceptés, comment la science produit de l'ordre à partir d'un univers aléatoire, et le rôle de l'expérience en science. L'individu apprécie aussi les éléments de l'investigation scientifique, l'importance d'un questionnement approprié, d'un raisonnement analytique et déductif, des procédés de pensée logique, et de confiance dans la preuve objective. (Shamos, 1995, p. 89).

Pour lui, l'idée que la « scientific literacy » puisse orienter en général la finalité de l'éducation aux sciences est un mythe.

Au niveau de l'école, Bybee (1997) suggère quatre niveaux de « scientific literacy » qui sont considérés selon des degrés de sophistication croissante. D'après lui, une « littératie *nominale* » signifie que l'individu peut reconnaître des termes scientifiques sans avoir une compréhension claire de leur signification. Il « *associe des noms à un domaine général de sciences et de technologies [...] La relation [à] des définitions acceptables est réduite et insignifiante* » (Bybee, 1997, p. 84). Cette forme de « scientific literacy » comprend les conceptions erronées, les théories naïves et les idées fausses. Ensuite, la « littératie *fonctionnelle* » se réfère à la lecture et à l'écriture de passage avec un vocabulaire scientifique simple. Plus précisément

L'individu répond de façon adéquate et approprié au vocabulaire [...] il peut lire et écrire des passages avec du vocabulaire scientifique simple [...] Il peut aussi associer le vocabulaire à des cadres conceptuels plus larges [...] mais éprouve de la difficulté à comprendre ces associations (pp. 84-85).

En revanche, la « littératie *conceptuelle et procédurale* » se réfère à la compréhension de la structure d'une discipline scientifique et des procédures pour le développement de nouvelles connaissances. En ce sens, « *l'individu montre une compréhension à la fois des parties et de l'ensemble des sciences et technologies comme disciplines [...] Il comprend la structure des disciplines et les procédures pour développer de nouvelles connaissances et techniques* » (p.85). Finalement, la « littératie *multidimensionnelle* » ne se rapporte pas seulement à la compréhension des structures des sciences et des technologies, mais également à la nature des

sciences et des technologies et de leurs relations avec la société. Selon l'expression de l'auteur, elle consiste en :

La compréhension des structures conceptuelles essentielles des sciences et des technologies, ainsi que des caractéristiques qui rendent cette compréhension plus complète, comme par exemple l'histoire et la nature des sciences. En outre, l'individu à ce niveau comprend la relation des disciplines à l'ensemble des sciences et des technologies et à la société (p. 85).

Après la publication du Projet 2061 « Science pour tous les Américains » (AAAS, 1998), le gouvernement américain engage un processus de réforme de l'éducation scientifique afin de parvenir à un consensus pour fixer les objectifs d'enseignement permettant aux élèves de maîtriser les savoirs nécessaires pour être considérés scientifiquement cultivés. Différentes significations de la culture scientifique ont été suggérées, parmi lesquelles, celle qui a été préparée par un large éventail de personnes représentant de nombreuses circonscriptions (Collins, 1998, p. 22). Elle précise des objectifs pour l'enseignement des sciences:

Scientific literacy means that a person can ask, find, or determine answers to questions derived from curiosity about everyday experiences. It means that a person has the ability to describe, explain, and predict natural phenomena. Scientific literacy entails being able to read with understanding articles about science in the popular press and to engage in social conversation about the validity of the conclusions. Scientific literacy implies that a person can identify scientific issues underlying national and local decisions and express positions that are scientifically and technologically informed. A literate citizen should be able to evaluate the quality of scientific information on the basis of its source and the methods used to generate it. Scientific literacy also implies the capacity to pose and evaluate arguments based on evidence and to apply conclusions from such arguments appropriately (cité par DeBoer, 2000, pp. 590-591).

Les objectifs globaux véhiculés par cette déclaration sont perçus comme trop ambitieux, certains parmi eux étant très difficiles à atteindre par les élèves, et ont suscité de nombreuses critiques et objections (Shamos, 1995).

D'autres significations mettent plus l'accent sur l'importance de la compréhension de la nature des sciences, des concepts clés des sciences et des technologies, comme celle proposée par le

document du National Research Council (NRC), the *National Science Education Standards* (NSES) :

Science literacy includes certain key concepts in the natural sciences, as well as how science relates to mathematics, technology, and other human endeavours. Science literacy also includes an understanding of the nature of science as well as inquiry skills such as designing experiments, collecting and analyzing data, and drawing valid conclusions from evidence (cité par McDonald & Dominguez, 2005, p. 19).

Dans le cadre des enquêtes internationales PISA (*Program for International Student Assessment*) plusieurs définitions ont été proposées de la « scientific literacy » (ou culture scientifique selon la traduction française adoptée par l'OCDE en 2006). Lors des enquêtes de l'OCDE (1999, 2000, 2003a), la culture scientifique désigne :

La capacité d'utiliser des connaissances scientifiques, d'identifier des questions et d'élaborer des conclusions appuyées sur des preuves, afin de comprendre et d'aider à une prise de décision à propos du monde naturel et de ses changements dus à l'activité humaine (OCDE, 2006, p. 25).

Cette définition met l'accent sur trois procédés considérés comme essentiels dans cette culture scientifique et sont objets de l'enquête, à savoir :

- la description, l'explication et la prédiction des phénomènes scientifiques ;
- la compréhension de l'investigation scientifique comme processus ;
- l'interprétation des preuves scientifiques et l'élaboration des conclusions.

Lors du cycle de PISA en 2006, ces éléments ont été repris et complétés par la considération des attitudes des jeunes envers les sciences et par l'accent mis sur l'importance des connaissances non seulement en sciences mais aussi sur les sciences. Cette définition de la culture scientifique fait référence à quatre caractéristiques interdépendantes :

- 1- *les connaissances scientifiques de l'individu et sa capacité d'utiliser ces connaissances pour identifier les questions auxquelles les sciences peuvent apporter une réponse, pour acquérir de nouvelles connaissances, pour expliquer des phénomènes scientifiques et pour tirer des conclusions fondées sur les faits à propos de questions à caractère scientifique ;*
- 2- *la compréhension des éléments caractéristiques des sciences en tant que forme de recherche et de connaissance humaine ;*
- 3- *la conscience du rôle des sciences et de la technologie dans la constitution de notre environnement matériel, intellectuel et culturel ;*

4- la volonté de s'engager en tant que citoyen réfléchi à propos de problèmes à caractère scientifique et touchant à des notions relatives aux sciences. (Bybee et al, 2009, p. 866).

Cette culture scientifique se compose de trois compétences clés étroitement liées que l'individu devrait posséder. Il s'agit d'*identifier des questions scientifiques*, puis d'*expliquer scientifiquement des phénomènes* et enfin d'*utiliser des preuves scientifiques* (OCDE, 2006). Les compétences scientifiques sont vues comme fonctionnant en une séquence que l'individu devrait suivre lors de la résolution des problèmes scientifiques (Bybee et al, 2009, p. 878). On admet que la manière de faire de ces trois compétences est influencée par les connaissances scientifiques et à propos des sciences, ainsi que les attitudes envers les sciences (intérêt, importance accordée aux démarches scientifiques, sens des responsabilités).

4. La culture scientifique et les programmes d'enseignement

Un examen de l'histoire de l'éducation aux Etats-Unis et au Royaume Uni, nous montre que la culture scientifique est un concept général qui a eu, et continue d'avoir, une grande variété de significations. Cependant, beaucoup s'accordent sur sa pertinence dans la compréhension large et fonctionnelle des sciences (DeBoer, 2000 ; Laugksch, 2000).

Par ailleurs, il y a peu de consensus sur ce que cela implique en termes de prestation de programme. En effet, des interrogations persistent encore quant à la nature des savoirs mobilisés et des composantes de la culture scientifique qui devraient être choisies pour guider le choix des nouveaux objectifs dans les réformes préconisées de l'enseignement des sciences et technologies.

Si l'on examine les savoirs mobilisés dans des situations d'apprentissages significatives, plusieurs orientations peuvent être identifiées. S'agit-il d'organiser l'enseignement des sciences autour des contenus des disciplines scientifiques ou en fonction d'un projet de société ? La réponse à cette question n'est pas évidente. Cependant, il semble y avoir deux camps principaux ou deux visions de la culture scientifique conçues comme les deux extrêmes d'un continuum d'approches.

Selon la première vision, il s'agit d'enseigner des contenus scientifiques pour eux-mêmes quelle que soit la fin ultime qui justifie ces contenus (Roberts, 2007). Ils constituent l'épine

dorsale de la majorité des programmes de sciences actuels. Cette vision semble très répandue chez les professeurs de sciences aujourd'hui. Les savoirs enseignés sont établis, le plus souvent, en référence à la science savante et considérés sans implication significative dans la société (Arons, 1983 ; Snow, 1962). Cette conception de la « littératie scientifique » est étiquetée de *la culture de la science* pour la distinguer de la culture scientifique. Elle est classée par (Laugksch, 2000) dans la catégorie du « learned ».

Selon la deuxième vision, les savoirs scolaires sont définis en référence à leur implication ou fonctionnalité dans la société (Branscomb, 1981 ; Miller, 1983). Dans cette approche, les individus scientifiquement cultivés jouent un rôle particulier dans la société. En tant que citoyens et consommateurs, ils ont besoin d'utiliser les connaissances scientifiques dans une grande variété de contextes sociaux qui affectent leur vie personnelle et leur bien-être économique (la nutrition, la santé, la sécurité, la production et la distribution de l'énergie) (Jenkins, 1994). Cette interprétation suppose que la culture scientifique est un concept relatif et socialement défini qui varie selon les périodes, les régions géographiques, les communautés ou les conditions sociales (Miller, 1989). Cette culture dépendant des contextes dans lesquels elle est destinée à fonctionner, ils sont appelés contextes de « vie » (PISA, 2006). Cette forme de « littératie » est logée dans la catégorie « function in society » dans la classification (Laugksch, 2000) car une personne scientifiquement cultivée serait en mesure d'utiliser les sciences dans l'exécution d'une fonction dans la société.

En vue d'appréhender ces contextes de « vie » impliquant les sciences et les technologies, les élèves devraient mobiliser des savoirs en sciences (concepts scientifiques fondamentaux relatifs aux systèmes physiques) et des savoirs sur les sciences (la nature des explications scientifiques, les processus, les démarches,...). Selon cette conception, un élève scientifiquement cultivé serait, par exemple, celui ou celle qui apprend les connaissances scientifiques et les concepts importants pour comprendre et manipuler les questions socio-scientifiques dans la société, entreprend des investigations de résolution de problèmes scientifiques afin de développer des compétences personnelles liées à la créativité, l'initiative, le travail sécuritaire, etc., de mieux comprendre l'arrière-plan scientifique lié aux questions socio-scientifiques et de concevoir les sciences, lors des prises de décisions dans des contextes sociaux, comme une tentative non pas en mesure de fournir une réponse définitive mais une argumentation raisonnée fondée sur les théories et les méthodes scientifiques liées à la question posée.

Nous n'entrerons pas dans les discussions et critiques (Davies, 2004 ; Osborne, 2007 ; Shamos, 1995) portant sur l'introduction de la culture scientifique selon l'une ou l'autre des deux visions tant au niveau de l'enseignement des sciences qu'au niveau de la légitimation du curriculum scientifique car notre objectif n'est pas d'entreprendre une étude exhaustive de la notion de culture scientifique. Nous visons seulement à montrer que malgré la multitude des définitions de la « culture scientifique » la majorité des significations (Arons, 1983 ; Bybee, 1997 ; DeBoer , 2000 ; Gale, 1966 ; Holbrook & Rannikmae, 2009 ; Laugksch, 2000 ; Miller, 1983 ; Pella et al, 1974 ; PISA, 2006 ; QCA, 1998 ; Shamos, 1995 ; SCCC, 1996 ; Shen, 1975) met l'accent sur la nature des sciences ou certains de ses aspects comme une composante principale de ce qu'on appelle la « scientific literacy ».

Chapitre 2

La nature des sciences dans l'enseignement des sciences

1. Enjeux et contenus d'enseignement

1.1. Introduction

Une revue de la littérature montre que les recherches visant l'introduction d'éléments épistémologiques comme objectifs principaux d'apprentissage dans l'enseignement des sciences sont essentiellement anglo-saxonnes (USA, UK, Australie, Nouvelle Zélande,...). Il en existe cependant quelques-unes dans le monde francophone (Canada, Belgique, France).

Cette introduction vise principalement la promotion du littérisme scientifique chez les apprenants, objectif principal de l'enseignement depuis plus de deux décennies (American Association for the Advancement of Science 1989, 1993 ; National Research Council, 1996).

Cette promotion soutient l'acquisition de « connaissances » sur la nature des sciences (DeBoer, 2000 ; Holbrook & Rannikmae, 2009 ; Pella et al, 1966 ; PISA, 2006 ; Shamos, 1995). Ainsi, Meichtry (1993) écrit « *les définitions de la culture scientifique rapportées dans la littérature au cours des trois dernières décennies ont toutes soulignées l'importance de la compréhension de la nature des sciences* » (p. 429).

L'une des principales justifications pour l'introduction de la nature des sciences dans l'enseignement est celle avancée par Schwab qui a constaté que la science est enseignée comme une « *unmitigated rhetoric of conclusions in which the current and temporal constructions of scientific Knowledge are conveyed as empirical, literal and irrevocable truths* » (Schwab, 1964, p. 24).

Deux questions sous-tendent cette introduction : quels sont les « enjeux » de l'éducation à la nature des sciences ? Quelles sont les « connaissances » sur la nature des sciences à enseigner aux élèves ?

1.2. Les enjeux

Des arguments autres que le simple fait que les idées des apprenants et enseignants à propos de la nature des sciences sont erronées sont avancés en faveur du choix de faire de la nature des sciences un objectif d'enseignement et de formation. Mc Comas, Clough et Almazroa (1998) ainsi que Lederman (2007) notent que pour Driver, Leach, Millar et Scott (1996) la compréhension de la nature des sciences est nécessaire:

- pour donner un sens à la science et maîtriser les objets et processus technologiques de la vie de tous les jours (argument *utilitaire*) ;
- pour donner un sens aux questions socio-scientifiques et pour participer au processus de la prise de décision (argument *démocratique*) ;
- pour apprécier la science comme un élément majeur de la culture contemporaine (argument *culturel*) ;
- pour comprendre les normes de la communauté scientifique qui reflètent des engagements moraux d'intérêt général pour la communauté (argument *moral*) ;
- pour favoriser une bonne compréhension du contenu scientifique (argument lié à l'*apprentissage des sciences*).

Nous allons examiner ces arguments avant de nous intéresser aux contenus d'enseignement recommandés dans la littérature. Nous esquissons un aperçu historique, puis détaillons l'approche de Lederman à laquelle se réfère la majeure partie des recherches sur la NoS et terminons par l'approche introduite par Irzik et Nola en 2011.

1.2.1 La compréhension de la nature des sciences améliore l'apprentissage du contenu scientifique

Mc Comas (1998, p. 11) cite l'enquête menée par Songer et Linn (1991) pour appuyer l'idée que la compréhension de la nature des sciences aiderait à une meilleure maîtrise des contenus scientifiques. L'enquête a été réalisée pour montrer l'importance d'une vision dynamique des sciences par rapport à une vision statique dans l'élaboration d'une compréhension conceptuelle d'un cours de thermodynamique. L'échantillon interrogé est constitué de 153 étudiants de 8^{ème} année (classe de quatrième en France) en sciences physiques ayant suivi un enseignement mettant l'accent sur des expériences pratiques. Les auteurs ont pu caractériser chez les élèves les visions statique, dynamique et mixte des sciences.

La vision statique considère la science comme un ensemble de faits définitifs à mémoriser alors que la vision dynamique postule que les connaissances scientifiques sont provisoires et que la meilleure façon de les comprendre est de saisir la signification des idées scientifiques et la façon dont elles sont liées. Sans aborder les points de vue mixtes, les auteurs constatent que les élèves ayant une vision dynamique ont acquis une compréhension plus intégrée de la thermodynamique que ceux ayant une vision statique.

De son côté, Lederman (1998) affirme que la maîtrise d'un contenu conceptuel est un objectif irréalisable à moins que les élèves comprennent parfaitement la nature des sciences et de l'investigation scientifique. Il s'interroge sur le type de compréhension qu'un apprenant peut acquérir du concept de « gène » ou d'« atome » s'il n'est pas conscient que le « gène » n'est qu'un concept inventé pour expliquer des résultats expérimentaux et que l'« atome » n'est qu'un modèle scientifique utilisé pour expliquer le comportement de la matière. Il écrit:

For example, can it be said that a student truly understands the concept of a gene if he/she does not realize that a "gene" is a construct invented to explain experimental results? Does the student who views genes as possessing physical existence analogous to pearls on a necklace possess an in-depth understanding of the concept? Does the student who is unaware that the atom (as pictured in books) is a scientific model used to explain the behavior of matter and that it has not been directly observed have an in-depth understanding of the atom? .

1.2.2. La connaissance de la nature des sciences améliore la compréhension du statut des énoncés scientifiques.

Selon Mc Comas (1998), la compréhension du fonctionnement de l'entreprise scientifique est impérative pour évaluer les points forts et les lacunes de la science ainsi que la valeur des différents types de connaissances scientifiques. Ainsi, les professeurs de sciences peuvent comprendre le modèle atomique, la loi de Boyle, la théorie évolutionniste, sans toutefois, saisir la signification d'une loi, d'une théorie ou d'un modèle scientifique. Il en résulte souvent des déclarations ridicules du type « lorsque telle ou telle théorie est prouvée, elle deviendra une loi », « les modèles théoriques sont des copies du monde », « les lois scientifiques sont un reflet des lois de la nature », ...

Par ailleurs, la perception de la science comme un processus d'amélioration de notre compréhension du monde naturel conduit à considérer le caractère provisoire des

connaissances scientifiques comme un point fort. En effet, ceux qui comprennent que les connaissances scientifiques sont durables et pourtant révisables accepteront facilement qu'une nouvelle théorie prenne la place d'une ancienne à la lumière de nouvelles preuves et admettront que les sciences progressent sans, cependant, cheminer vers la vérité.

Pour Hodson (2008), comprendre un texte scientifique revient à comprendre les aspects de la nature des sciences: «*understanding of science text resides in the capacity to determine when something is an inference, a hypothesis, a conclusion or an assumption, to distinguish between an explanation and the evidence for it, and (...) expressing doubt or engaging in speculation.*» (p. 3)

1.2.3. La connaissance de la nature des sciences améliore la prise de décision

Morris Shamos (1995) affirme que la compréhension de la nature des sciences constitue une composante importante de la culture scientifique, dans le sens qu'une connaissance de la nature des sciences, est ce que les citoyens utilisent lors de l'évaluation des questions mettant en jeu la science et la technologie. Cela concerne des domaines tels que l'économie, la politique environnementale et sociale, compte tenu de leurs interactions avec les sciences. Cela peut aussi concerner certaines décisions éthiques fondées sur un raisonnement qui peut faire appel à des arguments mettant en jeu des connaissances sur la nature des sciences.

Ainsi, parce qu'un public bien informé est susceptible d'être plus favorable à des niveaux élevés d'investissement financier, il est soutenu que les intérêts des scientifiques exigent qu'ils gardent le contribuable bien informé sur ce qu'ils font, sur la manière dont ils valident leurs résultats et sur les conclusions théoriques obtenues. Étant suffisamment conscient du fonctionnement de l'entreprise scientifique, le bailleur de fonds prendra la décision adéquate au moment opportun. Dans cette ligne d'argumentation, Schwab (1962) préconise de passer d'un apprentissage des connaissances scientifiques (les produits de la science) à un apprentissage des processus de la recherche scientifique, car celui-ci peut assurer «*a public which is aware of the conditions and character of scientific enquiry, which understands the anxieties and disappointments that attend it, and which is, therefore, prepared to give science the continuing support which it requires*» (Schwab, 1962, p. 38, cité par Hodson, 2008, p. 9).

De son côté l'association américaine AAAS (1993) précise que si les gens sont bien informés des travaux des scientifiques, ils sont susceptibles de réagir de façon réfléchie aux prétentions scientifiques:

When people know how scientists go about their work and reach scientific conclusions and what the limitations of such conclusions are, they are more likely to react thoughtfully to scientific claims and less likely to reject them out of hand or accept them uncritically (p. 3).

La National Research Council (1996) soutient que «*More and more jobs demand advanced skills, requiring that people be able to learn, reason, think creatively, make decisions, and solve problems. An understanding of science and of the process of science contributes in an essential way to these skills*» (p.2). De plus, il est communément soutenu, que ceux ayant une compréhension adéquate de la nature des sciences sont les mieux en mesure de faire face aux exigences de la vie quotidienne dans une société de plus en plus dominée par la technologie, les mieux placés pour évaluer et réagir de manière appropriée aux soi-disant «*preuves scientifiques* » utilisées par les agences de publicité et les politiciens, et les mieux équipés à prendre des décisions importantes qui affectent leur santé, sécurité et bien-être économique. Ainsi, la Royal Society (1985) souligne que:

Personal decisions, for example about diet, smoking, vaccination, screening programmes or safety in the home and at work, should all be helped by some understanding of the underlying science. Greater familiarity with the nature and findings of science will also help the individual to resist pseudo-scientific information. An uninformed public is very vulnerable to misleading ideas on, for example, diet or alternative medicine. (p. 10)

1.2.4. La connaissance de la nature des sciences améliore l'enseignement

Une revue de la littérature montre que la plupart des enseignants dans différentes parties du monde n'ont pas une compréhension adéquate de certains ou de tous les aspects de la nature des sciences (Akerson et al, 2006; Blanco et Niaz, 1997; Clough, 2006; Lederman, 1992, 2007).

Face à ce constat, Matthews (1994) plaide pour l'inclusion de cours sur la nature des sciences dans les programmes de formation des enseignants de sciences, dans le but, par exemple, de les aider à comprendre la psychologie de l'apprentissage des élèves et de renforcer leur capacité à mettre en œuvre un enseignement fondé sur des modèles de changement conceptuel.

La construction des connaissances scientifiques a en effet de nombreux points en commun avec le changement conceptuel selon Latour (1987), Latour et Woolger (1986), Knorr-Cetina (1981), Kuhn (1970), Mandelsohn et al (1977), Mulkay et Gilbert (1982), Shapin (1982). Un travail sur la nature des sciences avec les enseignants de sciences est alors utile car il se révèle être un agent déséquilibrant de leurs visions de l'enseignement et de l'apprentissage. Les résistances au changement conceptuel en classe parmi les enseignants découlent par exemple de la conception erronée que la connaissance du monde naturel est complètement objective et que celle-ci existe indépendamment du savant. Cette vision de la science donne l'illusion que l'élaboration des connaissances est un processus linéaire et cumulatif et consiste en fin de compte à remplacer ce qui est connu par ce qui est découvert et accepté par la communauté scientifique, et qui est juste (Mc Comas et al, 1998). Dans le même esprit, Ken Tobin (1993) soutient que les efforts de réforme de l'enseignement des sciences avaient besoin d'un «changement dans l'épistémologie » et il avance que parmi les solutions de rechange acceptées pour l'objectivisme est le constructivisme.

Dans une étude proposant à des enseignants des controverses historiques dans le domaine de la chimie afin de faciliter des transitions progressives de leur compréhension de la nature des sciences, Niaz (2009) constate des résultats positifs. Au début des cours, les professeurs étaient simplement conscients que des idées comme la méthode scientifique, l'objectivité et la nature empirique des sciences sont controversées parmi les philosophes des sciences. Dans la phase suivante, les interactions des enseignants/participants avec les intervenants ont facilité des transitions progressives dans leur compréhension de la nature des sciences, en particulier :

- Il n'y a pas de mythe lié à la méthode scientifique ; l'universalité de la méthode scientifique pourrait signifier que la science ne change pas et les scientifiques ne font pas usage d'une seule méthode scientifique mais plutôt d'une diversité ;
- une connaissance scientifique valable n'est pas fondée uniquement sur les faits observables ; la science ne se développe pas en faisant appel à l'objectivité dans un sens absolu, la créativité et les présupposés jouent également un rôle crucial ;
- la science ne se développe pas seulement en s'appuyant sur des expériences ; l'acceptation du rôle des débats et controverses dans le traitement des données expérimentales, la différenciation entre l'idéalisation des lois scientifiques et les observations et le rôle des suppositions et des hypothèses jouent un rôle essentiel dans la construction des savoirs.

Au terme de cette étude, l'auteur signale que la plupart des enseignants ont suggéré des implications éducatives positives, telles que la conjugaison de la spéculation et de la raison comme élément important dans la recherche d'une réponse à une question particulière, l'adoption de la méthodologie de l'idéalisation afin de résoudre des problèmes complexes, et enfin, le fait que la science ne se développe pas en faisant appel à l'objectivité dans un sens absolu et qu'elle n'a pas une explication à tout.

1.3. Les contenus d'enseignement relatifs à la NoS : aperçu historique

Depuis le début du 20^{ème} siècle, certaines caractéristiques des sciences ont été signalées comme méritant d'être choisies comme objectifs majeurs de l'enseignement des sciences.

Lederman (1992) rapporte qu'en 1907, le Central Association of Science and Mathematics Teachers insiste fortement sur la méthode scientifique et les processus d'élaboration des connaissances dans l'enseignement des sciences. Dewey (1916) souligne que la compréhension de la méthode scientifique est plus importante que l'acquisition des contenus conceptuels (cité par Hodson, 1991). En 1938, Jaffe énumère les objectifs de la nature des sciences « *such as a willingness to swing judgment while experiments are in progress, willingness to abandon a theory in light of new evidence, and knowledge that scientific laws may not be the ultimate truth* » (Mc Comas, 1998, p. 7). En 1946, James Bryan Conant suggère que tous les étudiants doivent comprendre « *the tactics and strategies of science* ».

Ce n'est qu'en 1960 que le « construct » nature des sciences est explicitement exprimé comme objectif principal de l'enseignement des sciences par « the National Society for the Study of Education ». Celle-ci déclare:

There are two major aims of science –teaching, one is knowledge, and the other is enterprise. From science courses, pupils should acquire a useful command of science concept and principles. Science is more than a collection of isolated and assorted facts...A student should learning something about the character of scientific knowledge, how it has been developed, and how it is used. (Hurd, 1960, p. 34, cité par Mc Comas, 1998, p.7).

A partir de ce moment, des efforts sont fournis par les concepteurs et développeurs de programmes afin de promouvoir un enseignement des sciences n'ayant pas le contenu scientifique comme seul objectif principal. Il s'agit de s'interroger sur des questions du genre « que connaissent les scientifiques ? », « comment les scientifiques connaissent ? », « que font

les scientifiques ? ». Des projets de programmes de sciences ont été élaborés en vue d'introduire des éléments pertinents de la nature des sciences dans l'enseignement scientifique.

Vers la fin des années 1960 et au début des années 1970, d'importants livres ont été publiés préconisant et définissant des éléments de la nature des sciences susceptibles d'être introduits dans les nouveaux programmes scientifiques. À titre d'exemple, Mc Comas (1998) cite le livre de Robinson (1968) « *Nature of science and science teaching* » dans lequel, il examine la question de la nature de la réalité physique, les aspects de la description physique y compris la probabilité, la certitude et la causalité, les points de vue sur la nature des sciences dans différentes disciplines et l'interaction entre enseignement des sciences et nature des sciences. Un autre livre est aussi évoqué, celui de Martin (1972) intitulé « *In Concept of Science Education : A Philosophical Analysis* » où l'auteur rappelle les arguments avancés par Robinson pour soutenir l'inclusion de la nature des sciences dans l'enseignement et examine quelques points importants tels que l'apprentissage par investigation, la nature des explications et le caractère de l'observation à la fois dans les sciences et dans l'apprentissage des sciences.

En 1979, Robert Ennis liste six questions que les enseignants de sciences rencontrent le plus souvent dans leurs classes. Elles sont formulées par Matthews (2003) comme suit :

What characterises the scientific method? What constitutes critical thinking about empirical statements? What is the structure of scientific disciplines? What is the scientific explanation? What role do value judgements play in the work of scientists? What constitute good tests of scientific understanding? (Matthews, 2000, p. 995)

Malgré les justifications et tentatives pour introduire la nature des sciences dans l'enseignement, peu de changements ont eu lieu au niveau curriculaire. Ainsi, Mc Comas, Almazroa et Clough (1998) constatent, qu'après environ cinquante ans d'intérêt porté à la nature des sciences, les enseignants et les programmes de sciences semblent strictement liés à une tradition de communiquer les faits ou les produits finaux de la science tout en négligeant généralement comment cette connaissance a été construite.

Quant aux manuels scolaires, le constat fait par Bentley et Garrison (1991) stipule qu'une description de la nature des sciences est généralement limitée à quelques paragraphes situés au début du manuel, laissant rapidement place à la présentation des faits et des concepts dans le reste de l'ouvrage.

La période située entre les années 1980 et 1990 est caractérisée par un regain d'intérêt pour la compréhension de la nature des sciences, celle-ci ne concerne plus uniquement les élèves qui vont poursuivre des études scientifiques, mais est devenue un enjeu espéré de l'éducation de tous les citoyens. Bien que l'objectif d'aider les élèves à développer une compréhension adéquate de la nature des sciences est un objectif pérenne dans l'enseignement depuis le début du vingtième siècle, son importance se réaffirme depuis ces dernières décennies. Cet objectif a été de nouveau soutenu par les scientifiques, les organisations de science et d'éducation ainsi que les enseignants des sciences, et réaffirmé dans la plupart des réformes de l'enseignement des sciences et inséré surtout dans les nouveaux programmes des pays anglophones (Association for Science Education, 1981 ; American Association for the Advancement of Science, 1990, 1993; National Science Teachers Association, 1995 ; National Research Council, 1996). Cependant, ce n'est pas seulement les développements et réformes curriculaires qui ont suscité le retour des questions sur la nature des sciences sur la scène de l'enseignement scientifique.

D'autres considérations culturelles ont aussi provoqué ce regain d'importance : les débats sur le créationnisme scientifique dont l'exemple type est le procès de Little Rock en 1981 qui porte sur le projet de loi de l'Arkansas exigeant un temps égal pour l'enseignement de la science de la création et de la science évolutionniste (Ruse, 1988) ; le multiculturalisme scientifique qui soulève une question épistémologique sur l'universalité des sciences occidentales par opposition à des ethnosciences ou savoirs locaux non « universellement valides », cette « universalité » renforçant l'opposition entre science et société multiculturelle et ruinant une partie de l'idéal démocratique ; les critiques féministes de la science contemporaine et les propositions féministes pour la réforme des programmes scientifiques. Notons que ces questions sur la nature des sciences abordent aussi les décisions de réserver ou non une place pour la religion dans les programmes de sciences.

1.4. L'approche de Lederman : le point de vue consensuel

Bien qu'il y ait un accord universel à la fois dans la littérature sur l'enseignement des sciences et dans les documents des standards scientifiques que les élèves doivent apprendre non seulement le contenu des sciences mais aussi leur nature, il n'y a guère de consensus sur les aspects de la nature des sciences qui doivent être enseignés aux élèves et qui doivent constituer les objectifs principaux d'apprentissage qui guident l'élaboration de nouveaux programmes.

Parmi ceux qui réfléchissent sur les sciences, les philosophes, les historiens, les sociologues, les scientifiques et les éducateurs en sciences, l'accord semble difficile sur une définition spécifique de la nature des sciences. Ainsi, sur la façon dont fonctionnent les sciences Laudan, Donovan, Laudan, Barker, Brown, Leplin, Thagard & Wykstra (1986, p.142, cité par Osborne et al, 2003, p. 695) concluent que *«the fact of the matter is that we have no well-confirmed general picture of how science works, no theory of science worthy of general assent»*. Ziman (2000) note que les philosophes ont échoué à trouver une définition satisfaisante de la nature des sciences malgré leurs efforts héroïques. Osborne et al (2003) remarquent que la dernière décennie a été caractérisée par un débat très intense sur la nature des sciences appelé « la guerre des sciences». Ces débats ont opposé ceux qui considèrent que la connaissance est objective (Popper) et ceux qui suggèrent que les connaissances scientifiques sont des constructions sociales. Des attaques contre la notion de reproductibilité ont été montées par Collins et Pinch (1993). La réponse à ces critiques faite par Fish (1996) sur les pages du New York Times a été virulente et acerbe. Une réponse philosophique plus réfléchie provient de Searle (1995) qui soutient que l'on ne peut pas construire la réalité mais plutôt des représentations de la réalité.

De même, au sein de la communauté des enseignants de sciences, des débats similaires ont eu lieu entre les tenants d'une vision radicale constructiviste sociale de l'apprentissage (Tobin et Tippins, 1993 ; Von Glaserfeld, 1995) et ceux qui la critiquent (Matthews, 1995 ; Osborne, 1996). Dans ce contexte, il est difficile d'affirmer qu'il existe un consensus sur la possibilité de définir la nature des sciences et sur ce qui pourrait être communiqué aux étudiants.

Cependant, parmi ceux qui s'intéressent à l'enseignement des sciences, il existe une position largement partagée stipulant que nous ne devrions enseigner aux élèves que les caractéristiques des sciences les moins controversées. L'objectif est en effet de leur fournir une compréhension générale de ce que sont les sciences, une compréhension accessible pour le niveau de la fin des études secondaires et pertinente pour de futurs citoyens. Cette approche, appelée l'approche consensuelle, met l'accent sur un certain nombre de caractéristiques acceptées par la philosophie des sciences (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000a ; Lederman, 1992, 2004, 2007 ; McComas & al, 1998; Abd-El-Khalick, 2004). Ces caractéristiques, au nombre de sept et appelées « tenets », sont présentées par Lederman de la façon suivante:

Scientific knowledge is tentative (subject to change), empirically based (based on and/or derived from observations of the natural world), and subjective (involves personal background, biases, and/or is theory-laden); necessarily involves human inference,

imagination, and creativity (involves the invention of explanations) and is socially and culturally embedded. Two additional important aspects are the distinction between observations and inferences, and the functions of and relationships between scientific theories and laws (Lederman, 2007, p. 833).

Ces aspects de la nature des sciences se retrouvent parmi la liste d'objectifs d'enseignement communs à huit documents standards internationaux anglo-saxons pour l'enseignement des sciences :

- 1. Scientific knowledge while durable has a tentative character*
- 2. Scientific knowledge relies heavily, but not entirely, on observation, experimental evidence, rational arguments, and skepticism*
- 3. There is no one way to do science (therefore, there is no universal step-by step Scientific method)*
- 4. Science is an attempt to explain natural phenomena*
- 5. Laws and theories serve different roles in science; therefore students should note that theories do not become laws even with additional evidence*
- 6. People from all cultures contribute to science*
- 7. New knowledge must be reported clearly and openly*
- 8. Scientists require accurate record keeping, peer review and replicability*
- 9. Observations are theory-laden*
- 10. Scientists are creative*
- 11. The history of science reveals both an evolutionary and revolutionary character*
- 12. Science is part of social and cultural traditions*
- 13. Science and technology impact each other*
- 14. Scientific ideas are affected by their social and historical milieu. (Mc Comas & al, 1998, pp. 6-7)*

Notons que cette liste d'objectifs n'est pas exhaustive, il existe d'autres aspects que certains chercheurs rajoutent ou suppriment (Osborne et al, 2003 ; Schermann & Smith, 1999). La liste ne peut pas être, non plus, finale car les idées sur les sciences sont mouvantes, perçues comme provisoires et susceptibles de changements. Pour se convaincre, il suffit de comparer les différences parmi les œuvres de Popper (1959), Kuhn (1970), Lakatos (1970), Feyerabend (1975), Laudan (1977), Chalmers (1987) et Giere (1988).

Un aperçu de la signification de chacun de ces aspects est nécessaire afin d'élucider les conceptions qui se tissent autour de chacun d'eux.

1- Caractère provisoire des connaissances scientifiques.

Depuis 2500 ans, une conception très prégnante de l'acquisition de la connaissance fixe les relations de l'humain à son savoir résumée par Larochelle et Désautels (1992) en ces termes : « *l'observateur et les choses observées sont des entités séparées et indépendantes que la capacité de cognition du sujet pensant permet de relier entre elles* » (p.18). Il s'ensuit que la connaissance est un savoir acquis sur ce qu'est la réalité objective, présente là, en face de l'observateur. Cela suppose que ce savoir appartient au monde réel, à la réalité, celle qui existerait « *avant, après et en dehors de l'esprit humain* ». Cette vision considère que la réalité ontologique est accessible à l'être humain et qu'elle peut être saisie dans son essence par la connaissance.

Selon ce scénario, une certaine représentation de la science perçoit le savant comme :

L'observateur par excellence, travaillant en toute objectivité, dévoile peu à peu la réalité telle qu'elle est. Il joue le rôle d'un explorateur ou d'un découvreur de terres inconnues : il découvre les « lois de la nature ». [...] les connaissances objectives qui en découlent deviennent des assertions irréfutables sur la nature ou la réalité. Le champ de la connaissance s'étend ainsi progressivement révélant de mieux en mieux la réalité. Les concepts de vérité, de certitude marquent l'aboutissement du voyage entrepris par le scientifique objectif au cœur même de la réalité. (Larochelle et Désautels, 1992, pp. 20-21).

Il convient de souligner que depuis deux millénaires le concept de vérité est lié à une idée de validité objective traduisant une conviction qui imprègne la philosophie occidentale traditionnelle selon laquelle « la connaissance n'est connaissance que si elle reflète le monde tel qu'il est ». Cette conviction est largement répandue parmi la majorité des savants de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècle qui soutiennent que le XX^e siècle n'ajouterait à leur connaissance que sur le plan de la précision et ne toucherait en aucune façon aux théories établies. Pour Michelson (1852-1931), connu pour ses mesures de haute précision en optique, les exceptions aux présentes lois n'étaient qu'apparentes et seraient résolues par perfectionnement technique mais jamais « en sabrant la base même de la théorie scientifique ».

D'autres savants sont du même avis : Kelvin, Helmholtz, Boltzmann, Poincaré, Rayleigh, Van't Hoff, Oswald et Lorentz, cité par Larochelle et Désautels (1992, p. 21).

L'avènement du XX^{ème} siècle marque une évolution surprenante de la science, sa philosophie et son histoire se trouvent bouleversées. Ainsi, des concepts tels que « la masse », « le temps », « l'espace », ... deviennent méconnaissables. Ce bouleversement en science par rapport à la tradition a été inauguré par la théorie de la relativité puis poursuivit par la théorie du quanta. L'épistémologie traditionnelle a dû remettre en cause nombre de ses postulats et principes : le principe de la simultanéité se trouve éclaté avec l'avènement de la théorie de la relativité, entraînant avec lui la relativisation du temps et de l'espace, le déterminisme qui imprégnait toute la science de ce temps (en particulier la mécanique newtonienne) fut abandonné au profit de l'indéterminisme avec l'apparition de la théorie du quanta.

Il s'est produit une révolution scientifique selon la thèse de Kuhn, le cadre conceptuel dans lequel les savants comprenaient le monde s'est écroulé et un nouveau « paradigme » est né. Il sert désormais de guide à la nouvelle activité scientifique. Les révolutions se succèdent alors chaque fois que le nouveau paradigme connaît de sérieuses difficultés qui engendrent une nouvelle crise.

L'évolution des sciences a donc amené une révision des concepts fondamentaux de l'épistémologie traditionnelle et une remise en question de la conception du mode de construction des connaissances. L'observateur ne peut plus être isolé du phénomène observé, le savoir ne peut plus porter sur une réalité ontologique à laquelle on ne peut pas accéder et qui est gouvernée par des lois immuables; les réponses ne sont plus définitives mais construites dans un contexte d'incertitude et sont susceptibles de changements. Selon cette nouvelle vision *« les savants qui entérinent ces nouvelles théories acceptent de voir le monde différemment, non parce que ce dernier a changé en soi, mais parce qu'ils voient le monde à travers une nouvelle interprétation qu'ils tirent essentiellement de leurs nouvelles conceptualisations »* précisent Larochelle et Désautels (1992, p.23). Cette idée concorde avec celle avancée par Glasersfeld qui stipule que *« les conclusions auxquelles arrive un scientifique sont, en toutes circonstances, conditionnées par sa façon de voir, sa façon d'observer et sa façon de lier conceptuellement les éléments qu'il découpe même à son expérience »* (cité par Larochelle & Désautels, 1992, p.23).

Ce faisant, les philosophes renoncent à la conception traditionnelle de la connaissance et adhèrent à la vision contemporaine bien qu'elle ne fasse pas l'unanimité. Ils considèrent que la

connaissance scientifique, bien que fiable et durable, n'est jamais absolue ou certaine. Cette connaissance, y compris les faits, les théories et les lois, est sujette à des changements. Les prétentions scientifiques changent à mesure qu'une nouvelle preuve est rendue possible grâce aux progrès de la pensée et de la technologie. Le changement pourrait prendre au moins deux formes, le progrès (Popper, 1972,1998) ou la révolution (Kuhn, 1970). Les nouvelles connaissances peuvent survenir en affinant les connaissances anciennes ou à partir d'une nouvelle vision du monde.

2- La connaissance scientifique repose en grande partie, mais pas entièrement, sur l'observation, les preuves expérimentales, les arguments rationnels, et le scepticisme.

Un point de vue communément admis considère que les connaissances scientifiques sont élaborées de façon rigoureuse à partir des faits livrés par l'observation et l'expérience. Selon cette vision, il n'y a pas de place dans la science pour l'imagination, l'opinion personnelle et les attentes de l'observateur. Les énoncés d'observation qui forment la base de la science sont sûrs et dignes de foi parce que leur vérité peut être assurée par le recours direct aux sens. Cette conception de la science remonte au XVII^{ème} siècle et trouve dans les expériences de Galilée et Newton le plus grand soutien. Elle est construite autour de l'idée clé suivante: l'observation est première, elle constitue une base sûre à partir de laquelle il est possible d'extraire la connaissance scientifique par double processus d'induction et généralisation.

Cependant, une revue de l'histoire des sciences (Niaz & Marza, 2011) montre qu'afin d'élaborer des connaissances, les scientifiques font des observations, réalisent des expériences et recueillent des données, guidés par leurs présupposés. Les savoirs produits n'étant pas systématiquement acceptés, cela les conduit inévitablement à débattre avec leurs pairs et collègues. Les arguments rationnels avancés par eux-mêmes ne résolvent pas tous les problèmes, car les scientifiques résistent à des changements dans leur façon particulière d'interpréter les données, et n'abandonnent pas le noyau dur de leur programme de recherche dès que les données anormales commencent à affluer (Lakatos, 1970). En d'autres termes les scientifiques sont sceptiques sur les données et les interprétations. La compréhension des données est un processus long et complexe et nécessite énormément d'ingéniosité et de créativité de la part des scientifiques (McComas & al, 1998).

Il faut noter que les spéculations et les arguments rationnels constituent aussi des moyens parmi d'autres sur lesquels les scientifiques s'appuient pour élaborer des connaissances scientifiques.

Martin Perl, prix Nobel de physique 1995, dans sa recherche sur les quarks a élaboré une philosophie d'expériences spéculatives, il écrit :

Choices in the design of speculative experiments usually cannot be made simply on the basis of pure reason. The experimenter usually has to base her or his decision partly on what he feels right, partly on what technology they like, and partly on what aspects of the speculations they like. (Perl & Lee 1997, p. 699).

La conception contemporaine considère en effet, que l'élaboration des connaissances scientifiques s'appuie principalement mais pas totalement sur l'observation, les preuves expérimentales, les arguments rationnels, et le scepticisme.

3- Mythe de la méthode scientifique

L'une des idées fausses les plus répandues sur la science est l'existence d'une méthode scientifique. Cette idée remonte au XVIIème siècle, où Francis Bacon [1620-1696] fut l'un des premiers qui a tenté de formuler dans son *Novum Organum* ce qu'est la méthode scientifique moderne. Elle a été proposée afin de garantir une connaissance « certaine ». Selon Chalmers (1987), cette méthode « *consiste d'abord à recueillir des « faits » par de soigneuses observations et expériences, puis à en tirer des lois et des théories par une procédure logique* » (p. 14). Il précise que cette méthode est très répandue parmi les instances scientifiques les plus élevées à tel point qu'une façade du bâtiment des sciences sociales de l'université de Chicago porte l'inscription « *sans la possibilité de mesurer, le savoir n'est qu'une peau de chagrin* » (p.15). Commentant cette inscription, il dit :

Sans doute, beaucoup de ses occupants, emprisonnés dans leurs laboratoires modernes, examinent le monde à travers les barreaux des nombres entiers, sans se rendre compte que la méthode qu'ils tentent de suivre, n'est pas seulement stérile et improductive mais, pis, qu'elle n'est pas celle à laquelle la physique doit son succès. (p. 15)

Certaines positions, en particulier l'inductivisme et le falsificationnisme, sont encore largement répandues dans des manuels de sciences et même explicitement enseignées dans les classes.

Le mythe de la méthode scientifique a été explicitement démystifiée: il n'existe pas de méthode scientifique qui garantirait le développement infaillible de la connaissance (Chalmers, 1987 ; AAAS, 1993; Feyerabend, 1975; NRC, 1996). Lederman, Abd-El-Khalick et Schwartz (2002) déclarent:

The myth of the scientific method is regularly manifested in the belief that there is a recipe like stepwise procedure that all scientists follow when they do science. This notion was explicitly debunked: There is no single scientific method that would guarantee the development of infallible knowledge. (p. 501)

Ils poursuivent en précisant:

It is true that scientists observe, compare, measure, test, speculate, hypothesize, create ideas and conceptual tools, and construct theories and explanations. However, there is no single sequence of activities (prescribed or otherwise) that will unerringly lead them to functional or valid solutions or answers let alone certain or true knowledge. (p. 501)

Les développements modernes sur les théories de la méthode scientifique se référant à l'histoire des sciences montrent que des avancées majeures telles que les « découvertes » de Galilée, Newton, Darwin ou Einstein n'ont pas eu lieu selon les schémas généralement décrits par les philosophes (Chalmers, 1987).

L'une des critiques les plus virulentes de l'existence d'une méthode scientifique est celle présentée par Paul Feyerabend dans son livre « *Contre la méthode : esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance* ». Pour lui aucune des méthodologies existantes ne parvient à rendre compte de ce qu'est la science, son argument est qu'elles ne s'accordent pas avec l'histoire des sciences. Il écrit :

L'idée que la science peut, et doit, être organisée selon des règles fixes et universelles est à la fois utopique et pernicieuse. Elle est utopique, car elle implique une conception trop simple des attitudes de l'homme et des circonstances qui encouragent, ou causent, leur développement. Et elle est pernicieuse en ce que la tentative d'imposer de telles règles ne peut manquer de n'augmenter nos qualifications professionnelles qu'aux dépens de notre humanité. En outre, une telle idée est préjudiciable à la science, car elle néglige les conditions physiques et historiques complexes qui influencent en réalité le changement scientifique. Elle rend notre science moins facilement adaptable et plus dogmatique. [...] Des études de cas comme celles des chapitres précédents [...] témoignent contre la validité universelle de n'importe quelle règle. Toutes les méthodologies ont leurs limites, et la seule « règle » qui survit, c'est : « tout est bon. » (Feyerabend, 1975, pp. 332-333).

Il est vrai que dans chaque enquête scientifique, il y a des observations, des déductions, des interprétations, des hypothèses, etc. Ces processus ne peuvent pas être systématisés, et c'est précisément pourquoi la méthode scientifique est objet de critiques.

La vision de l'épistémologie contemporaine souligne qu'il n'existe pas une procédure mécanique qui détermine étape par étape la production de connaissances et que tous les scientifiques suivent en tentant de répondre à des questions scientifiques.

4- La science est une tentative pour expliquer des phénomènes naturels

Depuis l'antiquité, des philosophes comme Platon, Aristote et d'autres ont cherché à comprendre le monde. Différentes tentatives ont été avancées pour expliquer les phénomènes naturels. Pour Platon, la maïeutique permet la production de la vérité en remontant de concepts en concepts jusqu'aux principes premiers ; pour Aristote, les idées sont reçues au contact de l'expérience, une première forme d'empirisme ; pour Descartes, toute connaissance certaine découle de la « raison », elle domine sur les données des sens.

Dès cette époque, une manière de penser l'acquisition des connaissances s'instaure de façon relativement stable. On s'entend pour dire que, dès le départ, le sujet existe indépendamment de l'objet à connaître. Cette vision prône l'existence d'une réalité ontologique extérieure au sujet connaissant et qu'elle lui est accessible. Cette façon de « connaître » a marqué et imprègne encore l'épistémologie traditionnelle.

Si les courants inductiviste et falsificationniste adhèrent encore à cette représentation courante de la science, le constructivisme refuse cette séparation et considère que les connaissances n'existent pas en soi parce qu'elles ne peuvent être que construites par le sujet connaissant et que le savoir construit ne peut en aucune façon porter sur une réalité ontologique à laquelle il ne peut pas accéder. Les conclusions auxquelles arrive le scientifique dépendent de différents contextes : historique, social, économique, etc. Ainsi, les théories et lois élaborées sont considérées comme des modèles théoriques ou des représentations qu'on trouve intéressantes :

Il n'y a pas qu'une, mais une infinité de manières de se représenter le monde d'une façon satisfaisante. Elles seront plus ou moins satisfaisantes selon le contexte, les projets que l'on a, et ce qu'on désire faire avec elles. Mais elles ne sont pas équivalentes. (Fourez, 2002, p. 62).

En préconisant une approche historique d'enseignement des matières scientifiques, Postman (1995, p. 124) écrit : « *Je ne vois pas de meilleure façon de démontrer que la connaissance n'est pas une chose fixe, mais une lutte continue pour surmonter les préjugés, l'autoritarisme, et même le sens commun* ». De ce fait, la science ne peut être qu'une tentative pour expliquer les phénomènes naturels.

5- Les lois et les théories

Une théorie est un système cohérent qui coordonne, relie et unifie des lois, des hypothèses, des principes et des modèles.

Selon Lederman, Abd-El-Khalick, Bell et Shawartz (2002), les théories scientifiques sont souvent basées sur un ensemble d'hypothèses ou d'axiomes et postulent l'existence d'entités non observables. Les théories permettent d'expliquer de grands ensembles d'observations sans lien apparent dans plus d'un champ d'investigation. Par exemple, la théorie cinétique moléculaire des gaz sert à expliquer des phénomènes liés aux changements de l'état physique de la matière, le taux de réaction chimique et d'autres phénomènes liés à la chaleur et à son transfert. Ils précisent que :

Theories cannot be directly tested. Only indirect evidence can be used to support theories and establish their validity. Scientists derive specific testable predictions from theories and check them against tangible data. An agreement between such predictions and empirical evidence serves to increase the level of confidence in the tested theory. (p. 500)

Une théorie est déduite des explications des phénomènes observables ou des régularités dans ces phénomènes. Elle possède quatre fonctions : explicative-prédictive, unificatrice, heuristique et de représentation.

Une loi est utilisée pour exprimer ce qui a été observé et prédire ce qui n'a pas encore été observé (Carnap, 1966/1998, cité par Chen (2006). Plus précisément, Lederman (2002) définit les lois comme des énoncés descriptifs des relations entre les phénomènes observables.

6- Le multiculturalisme scientifique

Ahmed Djebbar (2001) préfaçant son livre « *une histoire de la science arabe* » écrit « *l'histoire de la science occidentale a si longtemps affirmé qu'entre « miracle grec » et la Renaissance, l'obscurantisme le plus total avait régné, que l'on avait presque fini par le croire* ». Cette exclamation illustre l'idéologie prégnante dans la science occidentale, de la

période colonialiste jusqu'à un passé proche, qui proclame sa supériorité et sa domination. Tendante à ignorer ou à marginaliser les autres savoirs, elle a nié tôt l'apport des civilisations indienne, persane, chinoise et arabo-musulmane. Exacerbé par le succès de la science et de la technologie modernes et par la puissance économique qui l'accompagne, la culture expansionniste a détruit une grande partie des connaissances indigènes et l'a remplacée par le système éducatif et politique européen. En effet, l'éducation coloniale conçue pour les peuples autochtones a utilisé la science comme outil de choix pour remplacer la culture indigène et pour imposer un changement sur ces sociétés. Pour les occidentaux, les savoirs locaux sont le plus souvent vus comme inférieurs aux savoirs diffusés qui seraient modernes et universalistes. De ce fait, Ferrière souligne lors de son intervention au IV^{ème} congrès de la société de la philosophie des sciences à Montréal en juin 2012 qu'ils :

N'appartiennent pas à la « culture scientifique » habituellement médiatisée et enseignée et ne sont pas présentés comme des savoirs légitimes ou authentiques. [...] En tout cas, ils sont toujours placés dans une échelle de valeur et de scientificité au sommet de laquelle se trouvent les savoirs diffusés prétendument occidentaux.

Cobern et Loving (2000) indiquent que devant cet ostracisme, dans les années 1990, des peuples non-occidentaux et quelques savants au sein de l'Occident ont commencé, officiellement et ouvertement, à résister à cette attitude impériale de l'Occident envers les connaissances indigènes de la nature. Ils soulignent ainsi que:

This movement was abetted by the program for the social study of science, founded in the 1970s at Edinburgh (Bloor & Barnes, 1996), which argued that all science is socially contingent and culturally embedded. New epistemological perspectives such as multiculturalism (Stanley & Brickhouse, 1994), post-colonialism (McKinley, 1997), and postmodernism (Lyotard, 1995) rose to challenge the conventional Western wisdom on the relationship between science and culture and the Standard Account itself. (Cobern & Loving, 2001, p. 54)

En matière d'éducation aux sciences, Hodson (1993, p. 686) a soutenu que souvent les programmes de sciences représentent « *science as located within, and exclusively derived from, a western cultural context. The implicit curriculum message is that the only science is western science* » (cité par Cobern & Loving, 2000, p. 54).

Nakashima (2000) défend l'existence d'autres systèmes de connaissance et estime que notre compréhension de la science est un système de connaissances parmi beaucoup d'autres.

Ainsi, selon Mazrui et Ade Ajayi (1998, cité par Iaccarino, 2003), la science et la technologie en Afrique précoloniale étaient autrefois assez avancées, comparables aux niveaux européens de l'époque, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire, l'agriculture, la conservation des aliments, la fermentation, la métallurgie et la préparation du savon et de cosmétiques ; les Mayas en Amérique du Sud ont élaboré un calendrier très sophistiqué à travers leurs observations du Soleil et les étoiles. Les indiens d'Amérique et les arborigènes australiens ont rassemblé une immense quantité de connaissances biologiques sur la base de leurs observations de la nature. Les théories médicales de la Yorubas du Nigeria incluent le concept d'entités invisibles qui causent des maladies infectieuses, analogues à des bactéries de la médecine occidentale. Iaccarino termine la présentation de son point de vue sur la science et les cultures par ces mots:

As modern science is reaching its limits when attempting to explain the inner workings of the world around us, we should perhaps remember and re-evaluate the contributions of other cultures to the understanding of nature, as the Renaissance scientists did with the ancient knowledge of the Greek and Arab scholars. (Iaccarino, 2003, p. 223)

Nous adhérons à l'idée que les gens de toutes les cultures contribuent à la science, que la science a une pluralité d'origines et une pluralité de pratiques et qu'il n'y a pas une seule façon de faire ou de penser une science.

7- 8 - Les nouvelles connaissances doivent être rapportées clairement et mises à la disposition des autres – les scientifiques doivent tenir des rapports précis, soumettre leur travail à l'examen des pairs et que celui-ci soit reproductible.

Martin (2000- 2001, p. 36) dans l'article « *la construction sociale des sciences* » rappelle les quatre normes de R.K.Merton qui régissent les institutions scientifiques et leurs membres. La première, *l'universalisme*, stipule que les connaissances issues de la recherche scientifique sont, entre autres, universelles : de ce fait, les critères d'évaluation des résultats doivent être impersonnels et indépendants des circonstances. La seconde, *le communalisme*, indique que les connaissances scientifiques sont collectives et n'appartiennent à personne : de ce fait, les scientifiques ne sont pas propriétaires de leurs découvertes ou inventions et les publient dans des revues accessibles à tous. La troisième, *le désintéressement*, précise que les chercheurs ne

sont pas animés par des intérêts privés mais seulement par la volonté de transmettre les résultats scientifiquement valides, ils n'ont aucun intérêt à faire circuler un résultat douteux. Cela explique selon Merton « *la quasi-absence de fraudes dans les annales de la science* » (Merton 1973 [1942], p. 276). Cette troisième norme a soulevé de vives critiques. La quatrième souligne l'existence d'un *scepticisme organisé* qui impose que, pour être acceptés, les résultats doivent être soumis à la critique, à l'examen par les pairs et à la vigilance de la communauté scientifique, ce qui ajoute à la validité des nouvelles connaissances scientifiques.

Les normes précitées qui régissent les conditions de production des connaissances imposent que celles-ci doivent être totalement disponibles, clairement signalées.

9- Les observations scientifiques ne sont pas neutres

Le point de vue inductiviste considère que les sciences partent de l'observation fidèle de la réalité, celle-ci est faite par un observateur dénué de tout préjugé. Les énoncés d'observation communément admis constituent donc le fondement sûr et digne de foi des lois et des théories scientifiques. Selon cette vision, les énoncés d'observation peuvent être certifiés par n'importe quel observateur utilisant correctement ses sens. Ainsi, « *la validité des énoncés d'observation correctement obtenus ne dépendra ni du goût, ni de l'opinion, des espoirs ou des attentes de l'observateur* » (Chalmers, 1987, p.35). L'observation serait alors objective.

Mais l'on peut se poser deux questions : qu'est ce qu'observer ? L'observation est-elle vraiment objective ?

Un point de vue commun sur la vision peut considérer qu'elle se fait avec les yeux, un système optique équivalent à des lentilles permettant la formation d'une image sur la rétine. L'objectivité de l'observation découlerait alors de l'image rétinienne. Or, différentes études physiologiques, psychologiques et neurologiques indiquent que les sens peuvent se tromper et que des écarts importants ont été observés entre plusieurs personnes observant le même objet. Il semble que ce que perçoivent les observateurs dans l'acte de voir n'est pas uniquement déterminé par les images formées sur la rétine, ce qui est vu dépend aussi du contexte ou se situe l'observateur, de son expérience passée, de ses connaissances et de ses attentes .

En critiquant l'observation objective, Fourez (2002) remarque que l'action d'observer est une description en fonction d'un projet et que cette description ne peut se faire qu'au moyen de notions qui se réfèrent toujours, par la médiation d'un langage, à une représentation théorique implicite, « *s'informer, ce n'est pas recevoir une entité extérieure qui serait l'information.*

C'est interpréter le monde dans un univers commun de langage. » (p.33). Il souligne également que cette interprétation est un phénomène social car, si la construction est individuelle et se fait dans la tête de chacun, elle n'est pas faite par des personnes isolées. Ainsi, des observateurs normaux, regardant le même objet au même endroit, vont l'interpréter chacun à sa façon et par conséquent, ils ne voient pas nécessairement la même chose.

Fourez (2002), se référant à Prigogine et Stengers (1980), précise que *« les scientifiques ne sont donc pas des individus observant le monde en partant de rien ; ce sont les participants d'un univers culturel et linguistique dans lequel ils insèrent leurs projets individuels et collectifs »* (p.37). Il poursuit en soulignant que :

La notion d'observation « complète » n'a évidemment aucun sens, puisqu'observer, c'est toujours sélectionner, structurer, et donc abandonner ce qu'on ne prend pas. Rien n'est plus étranger à l'observation scientifique qu'une observation « complète » ; si l'on poursuivait un tel but, on ne ferait jamais de la science, on en resterait toujours à l'observation. (pp. 37-38).

Fourez termine sa thèse par la conclusion :

Une observation scientifique ce n'est pas une « observation neutre », ni une « observation complète », mais, au contraire, une observation utilisant une grille de lecture et éliminant tout ce que cette communauté scientifique ne trouve pas intéressant à observer. [...] L'observation neutre, face à l'objet, est une fiction. (p.38)

De son côté, Chalmers critiquant le point de vue inductiviste qui considère que les énoncés d'observation constituent la base sûre des lois et théories scientifiques, s'appuyant sur plusieurs exemples, arrive à la conclusion qu'une observation n'est pas neutre et qu'elle est toujours guidée par une théorie :

Les énoncés d'observation seront toujours formulés dans le langage d'une théorie et seront aussi précis que le cadre théorique ou conceptuel qu'ils utilisent. [...] Des théories précises, clairement formulées, sont une condition préalable pour que des énoncés d'observation soient précis. En ce sens, la théorie précède l'observation. (Chalmers, 1987, p.61).

10- les scientifiques sont créatifs

La conception liée au mythe de l'universalité de la méthode scientifique stipule que la science est de nature procédurale et algorithmique. L'existence d'un ensemble fixe d'étapes que tous les scientifiques suivent quand ils font de la science garantirait le développement de la connaissance infaillible et objective. Contrairement à la croyance commune, la science ne se développe pas en faisant appel à l'objectivité dans un sens absolu, la créativité et les présupposés jouent aussi un rôle crucial. Lederman (2007) précise que les scientifiques font usage de leur imagination et créativité pour proposer des explications, concevoir des modèles théoriques et inventer des lois :

Even though scientific knowledge is, at least partially, based on and/or derived from observations of the natural world (i.e., empirical), it nevertheless involves human imagination and creativity. Science, contrary to common belief, is not a totally lifeless, rational, and orderly activity. Science involves the invention of explanations, and this requires a great deal of creativity by scientists. This aspect of science, coupled with its inferential nature, entails that scientific concepts, such as atoms, black holes, and species, are functional theoretical models, rather than faithful copies of reality. (p.834).

Mc Comas (2008) raconte qu'August Kekule, perplexe devant la structure du benzène, voyant un serpent se mordre la queue, propose dans un éclat de génie que la molécule est circulaire. Il rapporte que Okacha (2002) et Derry (1999) racontent tous deux la même histoire, le premier l'utilise pour noter que le nouveau modèle doit être testé contre les données disponibles et le second pour parler de la façon dont le nouveau modèle a expliqué les phénomènes par rapport à la preuve. Cependant, aucun des ces deux auteurs n'évoque cet exemple pour montrer le lien entre la découverte et la pensée créatrice. Devant cette attitude, Mc Comas déclare: «*It is revealing that neither of these authors focuses much on the role of creativity in science, and so did not choose this example to demonstrate the necessary link between discovery and creative thinking.*» (p. 256)

En fait, les théories et les lois vont au-delà des données d'observation et d'expérimentation et, pour cette raison, elles ne sont pas réductibles à elles. Leur inférence et leur construction nécessitent beaucoup d'imagination et de créativité car il n'existe pas de méthodologie ou de règles méthodologiques qui les génèrent mécaniquement. Pour ces raisons, il y aura toujours place pour la créativité dans la construction de modèles, dans l'élaboration des théories et dans la découverte des lois en sciences.

L'histoire des sciences est riche en exemples montrant que les scientifiques recourent à la créativité lors de la réalisation d'une expérience, l'élaboration d'un modèle, l'invention des explications ou d'entités théoriques. On peut citer, parmi d'autres exemples, le modèle atomique de Bohr avec ses sauts spectraux, ses orbites et ses niveaux d'énergie, la relativité restreinte, les liaisons chimiques, les spins, le graviton, le photon, les quarks, etc.

11- L'histoire de la science révèle à la fois un caractère évolutif et révolutionnaire

L'interprétation de la dynamique des sciences oppose deux points de vue.

La thèse continuiste qui prône l'évolution continue des connaissances selon laquelle les sciences progressent en suivant un processus cumulatif continu: les connaissances nouvelles, à valeur explicative de plus en plus étendue, s'ajoutent et s'accumulent de sorte que l'on se rapprocherait au fur et à mesure d'une compréhension complète de la nature. Finalement, le développement serait linéaire au sens où il s'agirait d'un progrès soutenu où le passé serait garant de l'avenir. Cette analyse a été défendue par de nombreux philosophes et épistémologues positivistes au début du XX^{ième} siècle, dont Pierre Duhem (1861-1916).

La thèse discontinuiste qui prône l'évolution discontinue des connaissances scientifiques selon laquelle le développement des disciplines scientifiques fait apparaître des ruptures radicales, des discontinuités profondes. Celles-ci se traduisent par l'abandon de certains modèles ou certaines théories qui sont remplacées par de nouvelles, jugées très différentes, voire contradictoires. Cette thèse a été développée entre autres par Bachelard (1884-1962) et Thomas Kuhn (1922-1996).

Pour Bachelard (1938) et Kuhn (1970), par exemple, l'évolution scientifique se fait par rupture avec les théories admises antérieurement: « *On connaît contre une connaissance antérieure.* » Il faut donc être en mesure de surmonter les obstacles si on veut contribuer à l'avancement des connaissances, obstacles qui apparaissent nécessairement dans l'interprétation des phénomènes que l'on cherche à analyser plus finement. Le dépassement d'obstacles, les contradictions ou « anomalies » découvertes peuvent même conduire à des ruptures avec les modes précédents de description et prendre un caractère de « révolution ».

Ainsi, de nouvelles théories, de nouvelles idées, contredisant celles qui prévalaient jusqu'alors, émergent afin de résoudre des difficultés jusqu'alors inaccessibles et tentent de s'imposer pour relancer le processus de la « science normale » suivant le terme qu'utilise Kuhn. Pour ce dernier, les révolutions scientifiques sont systématiquement associées à l'idée de progrès

scientifique qui est caractérisé par la concurrence entre des théories rivales. Il s'agit d'un progrès à partir d'un « paradigme » originel source de problèmes vers un nouveau « paradigme » prometteur, et non plus vers la « vérité ».

La conception évolutionniste du progrès scientifique liée à l'idée de révolution, aujourd'hui la plus couramment acceptée, suppose que sont retenues seulement les théories victorieuses (car plus adaptées). En ce sens le progrès n'est pas orienté d'avance. Il ne progresse pas vers un but unique. L'idée d'une concurrence entre différentes théories disponibles au même moment permet de concevoir le progrès comme non nécessaire et non continu.

Notons enfin, que c'est l'interprétation faite de l'histoire des disciplines scientifiques qui oppose les défenseurs des deux thèses et non pas la reconnaissance des faits, dates, et contributions des scientifiques du passé.

12- La science fait partie des traditions sociales et culturelles

La perspective historique voit les sciences comme une entreprise humaine « faites par et pour les hommes ». Elles sont alors considérées comme une construction historique conditionnée par une époque donnée et des projets spécifiques au sein d'une société bien déterminée, elles sont issues de problèmes que les hommes se posent dans un contexte culturel précis. Selon Lederman (1998), les sciences sont pratiquées dans le contexte d'une plus grande culture et ses praticiens sont le produit de cette culture :

Science, it follows, affects and is affected by the various elements and intellectual spheres of the culture in which it is embedded. These elements include, but are not limited to, social fabric, power structures, politics, socioeconomic factors, philosophy, and religion.

Des exemples peuvent aider à illustrer l'influence du social et du culturel sur la production du savoir scientifique. Ainsi, l'astronomie d'observation chez les musulmans s'est développée pour résoudre entre autres, des problèmes de la cité liés aux pratiques religieuses (connaissance des moments de prière, détermination de la direction de la Quibla), la confection du calendrier pour déterminer le dernier et le premier jour du mois lunaire. Iaccarino (2003) précise que les méthodes avec lesquelles les communautés cherchent à résoudre les problèmes qu'elles affrontent dépendent de la culture et la philosophie dominante : « *In this endeavor, we might find it useful to compare Western science with traditional knowledge. Whereas Western science favours reductionist, mechanistic and quantitative methods, traditional knowledge observe natural phenomena from a global point of view.* » (p. 223)

La science est une activité sociale complexe, elle dépend de la culture dans laquelle elle se pratique et l'affecte.

13- La Science et la technologie ont un impact l'une sur l'autre, mais elles ne sont pas identiques

Une conception ancienne soutient que les scientifiques générèrent de nouvelles connaissances que les technologues appliquent. Cette conception accorde une position hiérarchique de la science vis-à-vis de la technologie. Alexandre Koyré avait une vision très différente de la relation hiérarchique science-technologie. Il n'a pas réduit la technologie aux techniques, au contraire, il a insisté pour que la technologie soit un système de pensée indépendant et différent de la science (cité par Edwin T. Layton, Jr, 1974, p. 35).

Fourez (2002) distingue entre les sciences pures ou fondamentales et les sciences appliquées. Les premières recherchent la connaissance tandis que les secondes le progrès technique. Il appelle :

Sciences pures ou fondamentales, une pratique scientifique qui ne se préoccupe guère des applications possibles dans un contexte de société, mais se concentre sur l'acquisition de connaissance nouvelle. [...] mais s'il [le physicien] se préoccupe de voir comment ses recherches peuvent être utilisées par la technologie des lasers, on dira qu'on a affaire à des sciences appliquées, c'est-à-dire un travail scientifique à destination sociale directe. Les ingénieurs et les médecins sont considérés, presque par définition, comme des scientifiques appliqués. [...] On parlera enfin des technologies lorsqu'il s'agit d'applications concrètes et opérationnelles dans un contexte social déterminé. [...] En pratique, les notions de sciences appliquées et de technologies sont souvent amalgamées. (p.206)

Sur la question de l'interaction science - technologie, nous soutenons le point de vue de Sørensen et Levold (1992) et Sørensen (1994) explicité par Fourez (2002) :

Il semble bien qu'il soit plus adéquat de dire qu'il y a sans cesse des interactions entre les gens du type « ingénieurs », « médecins », « architectes » et d'autres qu'on appelle des « scientifiques fondamentaux ». Les techniciens font avancer les sciences, et vice versa. Il faut aussi insister sur le fait patent mais souvent oublié que les modèles théoriques des techniciens peuvent parfois être bien plus complexes et élaborés que ceux des scientifiques se disant fondamentaux. Les uns ne sont pas des théoriciens, tandis que

les autres appliquent des recettes. Au contraire, dans les deux types de pratiques, une grande théorisation est parfois nécessaire, tandis qu'à d'autres moments on procède par « petits pas » pragmatiques, à la mode de recettes. (p.207)

Il serait donc important d'abandonner l'image classique selon laquelle certaines théories sont nécessairement pré-requises pour aborder certaines techniques.

14-les idées scientifiques sont affectées par leurs milieux historique et social

Selon un premier regard, l'activité scientifique serait un travail de longue haleine en vue de la découverte de la réalité fondée sur une observation attentive et fidèle des faits. Dans cette conception, le rôle des scientifiques est de « décrypter » le réel sans le moindre présupposé à son égard, sans autre projet avoué que de comprendre le monde tel qu'il est, dans sa complexité. Selon Mathy (1997), pour les tenants de cette vision, il ne s'agit guère de question des modèles que les hommes de science construisent pour tenter de se représenter le monde, ni de projets singuliers qui sont à la base de leur élaboration. Pour eux, les scientifiques n'ont rien à décider ou à choisir, ils n'ont pas à se battre pour imposer leurs modèles ou pour en évincer d'autres. Ils doivent seulement chercher à dévoiler le « réel » caché quelque part dans les événements du monde. Selon cette vision, les scientifiques apparaissent comme des gens hors du commun produisant un savoir véritable, absolu, universel, au dessus « des contingences et des intérêts du temps » et sans contexte.

Le second regard considère que les scientifiques et leurs travaux reflètent l'ensemble de la culture d'une société et son fonctionnement à une époque donnée (Allchin, 2003), que la connaissance scientifique est développée dans le cadre d'une série de contraintes qui peuvent lui donner sa forme et ses usages (Osborne et al, 2003), que l'évolution des connaissances scientifiques n'est pas entreprise dans l'isolement, mais est façonnée par des contextes historiques particuliers et les paradigmes acceptés à une époque donnée.

Les idées et les théories scientifiques acceptées sont relatives et affectées par les données recueillies, les interprétations et les explications envisagées dans un milieu social donné et caractéristique d'une histoire donnée.

Cette vision évite l'écueil d'une confiance absolue dans le discours scientifique et montre que cette entreprise, comme tout autre, est traversée par les conflits d'intérêts liés aux choix contradictoires des groupes humains en société (Mathy, 1997).

1.5. L'approche de Irzik et Nola : la ressemblance familiale

1.5.1. Les lacunes et faiblesses du consensus

Irzik et Nola (2010) émettent des réserves sur la pertinence de l'approche de Lederman. Ils défendent l'« *approche par ressemblance familiale* » comme une alternative puissante. Les objections soulevées par les auteurs contre la liste consensuelle des aspects de la nature des sciences sont :

Premièrement,

- la liste dépeint une image trop étroite de la science et ne fait aucune mention des objectifs de la science ou de ses règles méthodologiques sans lesquelles, il est difficile de voir comment la science pourrait être autocorrective et fournirait des connaissances fiables :

First of all, it portrays a too narrow image of science. For example, there is no mention of the aims of science or methodological rules in science. The issue of methodology seems to be dismissed altogether by saying that there is no single method for doing science. While it is certainly true that there is no single scientific method in the sense of a mechanical procedure that determines knowledge production step by step, there are general methodologies (such as the hypothetico-deductive method of testing) and methodological rules (such as those that tell us to avoid making ad-hoc assumptions to save theories from refutation) that guide scientific practice in general ways. Moreover, without the idea of a scientific method or methodological rule, it is difficult to see how science can be self-corrective and provide reliable knowledge. (Irzik & Nola, 2010)

- les auteurs considèrent comme artificielle l'exclusion de l'investigation scientifique de la nature des sciences. En effet, des activités comme la collecte de données, la classification, l'analyse, l'expérimentation et les inférences - bien qu'elles constituent des compétences que les élèves doivent acquérir pour faire de la science, elles sont toutes des parties de la science et par conséquent, devraient être incluses dans la nature des sciences :

In a similar vein, most of the items in the list pertain to scientific knowledge, and scientific inquiry, by which scientific knowledge is produced, are deliberately left out since it is believed that «NoS refers to the epistemological underpinnings of the activities

of science», not to the scientific inquiry or processes (Lederman 2004, p. 308). But this way of excluding scientific inquiry from NOS is artificial; after all, scientific inquiry such as data collecting, classifying, analyzing, experimenting and making inferences are all parts of science and this fact itself should be included in NoS. (Ibid.)

Deuxièmement,

- le consensus dépeint une image trop monolithique de la science et reste aveugle aux différences entre les disciplines scientifiques. En effet, il met dans le même sac par exemple, l'astronomie et la cosmologie, deux disciplines connues comme non expérimentales avec la chimie, discipline expérimentale.
- le point de vue consensuel fait apparaître la NoS comme fixe et intemporelle ce qui donne aux élèves l'impression que la science n'a pas d'antécédent et qu'il n'y a pas de place pour le changement dans sa nature, cependant « *history of science teaches us that its nature did change and evolve, albeit slowly. For example, more and more disciplines became mathematical in time and new methodological rules have been added to the stock of science.* » (Ibid.)
- Troisièmement,

Pour les auteurs, certains aspects de la liste consensuelle semblent manquer suffisamment de cohérence et d'unité systématique. De plus, des questions qui en découlent ne sont pas suffisamment remarquées ou traitées, ainsi :

- Dire que « la connaissance scientifique est non neutre et subjective », cela rend-il l'objectivité de la science impossible ? Si la science est socialement et culturellement intégrée, comment se fait-il, qu'elle produit des connaissances qui sont valables dans toutes les cultures et les sociétés ? L'influence de la société sur la science est-elle bonne ou mauvaise ? Comment fera-t-on la distinction entre ces deux types d'effets ? La science dispose-t-elle de moyens pour détecter les mauvais et les éliminer ? De telles questions doivent être soulevées si on veut inculquer aux élèves une compréhension sophistiquée de la nature des sciences précisent les auteurs.
- L'observation est-elle seulement celle effectuée par les humains ? Que dit-on des observations pertinentes réalisées par les engins ou les satellites spatiaux de détection de toutes sortes ?

Such is the case in remote sensing satellites which record features of the earth's surface (vegetation, water) or in balloons sent aloft to detect levels of ozone in the stratosphere. These devices collect relevant data, but no human observation need be involved. Looked at in this way, human observation is a species of the more generic data collecting by a range of detecting devices. (Ibid.)

- Les sciences partagent des caractéristiques comme l'observation et l'inférence, mais ces caractéristiques ne sont pas suffisantes pour les définir ou les démarquer des autres activités humaines. Ainsi, la traversée d'une route dans une circulation dense, l'observation d'un train qui passe ou d'un chef d'orchestre en exécution n'est pas nécessairement une « science ». L'inférence n'est pas exclusive aux scientifiques. « Les juges dans un tribunal » ou des « spéculateurs sur le marché boursier » font également des inférences, mais ils ne font pas de science.
- Toutes les disciplines scientifiques ne partagent pas tous les aspects de la liste consensuelle. Si la majorité parmi elles sont expérimentales comme la chimie, la physique des particules, la botanique, certaines ne le sont pas comme l'astronomie. La plupart des sciences ont pour but de faire des prédictions, surtout des prédictions originales, mais ne réussissent pas toutes. La mécanique céleste est très bonne pour prédire la position des planètes en revanche, même si la biologie évolutionniste fait un travail merveilleux dans l'explication de l'évolution des espèces, elle n'a produit aucune prédiction originale précise. De même, la sismologie fait un bon travail dans l'explication du phénomène du tremblement de la terre et réussit assez bien à prédire leurs emplacements mais jusqu'ici elle ne peut prédire le moment où vont se produire de grands tremblements de terre. Irzik et Nola (2010) ont aussi examiné les similitudes et les différences entre les diverses disciplines scientifiques en termes de méthodes et de règles méthodologiques. Ils sont arrivés à la conclusion que ces méthodes ne sont pas valables à tous les coups et qu'une science peut utiliser l'une ou l'autre de ces méthodes ou toutes à la fois.

1.5.2. L'idée de ressemblance familiale

Irzik et Nola (2010) constatent que pour n'importe quelle paire choisie de ces sciences, l'une sera semblable à l'autre à l'égard de certaines de ces caractéristiques et dissemblable par rapport à d'autres caractéristiques. Par contre, il y aura un certain nombre de similitudes, de croisements et de chevauchements entre ces disciplines scientifiques, ce qui leur donne une

certaine unité. Ils proposent « *l'approche par ressemblance familiale* » comme alternative au point de vue consensuel pour dépasser ses faiblesses et anomalies.

Selon cette approche, les disciplines scientifiques sont assimilées à des familles. Les membres d'une famille peuvent chacun ressembler à un autre membre à certains égards, mais pas à d'autres. Par exemple si l'on considère un ensemble S de n caractéristiques, tout individu est un membre de la famille si et seulement si il a toutes les n caractéristiques de S, ou toutes les (n - 1) caractéristiques de S, ou toutes les (n-2) caractéristiques de S, ou de toutes les (n-3) caractéristiques de S, et ainsi de suite. Les différents aspects de la nature des sciences sont regroupés par Irzik et Nola (2010) en quatre catégories de base dans le tableau1: les activités, les buts et valeurs, les méthodes et règles méthodologiques et les produits.

Science			
1 Activities	2 Aims & Values	3 Methodologies & Methodological rules	4 Products

Tableau1 : les quatres catégories de base caractérisant la NoS selon Irzik et Nola

- La catégorie « activités » renferme, entre autres, l'observation, l'expérimentation, la collecte des données, la classification des objets, l'élaboration de nouveaux concepts, l'émission des hypothèses, l'invention des théories et des modèles, etc. Notons qu'il y a un ensemble d'activités qui sont caractéristiques de certaines sciences, mais pas d'autres.
- La catégorie « buts et valeurs » renferme des buts tels que, faire des prédictions, fournir des explications, la cohérence, la simplicité, la fécondité, etc. (Kuhn, 1977) ; la confirmation élevée (Hempel, 1965, Partie I) ; la falsifiabilité et la vérité (la proximité de la vérité) (Popper, 1963, 1985) ; la pertinence empirique (Van Fraassen, 1980), la viabilité (Von Glasersfeld, 1989), l'hétérogénéité et la complexité ontologique (Longino, 1997). Il faut noter que les différences de valeurs dans les sciences proviennent en général de différences entre les conceptions philosophiques des

scientifiques Ainsi, les réalistes pensent atteindre les vérités des structures cachées du monde, alors que les anti-réalistes s'opposent à cela, etc. D'autre part, des positions soutenues par différents philosophes peuvent être directement opposées les unes aux autres, par exemple, l'insistance sur la complexité et l'hétérogénéité ontologique de Longino se heurte à la simplicité de Kuhn. La vision de la ressemblance familiale des sciences n'est pas concernée par ces querelles. Elle exige seulement l'énoncé des buts que les sciences individuelles peuvent poursuivre selon les diverses positions philosophiques ou interprétatives et du rôle qu'ils peuvent avoir ou non dans toute caractérisation d'une science particulière.

- La science n'a pas atteint ses différents buts d'une manière désordonnée, mais emploie un certain nombre de « méthodes et de règles méthodologiques ». Celles-ci constituent une troisième catégorie importante caractérisant la nature des sciences. Historiquement plusieurs méthodes scientifiques ont été défendues par Aristote, Bacon, Galilée, Descartes, Newton, etc. Au vingtième siècle, d'autres théories de méthodes scientifiques sont proposées par les philosophes, les scientifiques et les statisticiens tels que les raisonnements déductif, inductif et abductif qui forment une partie importante de n'importe quel type de méthode scientifique. Nola et Irzik (2005, 2010) soulignent que l'idée de la méthodologie scientifique comprend également des règles méthodologiques dont certaines sont controversées mais d'autres généralement acceptées. Des exemples de types de règles que l'on dit être une partie importante de la méthodologie scientifique sont cités :

- construire seulement les hypothèses / théories / modèles qui sont testables ;
- éviter de faire des révisions ad hoc à des théories ;
- rejeter les théories incompatibles ;
- s'il y a des choses identiques, accepter les théories simples et rejeter celles qui sont plus complexes ;
- n'accepter une théorie que si elle peut expliquer tous les succès de celles qui les précèdent.

Irzik et Nola s'accordent avec la vision consensuelle sur la non-existence d'une procédure algorithmique rigide constituée d'un ensemble fixe et universel de règles qui régissent l'activité scientifique, à chaque étape de l'enquête. Cependant, ils ne rejettent

pas totalement la notion de méthode et des règles méthodologiques sans lesquelles le caractère autocorrectif de la science devient un mystère.

- La catégorie « produits » : lors des activités, les scientifiques utilisent les méthodes et les règles méthodologiques afin d'atteindre leurs objectifs, ils produisent un certain nombre de résultats, qu'on appelle « produits ». Ils consistent en des hypothèses, des lois, des théories, des modèles, des collections de rapports d'observations ou des collections de données expérimentales, etc. La proposition finale produite par les activités scientifiques est la connaissance scientifique.

Dans le cadre de l' « *approche par la ressemblance familiale* », l'ensemble S des éléments qui composent toutes les caractéristiques des sciences sont tous les éléments mentionnés dans les quatre catégories. Les aspects d'une science particulière sont obtenus en prenant un sous-ensemble de caractéristiques appartenant à chacune des quatre catégories, sous-ensemble qui pourrait bien différer du sous-ensemble de caractéristiques spécifique à une autre science particulière. Les deux sciences particulières peuvent avoir en commun certaines caractéristiques et différer par d'autres.

Les auteurs précisent d'une part que chaque catégorie est ouverte, c'est-à-dire que les caractéristiques de la science qui relèvent de chaque catégorie ne sont pas définitivement fixées, des ajouts sont possibles. D'autre part, bien que les quatre catégories présentées soient assez exhaustives, les auteurs admettent la possibilité de l'émergence de nouvelles catégories du fait de l'évolution des sciences.

1.5.3. Avantages de l'approche par la ressemblance familiale

Irzik et Nola (2010) considèrent que l'approche par la ressemblance familiale va bien au-delà des caractérisations existantes de la science, en particulier celles avancées par le point de vue consensuel. Elle ne souffre pas de ses faiblesses et limites, elle est plus complète, elle saisit le caractère dynamique et la composition non limitée de la science, elle tisse des relations entre ses catégories et les différents éléments qui relèvent d'elles de manière intégrée.

Pour eux,

- La vision consensuelle ne mentionne pas les activités scientifiques, les objectifs / les valeurs et ignore tout à fait la méthodologie scientifique. L'approche par la ressemblance familiale les inclut et leur accorde une place centrale en tant que

catégories importantes caractérisant la nature de la science. Selon cette approche, « *la science est un système cognitif dont les activités d'investigation ont un certain nombre d'objectifs qu'elle cherche à atteindre avec l'aide de ses méthodologies et des règles méthodologiques, et en cas de succès, elle produit un certain nombre de résultats, en définitive, des connaissances* ». (Ibid.)

- L'approche par la ressemblance familiale tient compte des différences entre les disciplines scientifiques, une diversité à laquelle le consensus est aveugle. Elle explique leur unité en mettant l'accent sur les chevauchements partiels et les similitudes entre elles. C'est ce qui justifie l'étiquette « *science* » appliquée aux différentes disciplines telles qu'archéologie, zoologie, astronomie, etc.
- L'approche par la ressemblance familiale est également intéressante, car elle est philosophiquement neutre dans le sens où elle est libre d'engagements philosophiques telles que le réalisme, le positivisme, l'empirisme, le constructivisme, etc. On peut ainsi, adopter une de celles-ci, selon la façon dont on veut expliciter chaque élément qui relève de chaque catégorie de l'approche par la ressemblance familiale.
- Cette approche peut être utilisée de manière pédagogique efficace en salle de classe pour enseigner la nature des sciences aux élèves, à condition qu'ils possèdent déjà une exposition suffisante de la science, et ce, en se centrant sur les catégories comme préconisé par les auteurs :

The teacher may begin by asking what scientists do. This question is likely to prompt the students to come up with examples that fall under the category 'scientific activity'. Suppose observing, experimenting and theory building came up. A host of interesting questions can be pursued in this context: Is observing a passive activity? How does observation differ from experimentation? What is the point of doing an experiment and how does it relate to theory? And so on. Next, the teacher may ask what the aim or aims of these activities are. This could be motivated very naturally since everybody knows that virtually all activities have some aim or other. Then, the teacher can further explore the connection between activities and aims. Does this kind of activity reliably achieve that aim? What can go wrong? What can be done? More generally, the teacher may ask how scientists try to achieve their aims. This may lead to the ideas of scientific method and methodological rules. Once the students grasp the categories 'activity', 'aims' and 'method and methodological rule', then the teacher may finally ask: given this sort of

activity to realize that aim with the help of such and such method or rules, what is the outcome? This is likely to yield the various elements that we have listed under the category 'products', depending on the nature of the activity. In this way students can appreciate how various aspects of science form a tightly integrated whole. (Ibid.)

Les auteurs ajoutent que si, l'enseignant souhaite discuter de façon détaillée d'un aspect de la science, il suffit de se concentrer en classe sur l'une des catégories, de ressortir l'aspect considéré et de discuter de sa signification et de ses fonctions.

1.6. Conclusion

Selon nous, il est préférable, comme le stipule le point de vue consensuel, de n'enseigner aux élèves que les caractéristiques de la nature des sciences les moins controversées et largement acceptées par les philosophes, historiens, et sociologues des sciences. L'objectif est en effet de fournir une compréhension générale de ce que sont les sciences, une compréhension accessible pour le niveau de la fin des études secondaires et pertinente pour de futurs citoyens.

L'approche de Lederman semble problématique car elle dissocie l'« inquiry » et la *NoS*. Par ailleurs, elle propose des « tenets » formulés de manière trop générale pour être opérationnels dans la construction d'une situation d'enseignement. Ceux-ci doivent être au préalable déclinés en objectifs d'apprentissage précis. Une fois clairement énoncés, les « tenets » de la vision consensuelle recourent les catégories d'Irzik et Nola.

Même si dans leur approche, Irzik et Nola occultent les aspects social (avant tout la société), temporel (l'évolution des sciences) et psychologique de l'entreprise scientifique, cette approche est, selon nous, plus globale et plus systématique. Couvrant tous les aspects généraux et structurels des sciences, elle fournit une nouvelle façon de saisir leur unité tout en rendant justice à leur diversité. Elle est également neutre vis-à-vis des engagements philosophiques.

Cette approche est plus opérationnelle en classe à condition que les élèves aient certaines connaissances sur les sciences et que les objectifs d'apprentissage leur soient suffisamment accessibles. De même, au niveau de la formation des enseignants, elle semble davantage pertinente, surtout avec l'ajout de certains aspects qui enrichissent les « tenets » de Lederman comme les buts et valeurs (la cohérence, la simplicité, la fécondité, la confirmation élevée, la falsifiabilité, la pertinence empirique, la viabilité, l'hétérogénéité et la complexité ontologique, etc.) ou bien encore les méthodes et règles méthodologiques (inductiviste, hypothético

déductiviste, révision ad - hoc des théories, rejet des théories incompatibles, testabilité des hypothèses, modèles et théories, etc.).

Dans notre travail sur l'histoire des sciences, nous avons cherché des critères suffisamment précis pour correspondre à des objectifs d'enseignement (*diversité des enjeux poursuivis par les scientifiques et des démarches suivies*). Ceux-ci sont en cohérence à la fois avec la vision consensuelle et l'approche par ressemblance familiale. Cependant, ces objectifs s'intègrent davantage dans cette dernière approche car les enjeux correspondent à la catégorie « buts » et les démarches à la catégorie « méthodes et règles méthodologiques ».

Chapitre 3

Les représentations de la nature des sciences chez les élèves et enseignants

1. Introduction

Nous avons signalé que la majorité des débats sur la « culture scientifique » et la « scientific literacy » mettent l'accent sur la nature des sciences, ou certains de ses aspects, et la présentent comme une de leurs composantes principales. Dans ce sens, Hodson (2008) soutient que le développement de la culture scientifique repose sur la compréhension de la nature des sciences et de ses méthodes, l'appréciation de son histoire et de son développement, et la prise de conscience des interactions souvent complexes entre les sciences, les technologies, la société et l'environnement. De ce fait, les élèves ne peuvent être considérés comme scientifiquement cultivés que s'ils possèdent une compréhension solide et authentique de ce que sont les sciences et de ce que font les scientifiques, de son fonctionnement, de son développement et de son évolution au fil du temps en réponse aux pressions socioculturelles et économiques. Il est donc impératif d'explorer les conceptions spontanées des apprenants sur les sciences en vue de les aider à développer une vision cohérente des sciences et de l'activité scientifique.

Certaines recherches (Désautels & Larochelle, 1989 ; Zeidler & Lederman, 1989) accréditent la thèse d'un impact des conceptions et des pratiques pédagogiques des enseignants ainsi que de leur discours sur la mentalité des apprenants sans, cependant, écarter d'autres facteurs tels que les médias, les musées, etc. Cette idée, aussi soutenue par Hodson (2008), stipule que les points de vue des élèves sur les sciences sont le résultat de deux influences qui interagissent: les expériences pédagogiques, ce que les élèves rencontrent dans les cours de sciences à l'école (messages implicites situés dans le discours déployé par l'enseignant, activités d'apprentissage, illustrations et matériel biographique dans les manuels scolaires,...) et les expériences d'apprentissage informelles, ce qu'ils apprennent via les médias (films, télévision, journaux, sites Internet...) et les visites de musées, d'aquariums, de réserves naturelles, etc.

Compte tenu du rôle clé joué par les enseignants dans la conception et l'exercice de l'acte éducatif, il est légitime de supposer qu'ils ont une influence considérable en tant que véhicules

ou émetteurs de conceptions spontanées sur les sciences. Il est donc nécessaire d'analyser les conceptions épistémologiques des enseignants afin de repérer d'éventuelles représentations problématiques relatives à quelques aspects de la nature des sciences.

Divers auteurs ont élaboré des instruments d'enquêtes et des tests quantitatifs standardisés pour évaluer les conceptions des élèves et des enseignants. Hodson (2008, p. 24) indique que Mayer et Richmond ont identifié en 1982 au moins 32 instruments conçus pour le repérage et l'analyse des conceptions. Parmi ceux portant sur la nature des sciences, les plus connus sont : *the Test on Understanding Science (TOUS)* (Cooley & Klopfer, 1961), *the Nature of Science Scale (NOSS)* (Kimball, 1967), *the Nature of Science Test (NOST)* (Billeh & Hasan, 1975) et *the Nature of Scientific Knowledge Scale (NSKS)* (Rubba, 1976; Rubba & Anderson, 1978), conjointement avec une version modifiée (*M-NSKS*) développée par Meichtry (1992). Parallèlement à ces instruments, il en existe d'autres explorant les conceptions des processus de la science, tels que *the Science Process Inventory (SPI)* (Welch, 1969a) et *the Wisconsin Inventory of Science Processes (WISP)*, (Welch, 1969b).

Ces premiers instruments ont été critiqués car ils sont construits en conformité avec une perspective philosophique particulière, empiriste ou poppérienne. Par ailleurs, ils sont insuffisants pour apprécier la complexité et les ambiguïtés des conceptions des élèves (Désautels & Larochelle, 1989).

Les revues de synthèse les plus récentes, Lederman (1992, 2007), Lederman, Wade et Bell (1998) ainsi que Abd-El-Khalick et Lederman (2002) décrivent plusieurs autres instruments qui tiennent compte des travaux les plus récents dans les domaines de la philosophie et sociologie des sciences. Parmi ces nouveaux instruments, citons : *Conceptions of Scientific Theories Test (COST)* (Cotham & Smith, 1981), *Views on Science-Technology Society (VOSTS)* (Aikenhead & Ryan, 1989), *the Nature of Science Survey* (Lederman & O'Malley, 1990), *the Views of Nature of Science Questionnaire (VNOS)* (Lederman et al, 2002).

2. Analyses des conceptions des élèves sur la nature des sciences

2.1. Introduction

Des enquêtes, réalisées pour la plupart dans les pays anglo-saxons mais aussi dans certains pays francophones, visent à déterminer les points de vue des élèves à propos de la nature des sciences d'une part, des scientifiques d'autre part.

2.2. Sur les sciences

Lederman (1992, 2007) effectue une revue critique des travaux portant sur les points de vue des élèves sur la nature des sciences. L'auteur rappelle les résultats des travaux conduits principalement aux Etats-Unis et dans d'autres pays anglophones.

Wilson (1954) a développé le premier questionnaire pour évaluer les conceptions de 43 lycéens de Géorgie. L'enquête révèle que les étudiants croient que la connaissance scientifique est absolue et que l'objectif principal des scientifiques est de découvrir des lois naturelles et des vérités.

La première tentative à grande envergure pour évaluer les conceptions des élèves de la nature des sciences a été réalisée en 1957 par Mead et Metraux. L'enquête a porté sur un échantillon national de 35000 étudiants américains et a cherché à déterminer les points de vue des apprenants sur ce qu'ils pensent des sciences et des scientifiques. L'analyse qualitative des données produit des résultats compatibles avec ceux de Wilson (1954) à la fois sur l'attitude envers la science et sur la compréhension des élèves de la nature des sciences.

En 1961, Klopfer et Cooley ont utilisé le test de compréhension des sciences (TOUS) pour évaluer les conceptions des étudiants de sciences. Ils concluent que la compréhension des lycéens de l'entreprise scientifique et des scientifiques n'est pas adéquate. Deux ans plus tard, Miller utilise le même test (TOUS) et aboutit à une conclusion similaire.

De son côté, Makay (1971) utilisant le test TOUS pour évaluer les conceptions des élèves australiens du secondaire couvrant les niveaux 7-10, conclut que les élèves manquent suffisamment de connaissances à propos:

(a) the role of creativity in science ; (b) the function of scientific models ; (c) the roles of theories and their relation to research ; (d) the distinctions among hypotheses, laws and theories ; (e) the relationship between experimentation, models, theories and absolute truth ; (f) the fact that science is not solely concerned with collection and classification of facts ; (g) what constitutes a scientific explanation ; and (h) the interrelationships among and the interdependence of the different branches of science. (Makay (1971, cité par Lederman, 2007, p. 837).

Des résultats similaires ont été obtenus au cours des enquêtes de Korth (1969), Broadhurst (1970) et Aikenhead (1972, 1973).

Le travail de Bady (1979) est centré particulièrement sur la compréhension des élèves de la logique des tests d'hypothèses. S'appuyant sur le travail de Johnson-Laird et Wason (1972) pour évaluer la compréhension des sujets sur les tests d'hypothèses, il conclut que les élèves sont susceptibles d'avoir une vision simpliste et naïvement absolutiste de la nature des hypothèses et des théories scientifiques.

Dans un travail similaire, Rubba et Anderson (1978) établissent que 30% des lycéens interrogés estiment que la recherche scientifique révèle la vérité absolue incontournable et nécessaire. En 1981, Rubba, Horner et Smith tentent d'évaluer l'adhérence des étudiants à l'idée que les lois sont des théories matures et que les lois représentent des vérités absolues. Les résultats indiquent que tous les élèves ont tendance à concilier les deux aspects dans une position « neutre ».

Dans une enquête portant sur un échantillon total de 82 étudiants de 9^{ème} et de 10^{ème} années de classes générales en sciences, 11^{ème} et 12^{ème} années des classes spécialisées de biologie et physique et de futurs enseignants du niveau collégial, Zeidler, Walker, Ackett et Simmons (2002) ont étudié les relations entre les conceptions des élèves sur la NoS et leurs croyances sur les questions socio-scientifiques. Les résultats indiquent qu'un nombre significatif d'étudiants n'ont pas saisi que la connaissance scientifique est provisoire, partiellement subjective et nécessite la créativité.

Lederman (2007) termine cet examen des études sur les conceptions des élèves en signalant que la majorité des résultats aboutissent à la même conclusion : les étudiants ne possèdent pas des conceptions adéquates sur divers aspects de la nature des sciences ou du raisonnement scientifique. Ils considèrent cette conclusion relativement signifiante puisque les différentes recherches ne sont pas réalisées avec les mêmes instruments d'évaluation.

Une des investigations les plus fouillées des conceptions des élèves est celle effectuée par Ryan et Aikenhead (1992). Des réponses recueillies auprès de plus de deux mille lycéens canadiens, ils concluent que les élèves confondent science et technologie, qu'ils sont peu conscients des intérêts et des débats, internes et publics, que soulèvent les sciences et de l'effet des valeurs sur les connaissances scientifiques. Par ailleurs, ils signalent que:

46% ont estimé que la science peut reposer sur l'hypothèse d'une intervention divine (interfering deity) ; seulement 17% sont certains du caractère inventif des connaissances scientifiques ; 19% croyaient que les modèles sont des répliques de la réalité ; seulement

9% ont choisi la vision contemporaine : les scientifiques utilisent n'importe quelle méthode permettant d'obtenir des résultats favorables et 64% des étudiants ont exprimé une relation simpliste hiérarchique dans laquelle les hypothèses deviennent les théories et les théories deviennent des lois, en fonction de la quantité des preuves disponibles (cité par Mc Comas et al., 1998, p. 10).

Akerson et Abd-El-Kalick (2005) explorent les visions de la NoS des élèves d'une école élémentaire pour voir si elles sont en conformité avec les recommandations des réformes nationales (AAAS, 1993 ; NRC, 1996). Un questionnaire semi ouvert, couplé à des interviews individuels, portant sur la distinction entre observation et inférence, le rôle de la créativité et de l'imagination et sur le caractère provisoire des sciences a été passé auprès de 23 élèves de 4^{ème} année à la fin de l'année scolaire. Ceux-ci avaient suivi durant l'année les cours d'un enseignant de sciences possédant une vision informée de la NoS. Les auteurs concluent que les conceptions des élèves de 4^{ème} année de l'enseignement primaire sont similaires à celles des élèves plus âgés mises en évidence auparavant (BouJaoude, 1996 ; Griffiths & Barman, 1995 ; Khisfe & Abd-el- Kalick, 2002 ; Meichtry, 1993), qu'elles ne sont pas compatibles avec les recommandations des réformes (AAAS, 1993 ; NRC, 1996) sur les aspects explorés dans l'étude. En particulier, les conceptions des élèves sur la distinction entre observation et inférence sont erronées : s'ils reconnaissent le rôle direct de l'observation, ils n'établissent pas de lien entre inférence et observation. Beaucoup d'élèves ont des idées fausses sur le caractère provisoire de la science croyant que la science ne change jamais car une fois que quelque chose est trouvé, tout est « effectué ». Cependant, d'autres soutiennent que la science change car le progrès technologique apporte des informations qui peuvent générer ce changement.

2.3. Sur les scientifiques

A ce propos, Hodson (2008) cite l'enquête de Chambers (1983) qui a utilisé le test *Draw-a-Scientist Test (DAST)* pour sonder les points de vue de 4807 élèves des écoles primaires australiens, américains et canadiens sur ce qu'ils pensent des scientifiques et de leurs travaux. Celui-ci identifie sept caractéristiques communes dans leurs dessins:

laboratory overall; spectacles (glasses); facial hair; 'symbols of research' (specialized instruments and equipment); 'symbols of knowledge' (books, filing cabinets, etc); technological products (rockets, medicines, machines); and captions such as 'Eureka' (with its attendant lighted bulb), $E = mc^2$ and think bubbles saying 'I've got it' or 'A-ah! So that's how it is' (Hodson, 2008, p.27).

Commentant ce résultat, Hodson souligne que peu de choses ont varié depuis l'enquête réalisée par Margaret Mead cinquante ans plus tôt et qui montrait que les lycéens percevaient le scientifique comme :

[...] A man who wears a white coat and works in a laboratory. He is elderly or middle aged and wears glasses. He is small, sometimes small and stout, or tall and thin. He may be bald. He may wear a beard, may be unshaven and unkempt. He may be stooped and tired. He is surrounded by equipment: test tubes, Bunsen burners, flasks and bottles, a jungle gym of blown glass tubes and weird machines with dials. The sparkling white laboratory is full of sounds: the bubbling of liquids in test tubes and flasks, the muttering voice of the scientist [...] He spends his days doing experiments. He pours chemicals from one test tube into another. He peers raptly through microscopes. He scans the heavens through a telescope. He experiments with plants and animals, cutting them apart, injecting serum into animals. He writes neatly in black books. (Mead & Metraux, 1957, pp. 386 - 387, cité par Hodson, 2008, p. 27)

Hodson (2008) résume les points de vue de la science et des scientifiques recueillis auprès des élèves âgés de 11 à 17 ans dans un certain nombre d'écoles de la grande région de Toronto au cours d'une période s'étendant de 1999 à 2004 en réponse à la question «*imagine you are a scientist : write about your work, about the discoveries you have made and the things you have invented*». 50% des élèves indiquent que les découvertes scientifiques sont accidentelles et fruits du hasard et de la chance. De plus, la science est largement perçue comme une activité solitaire au cours de laquelle le savant travaille dur et longtemps pour faire des découvertes de stature héroïque. Les savants sont perçus par de nombreux étudiants comme retirés et éloignés de la vraie vie, parfois égoïstes et antisociaux, et certainement moins conviviaux que les gens «*normaux* ».

Carl Sagan (1995) décrit l'image stéréotypée du scientifique en ces termes:

Scientists are nerds, socially inept, working on incomprehensible subjects that no normal person would find in any way interesting – even if he were willing to invest the time required, which, again, no sensible person would. 'Get a life', you might wish to tell them (cité par Hodson, 2008, p.29).

À la question sur ce que font les scientifiques lorsqu'ils vont au laboratoire, les apprenants de l'enquête de Toronto, considèrent que les scientifiques font des «*experiments; they find out*

about things; they find out new information and new facts; they find out how things are. Scientists do lots of 'finding out' and 'working things out'; they also 'invent things' and 'discover new stuff' (Hodson, 2008, p. 29).

En dehors des pays anglo-saxons, les recherches francophones les plus significatives sur l'enseignement secondaire ont été menées au Québec par Désautels et Laroche (1989). Ceux-ci ont sondé les points de vue d'adolescents terminant leurs études secondaires et ayant suivi en moyenne six cours de sciences. L'objet de cette étude est de déterminer les conceptions qu'entretiennent les élèves à l'égard de « l'idée de science ». L'enquête guidée par une entrevue de type semi dirigé a révélé que :

La plupart de ces adolescents :

Envisagent le savoir scientifique comme la divulgation d'une évidence sensorielle ou empirique, sous la forme de chiffres, calculs, formules et lois. Dans le même ordre d'idée, ces jeunes conçoivent que c'est un savoir incorruptible, entendant par là un savoir vierge des considérations ou intérêt privée qui marqueraient les autres types de savoir. (Laroche et Désautels, 1992, p.16).

A s'en tenir à cette première caractérisation, la conception des élèves participe d'une épistémologie empiriste et réaliste naïve assez classique.

L'élaboration de ce savoir et son développement sont pensés par les élèves selon deux perspectives :

Une perspective psychologique : la production du savoir scientifique est pensée comme un acte profondément individualiste lié à la curiosité et au besoin de sécurité qui pousse les humains à chercher et à comprendre. Les auteurs notent que les élèves détiennent des conceptions qui occultent l'aspect socio-institutionnel et collectif de la production scientifique et qui glorifient le chercheur. Cette image peut se révéler inhibant pour ceux qui en viennent à croire que la pratique scientifique est réservée à des esprits hors du commun, où il est avant tout question de hasard et d'intelligence.

Une perspective instrumentale : le savoir scientifique trouve sa source dans l'évidence empirique (les phénomènes s'imposent au scientifique), le réel est dévoilé grâce à des activités techniques expérimentales qui « l'épurent des contingences et des motivations qui animent sa production ». Le chercheur est ainsi écarté du processus de production de connaissances, il est

un simple témoin anonyme et exempt de toute théorie ou projet. En fait, le scientifique antérieurement au premier plan ne créerait pas ses objets d'étude : ceux-ci seraient préformés, préexistants et renverraient à des phénomènes primitifs à l'instar du coucher du soleil ou de la chute d'une pomme. Il ne créerait pas les faits, il les constaterait, il se laisserait guider par eux, par leur indiscutable évidence que renforce, d'ailleurs, la répétition d'expériences toujours identiques. Le scientifique serait un esprit dont la principale compétence est de savoir constater le réel en soi, il est « *porteur des attributs d'une démarche prescrite et compilateurs des manifestations d'une réalité organisée et ontologique* » (Larochelle et Désautels, 1992, p.16). Selon les auteurs, l'image du scientifique spectateur d'un spectacle n'est pas étrangère, aux représentations qu'entretiennent les élèves à l'égard de leurs propres activités d'apprentissage scolaire. En effet, plusieurs éléments recueillis dans les discours des élèves interrogés (Désautels et Larochelle, 1989) appuient ce point de vue. Ils évoquent leur expérience scolaire en des termes qui les définissent eux aussi comme des spectateurs ou des « *techniciens compilateurs* » cité dans (Larochelle, M. et Désautels, J., 1992, p.16 -17) : « *on regarde comment ça marche* », « *on voit ce que ça donne* ».

Enfin, l'image stéréotypée des scientifiques est significativement illustrée par les propos d'une étudiante :

Moi, j'ai toujours cru que les chercheurs scientifiques étaient des génies à l'intelligence deux ou trois fois plus grande que la nôtre. Mon idée était qu'ils [les chercheurs scientifiques] se levaient un bon matin en disant: « Aujourd'hui, j'ai à résoudre ce problème. » Ils s'installaient devant une feuille de papier et là leur intelligence fonctionnait toute seule. Ils produisaient alors des connaissances scientifiques.
(Larochelle & Désautels, 1991, p. 169)

2.4. Conclusion

En somme, les élèves détiennent des idées non adéquates sur la science et les connaissances scientifiques. Le savoir scientifique est perçu comme une vérité irréfutable nécessairement absolue et incorruptible, vierge des considérations ou intérêt privé. Il trouve sa source dans l'évidence empirique, l'expérimentation est le symbole même de l'activité scientifique, de ce fait les élèves ne perçoivent pas la dimension composite, théorico- expérimentale de la recherche et par conséquent réduisent la méthode à un savoir-faire expérimental permettant la découverte d'une réalité ontologique cachée quelque part dans les événements. Ces élèves établissent une équivalence entre ce savoir et la réalité : pour eux, tout ou (presque) est donné,

rien n'est à construire. « L'univers se révèle d'emblée à un sujet sous formes de lois, de concepts et de théories ». Le point de vue des élèves témoigne d'une épistémologie empiriste et réaliste naïve assez classique.

Les élèves manquent de connaissances sur l'élaboration du savoir scientifique, notamment le rôle de l'imagination et de la créativité, la fonction des modèles, le rôle des théories et leur relation avec le contexte de recherche, les interrelations et les interdépendances entre les différents domaines des sciences, entre les travaux de recherche et groupes sociaux. Les élèves ne font pas non plus de distinction adéquate entre hypothèses, lois et théories ni entre théories, modèles, phénomènes et vérité absolue. Pour beaucoup d'élèves, les théories qui résistent à l'épreuve et qui sont continuellement confirmées peuvent devenir des lois : les lois sont des théories à maturité.

Les élèves sont peu conscients des aspects sociaux de la science et ne font pas de distinction entre science et technologie. Beaucoup d'entre eux adhèrent à l'idée que la science est à la base de la technologie (position dite hiérarchique).

L'image que se font les élèves des scientifiques reste stéréotypée. Ces derniers sont décrits comme des gens possédant une intelligence hors du commun, travaillant en solitaire, effectuant des expériences en vue de résoudre des problèmes, de découvrir les lois de la nature et les vérités du monde ou de produire des connaissances pour le bien de l'humanité. Les découvertes sont le plus souvent perçues comme accidentelles et fruits du hasard et de la chance.

3. Les conceptions spontanées des enseignants

3.1. Introduction

Des enquêtes, réalisées pour la plupart aux Etats-Unis et dans les pays anglo-saxons (Abd-El-Khalik, 2005 ; Abd-El-Khalik & Lederman, 2000 ; Glasson & Bentley, 2000 ; Lakin & Wellington, 1994 ; Lederman, 1992) et pour certaines en France et au Québec (Désautels & Laroche, 1989 ; Roletto, 1998) visent à déterminer les conceptions des enseignants à propos de la nature des sciences. Toutes ces enquêtes mettent en évidence un manque de connaissances des enseignants sur l'épistémologie et une diversité de points de vue sur la nature des sciences. Le trait commun qui sous-tend ces différentes études est l'incohérence des points de vue. Cette incohérence résulte d'associations non réfléchies d'idées appartenant à

différents cadres philosophiques de la science assemblées sur un fond de savoir commun. Nous détaillons ci-dessous les principaux résultats des études francophones.

3.2. Étude menée par Désautels et Larochelle

En vue de déterminer la représentation des enseignants à l'égard de la nature du savoir scientifique, Désautels et Larochelle (1989) ont conduit au Québec une enquête portant sur une centaine d'enseignants travaillant aux niveaux secondaire et collégial. Les auteurs résument ainsi les résultats de l'enquête :

Ces études nous amènent à penser que la majorité des enseignants interrogés adhèrent à une vision réaliste empiriste de la connaissance scientifique. En général les enseignants pensent ce qui suit :

Il existe à l'extérieur du sujet connaissant une nature ou une réalité gouvernée par un ensemble de lois immuables ;

- *la connaissance scientifique résulte d'un dévoilement du réel et permet de décoder l'ordre inhérent à la nature, donc de divulguer la réalité par approximations successives, car au fil des théories, l'objet d'étude est toujours le même, seules les interprétations changent ;*
- *les lois scientifiques sont un reflet des lois de la nature et sont établies par un processus inductif dont l'origine est l'observation, c'est-à-dire une collecte d'informations d'origine sensorielle ;*
- *l'établissement des lois scientifiques suit un processus inductif qui va de l'observation à la formulation d'une loi, en passant par la formulation d'hypothèses et l'expérimentation, cette dernière est assimilée aux idées de constat et de preuve et consiste à reproduire, en laboratoire, un phénomène naturel et à en effectuer des mesures ;*
- *l'objectivité est conçue comme une attitude individuelle qui consiste en l'évacuation de ses sentiments et préjugés afin de ne pas déformer le réel ;*
- *le procès de production de la connaissance scientifique est vierge de toute contingence socio-historique : seuls ses produits peuvent en être marqués, comme l'illustrent les*

mauvais usages de la science (entendre militaire) ou les recherches qui conduisent à des résultats contradictoires (car la recherche pure n'aboutit qu'à une réponse).
(p.159)

Les conclusions qui se dégagent de cette étude amènent à penser que la majorité des enseignants interrogés adhèrent à une vision réaliste empiriste de la connaissance scientifique.

3.3. Étude menée par Roletto

De son côté, Roletto (1998) a entrepris une étude qui a touché une population totale de 394 professeurs des premier et second degrés, en activité (Italie) ou stagiaires (France) dans le but de déterminer les « idées dominantes » sur la nature de la science. Les aspects explorés sont la nature et le statut des connaissances scientifiques, les démarches pour les atteindre, les critères de démarcation entre science et non-science, les relations entre science et vérité. Il ressort de cette étude que :

- très peu d'enseignants considèrent que le savoir scientifique est élaboré selon un processus qui trouve son origine dans les explications déjà avancées par les savants et dans les théories existantes comme le préconise les épistémologies contemporaines.
- la plupart des enseignants conçoivent le savoir scientifique comme un ensemble de connaissances neutres, objectives, vraies et décontextualisées concernant le monde qui nous entoure, la nature et les phénomènes naturels regroupées au sein des disciplines scientifiques telles que la physique, la chimie, la biologie. La connaissance scientifique semble être une réalité ontologique, ayant une existence en dehors du sujet connaissant. Elle serait cachée quelque part dans les événements du monde et ferait l'objet de découvertes par les scientifiques selon une démarche universelle et anhistorique suivant des étapes bien précises allant de l'observation de faits aux principes généraux, l'hypothèse étant placée au départ d'un parcours qui s'achève par des lois et théories. Les connaissances scientifiques sont prouvées, vérifiées mais aussi remises en causes, réfutées et donc en évolution continue voire même abandonnées au profit d'autres principes généraux plus performants. L'observation occupe une place essentielle dans cette démarche. Elle confère un caractère absolu aux faits expérimentaux et c'est à partir d'elle que des hypothèses sont émises, hypothèses que l'expérimentation pourra confirmer ou infirmer par la suite. Elle est neutre et n'est guidée par aucune théorie préexistante.

Pour ces enseignants, les connaissances scientifiques se démarquent des autres formes de connaissance car elles sont fondées sur les faits et donc prouvées par les données sensibles, accessibles à l'observateur attentif.

Certaines composantes du fonctionnement de la science ont été analysées plus en détail :

- *L'observation* : est perçue par la majorité des enseignants comme une pure attention passive, elle est fidèle à la réalité et menée sans idée préalable. Partant d'une observation neutre les savants formulent des hypothèses que l'expérimentation pourra valider ou infirmer et à partir de laquelle on tire des conclusions. Un nombre moins important des professeurs estime en revanche que l'observation est guidée par des représentations, des idées préconçues du chercheur, idées qui lui permettent de reconstruire le réel, d'orienter son observation sur ce qu'il considère pertinent.
- *L'expérimentation* : pour la plupart des enseignants, elle est considérée comme la mise en œuvre d'un protocole expérimental ou une série de tests visant la confirmation ou la validation d'une hypothèse. Pour le quart des sujets, elle est réduite à une simple manipulation ou à la reproduction au laboratoire d'un phénomène naturel.
- *La méthode expérimentale* : la majorité des sujets partagent l'idée que l'élaboration des connaissances scientifiques se fonde principalement sur l'observation et l'expérimentation. Elle se déroule selon un processus rigoureux qui permet au scientifique d'induire une loi ou une théorie à partir de l'observation d'un fait. Cette méthode expérimentale est codifiée dans la séquence OHERIC (Observation - Hypothèse - Expérimentation - Résultats - Interprétation - Conclusion). Ce point de vue s'apparente avec les idées partagées par les néopositivistes.
- *Les lois* : la grande majorité des professeurs s'accordent sur le fait que les lois scientifiques sont obtenues par inférence à partir des données d'observation et d'expérimentation. Ces lois existent dans la nature indépendamment du scientifique et reflètent « les lois de la nature ». Moins du tiers des professeurs pensent que les lois sont des assertions universelles, irréfutables et immuables ; elles sont des vérités indéniables.
- *Les théories* : un nombre important de professeurs les considèrent comme un produit obtenu au terme d'une recherche selon une démarche inductive. Elles ne sont pas

inventées mais découvertes, à partir de données empiriques. Elles permettent d'expliquer, d'interpréter des phénomènes observés, des faits qui se produisent dans le monde. Un nombre moins important d'enseignants pense en revanche que les théories scientifiques sont des modèles interprétatifs, des représentations suggérées à l'avance par le scientifique permettant de guider sa recherche et évoluant avec elle. Elles ne correspondent pas et ne suivent pas forcément les phénomènes naturels. Enfin, un peu moins de la moitié des enseignants sont d'avis que les théories scientifiques doivent être considérées comme provisoires et peuvent donc être évolutives, voire réfutables.

- *Les hypothèses* : environ le quart des enseignants ne font pas de distinctions entre hypothèse et théorie, elles ont le même statut, il s'agit d'une connaissance conjecturale (provisoire et toujours corrigible), tandis qu'une majorité des sujets font une distinction nette entre hypothèse et théorie : l'hypothèse est une conjecture occupant le point de départ d'une démarche dont la théorie est l'aboutissement, celle-ci constitue une connaissance prouvée, fondée, vraie. L'hypothèse est quelque chose qu'on suppose au départ sans référence à aucun cadre théorique, elle est le fruit de l'imagination, de l'intuition du chercheur ou du hasard.
- *L'objectivité* : une majorité des sujets interrogés affirment l'objectivité des savoirs scientifiques car ils sont fondés pour certains d'entre eux, sur des faits, sur des phénomènes naturels donc étroitement liés au « réel », ces savoirs existent car ils nous révèlent simplement ce qui est dans la nature. Pour d'autres, l'objectivité des connaissances scientifiques est comprise comme l'application scrupuleuse de la méthode expérimentale. Une autre partie assez importante d'enseignants approuve le caractère subjectif de la science. Différentes justifications sont avancées qui rendent compte toutes d'une vision relativiste-contextualiste de la science : d'une part, elle reflète la façon dont chaque scientifique perçoit la réalité, d'autre part les connaissances scientifiques peuvent être réfutées, remises en question, démenties.

En somme, la majorité des professeurs sont porteurs de points de vue qui renvoient à une épistémologie empiriste (primauté des faits sur la théorie), réaliste naïve (les objets de la science existent dans le monde où ils sont découverts par les scientifiques) et positiviste (il existe une méthode universelle et anhistorique qui permet d'aboutir à des connaissances scientifiques vérifiées, dont la véracité est prouvée : la méthode expérimentale (OHERIC)).

Toutefois, Roletto précise que cette conception empirico-réaliste est peu compatible avec d'autres idées manifestées par les mêmes sujets, idées apparentées à d'autres cadres épistémologiques différents, telles que la véridicité relative et contextuelle des connaissances scientifiques et leur subjectivité, ou bien l'idée que les théories scientifiques ne sont qu'une façon d'interpréter la réalité. Cet ensemble d'idées hétérogènes peut être ébranlé à tout moment car constitué dans la plupart des cas de points de vue incohérents. Ces « *sujets sont donc porteurs d'un mélange hétérogène, on pourrait dire un patchwork d'épistémologies, au sein duquel le statut des connaissances scientifiques n'est pas bien défini, car elles sont à la fois vraies, objectives, prouvées, subjectives et évolutives.* » (Roletto, 1998, p. 27).

Ce mélange de points de vue est expliqué par l'auteur par « *un manque profond de culture en matière de réflexion sur l'élaboration du savoir scientifique* » (Ibid, p.27) et de ses relations avec l'enseignement. Les causes invoquées sont que les sujets interrogés n'ont pas eu une formation initiale spécifique sur les questions relatives à l'épistémologie de la physique. De plus, les institutions secondaires ou supérieures dans lesquelles ces enseignants ont mené leurs études, ont pour objectif de pousser les élèves à apprendre des connaissances toutes faites, d'exposer des résultats acquis, des connaissances vérifiées, prouvées, indiscutables. Le but de cet enseignement est de donner aux élèves des certitudes, en présentant les connaissances comme des évidences empiriques, et en évitant, autant que possible, de donner l'impression qu'on y parvient par des détours, des contradictions et des négociations.

Concluons en disant que les points de vue des enseignants sur la nature des sciences révélés par ces études entretiennent une certaine proximité avec les conceptions détenues par les élèves en la matière. Ils s'apparentent à un point de vue empiriste-positiviste assez classique. Il renvoie selon (Pélissier, 2011):

- *à l'empirisme quant au statut des connaissances auxquelles il confère une supériorité par rapport aux connaissances non scientifiques ;*
- *au réalisme quant à leur rapport aux objets dont elle parle ;*
- *au positivisme quant à l'existence d'une démarche standard et anhistorique pour assurer la validité des connaissances ;*
- *à l'induction pour ce qui est du processus d'élaboration.* (p. 81).

Chapitre 4

Les approches pour travailler la NoS dans l'enseignement des sciences

1. Introduction

La revue des recherches sur les représentations de la NoS chez les élèves et les enseignants montre qu'elles ne sont pas compatibles avec les conceptions contemporaines de l'entreprise scientifique, quel que soit l'instrument utilisé pour les évaluer. Aider les élèves à développer une compréhension adéquate de la nature des sciences est l'un des objectifs le plus couramment invoqué pour l'enseignement des sciences (Kimball, 1967 -1968). Cet objectif a été approuvé par la plupart des scientifiques, des éducateurs et des organisations pour l'enseignement des sciences depuis les 85 dernières années (Abd-El-Khalick et al, 1998). Il a été aussi réaffirmé lors des réformes majeures de l'enseignement des sciences (Association Américaine pour l'Avancement des Qciences [AAAS], 1990, 1993; Millar & Osborne, 1998; Conseil national de recherches [NRC], 1996).

Les premières recherches concernant l'amélioration des conceptions de la nature des sciences des enseignants de sciences se fondaient sur l'hypothèse que ces conceptions sont transférées directement dans leurs pratiques de classe. Par conséquent, améliorer la compréhension de la NoS parmi les professeurs de sciences devait leur permettre de transmettre des vues adéquates de la NoS à leurs élèves. Cependant, cette hypothèse n'est confirmée par aucune littérature empirique (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000 ; Lederman, 2007).

Par ailleurs, différentes approches de l'enseignement-apprentissage sont recommandées pour promouvoir une compréhension adéquate des contenus et des processus des sciences.

Une première approche met l'accent sur «*hands-on, inquiry-based activities and/or process-skills instruction.*» (Lederman, 1998). Elle est qualifiée d'approche implicite car la compréhension de la NoS n'est pas un objectif travaillé explicitement pendant l'enseignement (Lawson, 1982 ; Monk & Osborne, 1997 ; Rowe, 1974).

Une deuxième approche, qualifiée d'explicite et réflexive, suggère que l'objectif d'amélioration des représentations de la NoS des élèves soit prévu au lieu d'être attendu comme un effet secondaire des différentes approches de l'enseignement des sciences (Akindehin, 1988).

Une troisième approche suggère que l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences (Rutherford, Holton & Watson, 1970) peut aider à améliorer les conceptions des élèves sur la NoS. Cette approche peut être qualifiée d'historique.

Nous examinons plus en détail dans ce qui suit ces différentes approches.

2. L'approche implicite

Cette approche met l'accent sur « *hands-on, inquiry-based activities and/or process-skills instruction.* » (Lederman, 1998, p. 694). Elle suppose que les élèves comprennent de manière implicite les aspects de la nature des sciences tout simplement en faisant des sciences ou en réalisant des activités d'investigation relatives à un contenu scientifique. Autrement dit, les éléments caractéristiques de la nature des sciences ne constituent pas des objectifs déclarés d'enseignement. L'auteur précise qu'elle a été adoptée par la plupart des programmes anglo-saxons entre les années 60 et 70.

L'idée d'exploiter la similitude entre les idées des savants du passé et les conceptions des élèves qui font obstacle au modèle scientifique actuellement accepté est avancée par plusieurs chercheurs (Piaget & Garcia, 1989; Wander-See et al., 1994). L'incorporation de l'histoire et la philosophie des sciences à l'enseignement des sciences est perçue comme susceptible de favoriser une meilleure compréhension des concepts scientifiques et des méthodes scientifiques, liant le développement de la pensée individuelle avec le développement des idées scientifiques et facilitant une meilleure compréhension de la nature des sciences (Matthews, 1994). Selon Heilbron (2002), cette promotion de l'histoire des sciences ne doit pas être en profondeur afin de ne pas porter atteinte au contenu scientifique, il écrit « *Finally, wherever possible the case studies should carry epistemological or methodological lessons and dangle ties to humanistic subject matter. But never should the primary purpose of the cases be the teaching of history* » (p. 330, cité dans Clough, 2010).

Monk et Osborne (1997) ont proposé une approche qui utilise l'histoire des sciences selon une perspective constructiviste et qui promeut à la fois l'apprentissage des contenus scientifiques et celui de la nature des sciences. Ils qualifient cette approche d'implicite:

The epistemological focus has additional value in introducing the nature of science in an implicit, rather than an explicit, manner. For it is difficult to consider issues of evidence, justification, and belief in science without considering and discussing what it is that scientists do. (Monk & Osborne 1997, p. 420, cité par Rudge & Howe, 2009, p. 563).

Les auteurs entendent par-là que les étudiants apprennent davantage sur la nature des questions scientifiques en réfléchissant sur des exemples contextualisés du travail du scientifique.

L'approche de Monk et Osborne identifie six phases distinctes dans l'enseignement: l'enseignant présente aux élèves un problème à étudier, les invite à fournir des explications provisoires qui peuvent révéler leurs conceptions sur le phénomène objet d'étude, attire leur attention sur la façon dont le phénomène a été étudié par des scientifiques autrefois, les invite à élaborer des tests pour comparer leurs conceptions avec celles des scientifiques du passé, les familiarise avec la connaissance actuelle et les encourage à examiner et à réfléchir sur ce qu'ils ont appris.

Notons que la plupart des travaux récents en France s'intéressant à l'utilisation de l'histoire des sciences dans les cours de sciences visent principalement l'acquisition de concepts scientifiques et proposent des situations qui relèvent de ce type d'approche historique (Audigier & Fillon, 1991 ; de Hosson & Kaminski, 2004 ; Décamp & de Hosson, 2010 ; Guedj, 2005 ; Merle, 2002). Les éléments historiques introduits dans ces différentes études sont peu nombreux et concernent des controverses relatives à l'interprétation de certains phénomènes (vision, mouvement d'un projectile dans un référentiel en mouvement par rapport à un autre, etc.).

La plupart des études indiquent que l'approche implicite n'est pas efficace dans l'amélioration de la compréhension des étudiants et des enseignants de la NoS ou de l'investigation scientifique. Ainsi pour Lederman (1998), Khishfe et Abd-El-Khalick (2002) ainsi que Clough (2006), les étudiants ne comprennent pas les leçons de la NoS de façon pertinente à travers seulement des exemples ou comme la conséquence d'avoir des enseignements se référant à des éléments de la nature de la science. Par ailleurs, l'état des recherches sur l'introduction explicite de l'histoire des sciences dans les cours des sciences, ne permet pas de conclure sur son apport à l'apprentissage de contenus scientifiques, les résultats étant contrastés (Dupin, 2006 ; Lederman, 2007).

3. L'approche explicite et réflexive

Une approche alternative, l'approche explicite, suggère que l'objectif d'amélioration des représentations des élèves à propos de la NoS devrait être explicite et prévu au lieu d'être attendu comme un effet secondaire ou un produit de « faire les sciences » (Akindehin, 1988). Des auteurs comme Akerson et al (2000), Khishfe et Abd-El-Khalick (2002), Schwartz et Lederman (2002) considèrent que tout au long de la séquence d'instruction, les enseignants devraient inviter périodiquement les élèves à considérer, de manière *explicite* et *réflexive*, les questions sur la nature des sciences en parallèle ou mixé avec le contenu conceptuel qu'ils apprennent. Par *explicite*, ils soulignent que les questions sur la nature des sciences doivent être planifiées et incluses de manière explicite dans les objectifs pédagogiques, comme n'importe quel autre objectif de contenu notionnel, et par conséquent abordées sous forme d'activités et lors des discussions plutôt que de supposer simplement que le message a été correctement communiqué. Par *réflexive*, ils soulignent que pour atteindre des changements significatifs, les élèves doivent être encouragés à développer une compréhension plus sophistiquée de la nature des questions scientifiques au travers de débats, et à reconnaître les implications des enseignements tirés des discussions sur des exemples particuliers pour leur compréhension des sciences en général.

4. L'approche historique

Depuis plus de deux décennies, les documents nationaux de réforme de l'enseignement des sciences aux États-Unis présente l'histoire des sciences comme un atout précieux, en particulier pour montrer que la science possède une histoire et qu'elle fonctionne comme une entreprise. Ainsi, *l'American Association for the Advancement of Science* (AAAS, 1993) indique deux raisons principales pour l'inclusion de certaines connaissances historiques parmi ses recommandations:

There are two principal reasons for including some knowledge of history among the recommendations. One reason is that generalizations about how the scientific enterprise operates would be empty without concrete examples [...] A second reason is that some episodes in the history of the scientific endeavor are of surpassing significance to our cultural heritage. (cité par Schnittka, 2006, p.5)

De son côté, la *National Science Education Standards* (NRC) stipule que dans l'apprentissage des sciences:

Students need to understand that science reflects its history, and is an ongoing, changing enterprise. The standards for the history and nature of science recommend the use of history of science in school science programs to clarify different aspects of scientific inquiry, the human aspects of science, and the role science has played in the development of various cultures. (NRC, 1996)

On retrouve l'idée que l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences permet l'acquisition d'une culture humaniste et qu'elle est un moyen pour travailler l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique dans les programmes du collège en France : « *La physique-chimie participe à la culture humaniste, notamment par des ouvertures en direction de l'histoire des sciences et de l'actualité scientifique qui montrent la science qui se construit ; les découvertes scientifiques ou techniques apportent des repérages dans le temps.* » (BO, 2001, p.9).

Abd-El-Khalick et Lederman (2000b, pp. 1059-1060) rapportent que ce point de vue a été soutenu par des éducateurs en sciences au cours des soixante-dix dernières années comme Conant (1947), Duschl (1990), Haywood (1927), Klopfer (1969), Klopfer et Watson (1957), Monk et Osborne (1997), Rutherford (1964), Wandersee (1992). Cependant, ces mêmes auteurs soulignent qu'il n'existe pas une seule étude empirique dans la littérature de l'enseignement des sciences qui a examiné l'influence des cours d'histoire des sciences au niveau du collège sur les représentations des apprenants de la NoS. Ils ajoutent que les recommandations pour l'introduction de cours d'histoire des sciences dans la formation des professeurs de sciences se fondent uniquement sur des hypothèses intuitives, des preuves anecdotiques, et que pratiquement aucune littérature ne les soutient de façon empirique.

Pour Lederman (1998), l'examen des efforts visant à évaluer l'influence de l'incorporation de l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences indique que les preuves concernant l'efficacité de l'approche historique est, au mieux, peu concluantes. De son côté, Abd-El-Khalick (1998) signale que des cours spécifiques d'histoire et / ou de philosophie des sciences ont peu d'impact sur la compréhension des élèves de la NoS et de l'investigation scientifique. Par ailleurs, Tao (2003) s'est intéressé à l'évolution de la compréhension des élèves du secondaire de la NoS dans une situation d'enseignement combinant l'utilisation de récits historiques et la collaboration entre pairs. L'enquête montre qu'avant enseignement, beaucoup d'élèves possèdent des visions erronées de certains aspects de la NoS, qu'elles évoluent lors des discussions de groupe sur les récits historiques, mais qu'au lieu d'évoluer vers

une compréhension plus informée de la nature des sciences, les élèves passent d'une vision non adéquate à une autre. Tao estime que les étudiants ont tout simplement cherché les aspects de la NoS qui confirment leurs points de vue dans le récit et ont ignoré les aspects contraires à leurs visions.

Pour rendre l'intégration de l'histoire des sciences plus efficace dans l'enseignement des sciences, des discussions ont eu lieu parmi les éducateurs et concepteurs de programmes afin de dépasser certains obstacles qui entravent l'efficacité de cette approche. Si Klopfer propose d'accorder plus de temps aux discussions en salle de classe pour venir à bout des subtilités du récit historique *«adequate time should be allowed for discussion so that the subtle understandings in the historical narrative may be fully developed»* (Klopfer, 1969, p.93), Russell estime que pour influencer la compréhension des élèves de la NoS, il faut traiter le matériel historique d'une manière qui accentue les caractéristiques particulières des sciences *«if we wish to use the history of science to influence students' understanding of science, we must treat [historical] material in ways which illuminate particular characteristics of science »* (Russel, 1981, p.56, cité par Abd-El-Khalick & Lederman, 2000b, p. 1060).

De leur côté, Abd-El-Khalick et Lederman (2000b) attirent l'attention sur des difficultés inhérentes à l'utilisation de l'histoire des sciences relatives aux changements conceptuels, exprimées par la thèse de l'incommensurabilité de Kuhn (1970) selon laquelle, les scientifiques qui opèrent sous un «paradigme» donné ne peuvent pas voir le mérite conceptuel d'un autre paradigme. En effet, lorsque les apprenants sont confrontés à des récits historiques, ils ont tendance à les interpréter au sein de certains cadres conceptuels qui ne sont pas ceux des scientifiques du passé mais ceux qu'ils possèdent aujourd'hui. Cela les amène à rejeter les notions scientifiques historiques comme étant erronées et absurdes ou comme étant de mauvaises façons d'expliquer le monde naturel. En ce sens, les auteurs précisent que l'histoire des sciences :

Is not viewed or interpreted as being a repository for the active attempts of earlier scientists to understand the natural world from within certain sets of culturally and cosmologically embedded conceptual tools. [History of science] is rather read from within the spectacles of present scientific ideas and indiscriminately judged from the viewpoint of present day knowledge. As such, the subtleties of the historical narrative are often lost and «lessons» about NoS are disregarded (p. 1061).

Cette difficulté nécessite, pour être dépassée, des efforts qui devraient être entrepris afin de permettre aux apprenants d'atteindre le changement conceptuel désiré. Ce changement ne sera possible que grâce à l'apprentissage d'une autre façon de lire les documents historiques. Ce changement de mentalité a été décrit par Butterfield comme «*putting on a different kind of thinking cap*» (Butterfield, 1965, p. 1, cité par Abd-El-Khalick & Lederman, 2000b, p. 1061). Il ne semble pas évident ou du moins facile à réaliser, ce qui compromet l'efficacité de cette approche.

Les mêmes réserves quant à l'introduction de l'histoire des sciences dans les cours de sciences se rencontrent en France. Ainsi, Bouasse en 1901 indique que la compréhension de l'histoire des sciences repose sur une connaissance scientifique parfois non élémentaire et un recul que les élèves ne peuvent avoir, que la connaissance des hypothèses abandonnées ne nous apprend rien sur la suite d'idées qui a conduit à l'hypothèse validée, que les élèves pourraient ne retenir que les hypothèses abandonnées (Hulin, 1996, cité par Maurines & Beaufils, 2011). De son côté, Feynman considère que «*l'approche historique peut polluer un cours moderne en introduisant des idées obsolètes, tout à fait inutiles et même dangereuses pour l'élève*» (Hulin, 1996, p. 1230, cité par Maurines & Beaufils, 2011).

Pour dépasser ce qu'ils considèrent comme un mauvais usage de l'histoire des sciences dans l'enseignement, Metz, Klassen, McMillan, Clough et Olson (2007) proposent de se contenter de courts récits historiques illustrant le développement et l'acceptation des idées fondamentales des sciences et de la nature des sciences.

Höttecke et Silva (2010) soulignent que plusieurs éducateurs en sciences et chercheurs ont plaidé depuis longtemps pour la mise en œuvre de l'histoire et la philosophie des sciences dans l'enseignement des sciences mais que cette mise en œuvre dans l'enseignement formel est toujours déficiente. Ils citent plusieurs obstacles et difficultés qui empêchent cette implémentation tant du côté des enseignants que du côté des élèves, qui montrent quant à eux une certaine résistance à son égard.

Les concepteurs du projet européen *HIPST*² (History Philosophy in Science and Teaching), Höttecke, Henke et Riess (2010), mettent l'accent sur l'importance de l'image de la science et des valeurs partagées par les scientifiques qui peuvent être transmises au travers d'un enseignement utilisant de réelles histoires (story) :

² <http://hipst.eled.auth.gr/>

*we emphasize that history of science presents an indispensable resource of events and cases which can display and convey to the next generation standards of devotion, norms of behavior and of attitude to society, (...) of theories, models, experiments, solutions of problems, laboratory tools and many other aspects of science and its products. No declarations can compete with the real stories in this regard. These stories make concrete the high principles and values shared by scientists of the past. This education creates the noble image of science, its **ethos, norms and values**.*

Ils précisent aussi l'importance des contenus scientifiques basés sur l'histoire et la philosophie des sciences pour les enseignants car ils retracent les expériences et débats historiques, révèlent comment fonctionne la science, familiarisent les enseignants avec les expériences dont ils manquent souvent. Ils ajoutent que les matériaux de l'histoire et de la philosophie des sciences «*shed light on the 'kitchen of science', showing that scientific knowledge is tentative, not fixed and necessarily draws on both the previous theories and the empirical evidence. This knowledge enhances teachers' ability to guide classroom discussions and inquiry, enable them to better comprehend students' contributions*».

De plus, l'utilisation des matériaux historiques permettrait aux professeurs d'acquérir la connaissance du contenu pédagogique (Shulman 1986 ; Loughran et al, 2006) dont ils ont besoin pour enseigner par investigation d'une part, et relatif à la nature des sciences d'autre part (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000b).

Des études ont cependant révélé qu'une approche explicite et réflexive qui utilise des éléments de l'histoire et de la philosophie des sciences pourrait être plus efficace qu'une approche implicite dans l'amélioration de la compréhension des élèves et des enseignants de sciences de la NoS (Akerson et al, 2000 ; Khishfe & Abd-El Kalick, 2002 ; Rudge & Howe, 2009).

Terminons ce panorama de l'apport de l'histoire des sciences à la compréhension de la NoS en signalant qu'une meilleure compréhension de la NoS est perçue comme pouvant augmenter la motivation des élèves pour les sciences. Ainsi, Metz et al (2007) soutiennent qu'une approche historique qui reflète fidèlement le travail des scientifiques, illustre l'humanité de la science, la jouissance et la frustration dans la conduite des recherches, les complexités et les défis que rencontrent les scientifiques et l'expérience de la communauté scientifique dans le développement et la justification des idées scientifiques, encourage les attitudes positives envers la science et est une source d'intérêt et de motivation pour les élèves (Seker & Welsh, 2006 ; Solbes & Traver, 2003).

Un des moyens envisagés pour lutter contre la désaffection des étudiants pour les filières scientifiques en France est l'introduction d'éléments historiques dans l'enseignement des sciences. Ceux-ci seraient susceptibles de motiver les élèves à la science et à la réflexion sur la science. On lit ainsi dans l'ancien programme de la classe de seconde français le commentaire suivant :

Mais la curiosité pour les sciences et pour les mécanismes de la création en général se nourrit à l'évidence de connaître les controverses passées, les longues impasses comme les avancées brutales, les grandes synthèses qui surprennent le bon sens et bouleversent la perception immédiate et intuitive du monde (BO, 2001, p.16).

La discipline enseignée revêtait ainsi une réelle finalité et susciterait l'intérêt des élèves.

Cet effet escompté est d'importance compte tenu du constat que dresse Venturini (2007) dans l'introduction de son livre *L'envie d'apprendre les sciences, motivation, attitudes, rapport aux savoirs*. Un grand nombre d'étudiants et d'étudiantes ne sont plus attirés par les études scientifiques en Europe. Sont cités parmi d'autres pays la France, l'Allemagne, le Royaume - Uni, etc., un constat qui dure depuis plus de deux décennies. Ces mêmes résultats sont aussi rapportés par l'enquête Eurobaromètre (Hodge, 2006).

4. Conclusion

L'apprentissage des sciences à l'aide de son histoire pourrait être un moyen pour résoudre certains problèmes dont souffrent les systèmes éducatifs tant en Europe qu'ailleurs, tels que le manque d'efficacité des formes traditionnelles d'enseignement et la baisse d'intérêt de nombreux étudiants pour les sciences. Cet apprentissage permettrait aussi d'inculquer chez les élèves une image adéquate des sciences et de l'entreprise scientifique, de révéler les interactions complexes entre les scientifiques et de mettre en lumière les différentes influences auxquelles ils sont soumis de la part des groupes sociaux qui peuvent orienter ou modifier leurs axes de recherche. Du côté des interactions sciences-technique, une connaissance de l'histoire des sciences peut démystifier l'image d'une technique qui découle des sciences pour montrer des moments de relative indépendance de l'une par rapport aux autres et l'absence de relation mécanique entre ces domaines. Il suffit de revoir l'histoire de l'invention des instruments comme la lunette de Galilée, le microscope et l'astrolabe, de leurs perfectionnements ultérieurs pour se rendre compte de la complexité des interrelations.

Chapitre 5

Problématique, hypothèses et questions de recherche

En Tunisie, comme il a été précédemment mentionné dans l'introduction, la dernière loi d'orientation pour « l'école de demain » appelle à une amélioration continue de la qualité de l'apprentissage et du rendement de l'école en s'appuyant sur les recherches en éducation. Elle appelle à la promotion d'un enseignement des sciences qui contribue à une éducation à la citoyenneté et à l'acquisition d'une culture scientifique. Elle souligne enfin, qu'il revient à la recherche en éducation de suivre les nouveautés à l'échelle internationale pour en tirer profit.

De nombreuses recherches, conduites principalement dans les pays anglo-saxons mais pas uniquement, soulignent que la culture scientifique à visée citoyenne suppose qu'un élève sache apprécier les sciences comme des éléments majeurs de la culture contemporaine, maîtrise non seulement les savoirs scientifiques de base mais possède aussi des connaissances sur la nature de ces savoirs et sur la façon dont ils ont été élaborés. Parmi les approches recommandées pour travailler la dimension épistémologique de l'enseignement-apprentissage des sciences, il y a celle qui s'appuie sur l'histoire des sciences.

Conformément à la loi d'orientation, les parties introductives des actuels programmes de sciences physiques tunisiens mettent en avant l'acquisition d'une culture scientifique à visée citoyenne comme objectif de l'enseignement des sciences. Mais la visée épistémologique de l'apprentissage-enseignement des sciences reste largement implicite, générale, non déclinée en objectifs précis d'apprentissage, aucun moyen didactique ni activité pour les élèves n'étant suggérés. Par ailleurs, ces parties introductives renvoient une image caricaturale et faussée des sciences en évoquant « la » démarche, « la » méthode scientifique.

Les mêmes constats peuvent être faits à propos des manuels d'enseignement de sciences physiques tunisiens. L'analyse des éléments historiques présents montre qu'ils sont peu nombreux, centrés sur les découvertes des lois, et renvoient à une seule personne, souvent

célèbre, dont la photographie est légendée par une date ou un événement. Les textes historiques fournis servent de support à l'apprentissage de concepts scientifiques ou constituent un complément facultatif.

Fondant notre travail sur une approche didactique à orientation curriculaire, les constats précédents nous ont conduit à examiner la possibilité d'introduire l'histoire des sciences dans les cours de physique de l'enseignement secondaire tunisien dans le but de transmettre aux élèves une image plus authentique de l'activité scientifique.

Inscrivant notre réflexion dans celle menée par DidaScO³ en France, nous avons été conduit à questionner les conditions de transfert d'une innovation pédagogique d'un contexte éducatif à un autre. Les contraintes du système éducatif tunisien, les pratiques des enseignants qui privilégient l'acquisition et la transmission des savoirs scientifiques, le contrat didactique auquel sont habitués les élèves amènent en effet à s'interroger sur la possibilité de cette inclusion de l'histoire des sciences dans les cours de physique.

Dans le but d'enrichir les situations d'enseignement à caractère historique dans le domaine de l'optique élaborées par DidaScO, nous avons retenu comme thème historico-scientifique pour cette étude celui de l'histoire de la loi de la réfraction.

Afin de répondre à notre problématique, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la nature de l'innovation à expérimenter en classe ? Quels sont les objectifs d'apprentissage à choisir ? Quels sont les éléments historiques à retenir sur le thème de l'histoire de la loi de la réfraction ? Quels textes sont à élaborer ? Quelles activités sont à proposer aux élèves ?
- Quels sont les effets de l'expérimentation de cette séquence innovante sur les élèves ? Quelles sont leurs conceptions épistémologiques relativement aux objectifs d'apprentissage visés ? Comment accueillent-ils une séquence d'enseignement innovante au contenu essentiellement épistémologique qui se trouve en tension avec l'enseignement auquel ils sont habitués, autrement dit quel est leur rapport à l'innovation ?

³ Laboratoire DidaScO (Didactique des sciences d'Orsay).

- Comment l'enseignant met-il en oeuvre cette séquence ? Quelles difficultés/ réussites rencontre t-il ?
- Quelle généralisation de l'expérimentation peut être faite ? Quel est le rapport à l'enseignement et à l'innovation des enseignants ?

Deux hypothèses inspirées par les résultats des recherches précédemment mentionnées fondent notre travail. La première est que les élèves et les enseignants tunisiens partagent la même image des sciences que celles mises à jour dans la littérature, à savoir que les découvertes sont instantanées et faites par une seule personne, selon une démarche accordant une place prioritaire à l'expérience et occultant la réflexion théorique, en réponse à un seul type d'enjeux, la recherche de lois. La seconde est que les enseignants, de part leur formation initiale et continue, privilégient l'acquisition de savoirs scientifiques et un enseignement transmissif à caractère expérimental.

Partie2

Cadre théorique de référence

Chapitre1 : Cadre théorique historique

Chapitre2 : Cadre théorique didactique

Chapitre 1

Cadre théorique historique

1. Epistémologie et Histoire

1.1. La nature des sciences au travers de l'histoire des sciences

1.1.1. Introduction

Comme nous l'avons déjà signalé, notre travail poursuit un objectif majeur assigné à l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique, celui de travailler l'image de la nature des sciences des élèves et des enseignants afin de leur inculquer une représentation de ce que sont les sciences et l'entreprise scientifique en conformité avec l'épistémologie contemporaine.

Par cette introduction, nous visons à contrer les représentations erronées que se font les élèves de la nature des sciences et à développer chez eux une image plus « authentique » de celle-ci ainsi qu'une capacité à situer la portée d'arguments scientifiques dans des débats de société incluant d'autres dimensions, environnementales, économiques, sociales et éthiques en particulier. Ainsi on préparera des personnes susceptibles de jouer pleinement leur rôle de citoyen de sociétés scientifiquement et techniquement avancées.

La question qui se pose dans un cadre pédagogique est relative à la nature de l'histoire à intégrer dans les cours de sciences pour améliorer de façon positive la manière dont les apprenants et les enseignants se représentent les sciences.

Une revue de la littérature de recherche permet de distinguer deux versions de l'histoire des sciences couramment présentées sous forme d'une dichotomie : l'histoire internaliste et l'histoire externaliste. Récemment, une troisième approche se propose de dépasser cette dichotomie et plaide pour une approche « transversaliste » de l'activité scientifique qui tente de concilier, entre autres, les deux courants qui traversent la sociologie des sciences : le courant classique d'héritage mertonien (Popper, Lakatos, Hollis, Boudon) et celui qui adopte le programme de la nouvelle sociologie des sciences (Barnes, Bloor, Latour, Stengers).

1.1.2. L'histoire internaliste

Hans Reichenbach est l'une des figures éminentes des empiristes logiques, la thèse principale de cette école de pensée est que toute connaissance scientifique doit venir soit de l'expérience soit d'une vérité logique ou mathématique. Selon une approche « internaliste », il distingue dans son ouvrage « *Experience and Prediction* » édité en 1938, entre ce qu'il appelle « contexte de découverte » et « contexte de justification ». Les travaux des tenants de cette école de pensée portent essentiellement sur le second contexte qui incarne la façon avec laquelle le scientifique va présenter et faire valoir ses travaux auprès de ses pairs. Ils se sont alors attachés à définir un cadre normatif qui a pour finalité de justifier les affirmations scientifiques. Ainsi, les fondements logiques et épistémologiques de la science sont expliqués et interprétés au sein même du champ des sciences à l'exclusion de toute autre considération, notamment des contextes dans lesquels ces idées ont vu le jour et se sont développées.

Cette approche est interne car l'élaboration des savoirs scientifiques s'expliquerait d'abord et avant tout par des facteurs propres et internes à la pratique scientifique elle-même et à sa démarche spécifique s'appuyant le plus souvent sur l'observation d'un fait et amenant finalement à une découverte plus ou moins inattendue. Dans ce sens, les connaissances scientifiques résulteraient d'un face à face entre l'homme et la nature (Soler, 2000).

Cette approche consiste selon Joshua et Dupin (2003) à « *saisir toute la spécificité du discours scientifique dont la caractéristique principale serait de s'alimenter de son propre histoire, de ses propres problèmes* » (p. 54).

Elle serait ensuite cumulative au sens où le savoir scientifique serait le résultat d'ajouts de plus en plus complets qui rapprocheraient peu à peu d'une compréhension complète de la nature. Ce développement serait linéaire dans le sens où il s'agirait d'un progrès soutenu s'effectuant sans rupture, il se présenterait comme un processus rationnel complètement logique qui mène tout droit à la « vérité ». Ainsi, l'humanité avancerait vers la constitution d'un corpus de connaissances toujours plus nombreuses et plus précises. Cette approche soutient l'idée que la science progresse en retenant les idées justes et en écartant les fausses. Cette conception ignore donc les contradictions et les révolutions scientifiques ayant cours au sein du champ de recherche.

Une telle approche de l'histoire des sciences n'est donc pas de nature à travailler les représentations des élèves et des enseignants concernant les sciences et l'activité scientifique.

Au contraire, un enseignement des sciences qui utilise une histoire internaliste peut transmettre et approfondir des conceptions qui peuvent se résumer en ceci :

Les scientifiques sont des hommes remarquables et respectables, œuvrant en toute humilité, les yeux grands ouverts et avec rigueur, à la compréhension du réel, produisant un savoir universel, au-dessus des contingences et des intérêts du temps [...]. Par ailleurs, le savoir scientifique apparaît bien comme unique et éternel et de plus en plus complet, puisque toutes les relectures théoriques survenues historiquement sont gommées au profit d'une reconstitution historique où il n'est question que de faits qui s'ajoutent les uns aux autres (Mathy, 1997, p. 126).

1.1.3. L'histoire externaliste

Cette approche de l'histoire des sciences insiste quant à elle sur l'influence des facteurs sociaux externes : économiques, culturels, politiques ou institutionnels sur le travail du scientifique et les connaissances qu'il élabore. On y souligne l'influence des présupposés, des enjeux et des demandes de l'époque dans l'orientation et le conditionnement des recherches, l'influence des conflits de points de vue et des débats au sein de la communauté scientifique ainsi que les difficultés des scientifiques à imposer leurs modèles ou à « évincer d'autres ». Conformément à ce point de vue, soutenu par Prigogine et Stengers (1986), l'histoire des sciences n'est pas une accumulation de données qui s'incorporent dans une avancée simple et unanime. Elle est une histoire conflictuelle, de choix, de paris, de redéfinitions inattendues. On y montre de plus, l'importance des cadres conceptuels du scientifique dans l'interprétation des phénomènes étudiés.

Cette approche permettrait de rompre avec certaines conceptions erronées assez récurrentes, tant chez les élèves que chez certains enseignants :

- Une vision empiriste de la science qui considère que l'activité d'élaboration du savoir scientifique résulte de l'observation minutieuse des faits et phénomènes naturels permettant la découverte (ou le dévoilement) d'une réalité ou de « vérités » naturelles ;
- L'objectivité de l'activité scientifique soutient que les connaissances élaborées sont vierges des considérations ou intérêts du chercheur et de la société. Le scientifique, dans son travail, est intrinsèquement plus honnête et objectif que d'autres travailleurs. Ainsi, le dévoilement du « réel » s'opère grâce à des activités techniques expérimentales qui l'épurent des contingences et des motivations qui animent sa production.

- Selon cette vision, les théories scientifiques sont considérées comme des « vérités » établies et indiscutables. Les découvertes émanant de la science constituent donc des dogmes et l'aspect temporaire et provisoire des théories scientifiques est ignoré ;
- La progression linéaire du savoir scientifique qui suppose que le processus de l'élaboration des connaissances valides à une époque donnée est linéaire où une découverte découle naturellement d'une autre. Dans ce cadre, chaque découverte réalisée par un scientifique complète ou précise une découverte antérieure ;
- Le contexte social, culturel, économique et politique n'exerce aucune influence dans l'élaboration du savoir scientifique. Selon cette conception, l'activité scientifique vise la compréhension et la découverte du « réel » motivée uniquement par la curiosité et « le besoin de sécurité de l'espèce humaine » et au dessus des contingences et des intérêts du temps. L'influence du contexte dans le choix des programmes de recherche menés ou dans les interprétations avancées des phénomènes est ignorée ;
- Les progrès de la science sont le fait de scientifiques de « génie » ou du hasard : ainsi, les découvertes sont réalisées par des scientifiques dotés d'une intelligence supérieure ou bien sont le simple fruit du hasard. Ces derniers travaillent en solitaire. La production d'une connaissance s'explique par la seule activité intellectuelle du savant. Sont ainsi ignorés l'importance des débats au sein de la communauté scientifique et l'influence des autres scientifiques ;
- Un rationalisme étroit qui consiste en l'imagination un peu trop simple que les théories contemporaines sont « vraies » et que seules les questions légitimes sont celles posées par le courant scientifique dominant.

Cette approche permettrait aux élèves :

De mieux percevoir la force, les limites et la relativité des savoirs scientifiques faces à d'autres manières de connaître. Elle éviterait l'écueil d'une confiance absolue dans ces discours et d'une déférence exagérée pour la profession scientifique, en montrant cette profession, comme tout autre, est traversée de conflits d'intérêts liés aux choix contradictoires des groupes humains (Mathy, 1997, pp. 127-128).

1.1.4. L'histoire transversaliste

Cette approche se propose de concilier deux courants de pensée en sociologie des sciences.

La première en date, d'héritage mertonien, considère la science comme un mode de connaissance épistémologiquement différent des autres, qui échappe à l'analyse sociologique et ne prétend pas analyser le contenu cognitif des sciences, abandonnant cette tâche à l'épistémologie. Selon cette vision, la science est régie par un ensemble de normes qui constituent son éthos et sont censées guider les pratiques des scientifiques et assurer à leur communauté son autonomie de principe et de régulation. Cette idée est ainsi exprimée:

The cultural context in any given nation or society may predispose scientists to focus on certain problems, to be sensitive to some and not other problems on the frontiers of science. This has long since been observed. But [...] the criteria of validity of claims to scientific knowledge are not matters of national taste and culture. Sooner or later, competing claims to validity are settled by the universalistic criteria (Merton, 1973, p. 271).

Pour Merton, l'effet du social sur le contenu de la science n'est que temporaire et apparent : la nature, c'est-à-dire la « réalité » et ses lois extérieures à l'homme, reprennent rapidement leur droit. Les mécanismes profonds d'élaboration des connaissances scientifiques sont donc internes et le sociologue n'a rien de pertinent à dire sur l'explication du contenu scientifique. Par contre, cette sociologie prétend expliquer seulement les conditions et les modalités de sa production, autrement dit, elle ne s'intéresse qu'aux conditions institutionnelles de la science.

Un deuxième courant de pensée qualifiée de relativiste est né dans les années 1970. Il remet en cause le point de vue mertonien et considère que le processus d'élaboration du savoir scientifique s'explique entièrement au moyen de facteurs culturels et sociaux. Cette nouvelle sociologie voit le jour avec les travaux de Thomas Kuhn et se développe avec le courant SSK (*Sociology of Scientific Knowledge*) à travers les programmes relativistes :

- Le programme fort (*Strong Program*) de David Bloor qui cherche à expliquer la formation des connaissances scientifiques, leur réussite ou leur rejet, par des facteurs sociaux et culturels.
- Le programme empirique du relativisme (*Empirical Program of Relativism*) de Harry Collins qui cherche à montrer la flexibilité interprétative des résultats expérimentaux. Il vise l'étude des controverses scientifiques qui résultent de cette flexibilité. Pour les tenants de ce programme, il n'existe pas d'expérience cruciale permettant de clore une

controverse, ce sont des mécanismes sociaux qui vont imposer une interprétation unique.

Récemment, dans un ouvrage intitulé « *Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique* », Shinn et Ragouet (2005) cherchent à dépasser cette opposition en proposant un modèle qui tient compte de l'inscription de l'activité scientifique dans un contexte social sans pour autant nier sa relative autonomie à l'égard des enjeux sociaux. Ils défendent une sociologie « transversaliste » de l'activité scientifique. Celle-ci devrait rendre compte tout à la fois de la dynamique interne des disciplines scientifiques, auxquelles est reconnue une certaine autonomie, de leurs interpénétrations ainsi que de leurs dimensions sociales. Cependant, Blanckaert (2007) s'interroge sur la pertinence de ce modèle, il écrit :

Le modèle transversaliste est également fragile et suggestif. Il lui manque, pour le moins, une démonstration historique congruente. S'il est vrai, comme l'écrivent les auteurs, qu'il est aussi ancien que la science moderne, il nous faut donc regretter avec eux que « l'un des traits caractéristiques de la nouvelle sociologie des sciences tient précisément au peu d'attention que ses promoteurs accordent à l'histoire » !

2. Histoire de la dioptrique

2.1. Optique antique

2.1.1. Mécanisme de la vision - les différentes écoles.

Les philosophes grecs n'ont pas porté d'intérêt au problème de la lumière, ils ont cherché plutôt « à connaître l'homme dans ses fonctions et ses facultés ». La vision étant l'une de celle-ci, ils sont donc amenés à élucider le mystère de la vision : comment fait-on pour voir ? Leur ambition première est donc d'expliquer ce qu'est la vision.

Pour interpréter le mécanisme de la vision dans l'antiquité, différentes écoles se développèrent : l'école atomistique qui prône l'intromission dans l'œil des simulacres émis par les corps, l'école pythagoricienne qui défend l'émission d'un feu par l'œil, l'école platonicienne qui combine ces deux thèses et enfin une quatrième, celle d'Aristote, qui considère que la vision résulte du mouvement d'un diaphane entre l'œil et l'objet vu. Il semble que les théories les plus adoptées aient été celles des écoles pythagoriciennes et atomistiques.

L'école pythagoricienne :

Cette école est fondée en Italie à la fin du IV^{ème} siècle av. J.C., l'un de ses disciples, Archytas de Tarente [430 – 350/365?] reprend les idées de Pythagore [570- 480].

Cette école explique le mécanisme de la vision par l'émission d'un « quid » (feu visuel) qui émerge de l'œil et se dirige vers la chose vue et dont le contact avec les objets permet d'en percevoir les formes et les couleurs, elle nie toute influence de l'extérieur. Ainsi chaque individu possède un feu intérieur :

C'est lui qui apparaît dans l'éclat du regard, c'est lui qui nous permet de voir; le feu intérieur du chat plus intense que celui de l'homme (ses yeux ne brillent-ils pas?) lui permet de voir la nuit [...] les yeux des serpents ne peuvent – ils paralyser, ceux d'un mage hypnotiser? (Maitte, 1981, p. 17).

En postulant l'émission d'un « quid » par les yeux bombés, les pythagoriciens confirment une explication logique relative aux autres organes des sens : ceux-ci sont « creux et adaptés à la réception permettraient à l'oreille de recevoir les sons et entendre, au nez de capter les odeurs et sentir, à la bouche d'absorber les aliments et de goûter » (Maitte, 1981, p. 17).

Euclide [325 – 265 av. J.C.], un partisan du feu visuel, précise que, pour voir les détails très fins d'un objet, le « quid » qui tombe sur une partie de l'objet doit être parfaitement délimité : il s'agit là de rayons visuels qui sont émis par l'œil avec une certaine vitesse, ils « décrivent des lignes droites [...] », ils « partent donc de l'œil et se dirigent vers l'objet en se répartissant à l'intérieur d'un cône ayant l'œil pour sommet » rapporte Maitte (1981, p. 17). Ainsi Euclide vient de créer de nouveaux concepts d'optique : celui de rayon visuel émis par l'œil, celui de la propagation rectiligne et celui du rayon comme direction de propagation de ce filet.

Cette théorie a connu un succès considérable, elle a prédominé jusqu'au X^e siècle de notre ère. Selon Ronchi (1996), cette théorie a eu une « très grande influence » sur le développement de l'optique. En fait, elle a été mathématisée par Euclide et soumise à l'expérimentation par Ptolémée. Le poids qu'a eu cette théorie bien qu'elle soit dépourvue de toutes bases scientifiques est justifié par le soutien de deux autorités scientifiques, Euclide et Ptolémée, selon les propos de Chevalley (1980).

L'école atomistique (l'école d'Abdère)

Cette école est représentée par Leucippe de Milet [500- 420] et Démocrite d'Abdère [460 – 360 av. J.C.]. Ce dernier en fut le représentant le plus célèbre. Cette école postule l'indestructibilité de la matière et l'indivisibilité de ses derniers éléments. Les parcelles discontinues et insécables prônées par cette théorie s'appellent atomes. Lorsqu'un corps périt ses différents atomes s'associent à d'autres pour donner naissance à de nouveaux corps. Lucrèce (98-55 av. J.C.), qui reprend les idées de Démocrite, donne cette description des atomes dans le livre quatrième : « [...] la diversité de leurs formes, le mouvement éternel qui emporte dans l'espace, par une tendance qui leur est propre, ces éléments de toutes choses, et comment tous les êtres naissent de leurs unions ».

Lucrèce s'est interrogé sur certaines émanations dont certaines s'évanouissent en toutes directions, perdent leur forme et viennent stimuler nos sens telles que la fumée du bois, la chaleur du feu et l'odeur de certains corps, et dont d'autres se détachent de la surface des objets et génèrent des formes que perçoit la vue : ce sont « des simulacres » ou « effigies ». Il écrit :

[...] tout d'abord, parmi les objets à la portée de nos sens, on en voit beaucoup émettre de leurs éléments : de ceux-ci, les uns se dissipent et se résolvent dans les airs, comme la fumée de bois vert ou la chaleur de la flamme ; les autres au contraire sont d'une texture plus serrée : telles les rondes tuniques qu'à l'été abandonnent les cigales, les membranes dont les veaux se défont en naissant, ou encore la robe que le serpent visqueux quitte au milieu des ronces – dépouille flottante dont souvent nous voyons s'enrichir les buissons. Puisque de tels phénomènes se produisent, une image impalpable doit également émaner des corps et se détacher de leur surface. (Preuve de l'existence des simulacres. Livre IV.)

Les atomistes sont conduits à élaborer une théorie de la vision selon laquelle les objets envoient de fines particules à l'image des objets, « les simulacres », qui se dirigent vers l'œil et ont des dimensions qui diminuent au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de l'œil. Ronchi (1996, p.6) rapporte de J. Trouessart des raisonnements attribués à Leucippe de Milet indiquant que :

Toute modification produite ou reçue a lieu en vertu d'un contact ; toutes nos perceptions sont tactiles, tous nos sens sont des espèces de toucher. D'après cela, comme notre âme ne sort pas de nous pour aller toucher les objets extérieurs, il faut donc que ces objets viennent eux-mêmes toucher notre âme, en passant par les sens. Or, nous ne

voyons pas les objets s'approcher de nous quand nous les percevons; il faut au moins qu'ils envoient à notre âme quelque chose qui les représente, des images, « eidola », espèces d'ombres ou des simulacres matériels qui enveloppent les corps, voltigent à leur surface et peuvent s'en détacher pour apporter à notre âme les formes, les couleurs et toutes les autres qualités des corps d'où ils émanent.

Pour Lucrèce, ce sont les simulacres qui causent la vue : « *c'est pourquoi, je le répète, il faut reconnaître que des émanations des corps frappent nos yeux et provoquent la vue* ». Ceux-ci sont dotés d'une vitesse qui dépasse celle de la lumière du soleil. Pour convaincre, Lucrèce présente une justification expérimentale qualitative donnant une indication intuitive :

Voici encore une preuve convaincante de la vitesse qui emporte les simulacres : place la nuit un miroir d'eau sous un ciel étoilé ; tout aussitôt les astres éclatants qui illuminent le ciel viennent s'y refléter. Vois-tu maintenant que l'image descend immédiatement des régions du ciel jusqu'aux régions terrestres ? (Vitesse des simulacres. Livre IV).

Mais qu'arrivent-ils aux simulacres quand un obstacle s'oppose à leur marche ? Ils le traversent, s'y abiment ou sont renvoyés :

Rencontrent-ils des corps poreux, ils les traversent, telle notamment l'étoffe ; mais s'ils se heurtent aux aspérités d'une roche, ou à du bois, ils s'y déchirent, sans pouvoir produire d'image. Enfin un objet brillant et compact, comme l'est un miroir, s'oppose-t-il à leur marche, rien de semblable n'arrive. Ils ne peuvent le traverser comme l'étoffe, ni s'y déchirer : le poli de ces corps assure leur salut. Voilà pourquoi de telles surfaces nous renvoient les images. Aussi soudainement que tu veux, en n'importe quel temps, présente au miroir n'importe quel objet, toujours apparaît l'image... Ainsi donc une foule de simulacres s'engendre en un instant, et l'on peut à bon droit dire que leur naissance est rapide. (Rapidité de formation et vitesse des simulacres. Livre IV).

Cette théorie explique la position reculée de l'image par rapport au plan miroir par le déplacement d'une double colonne d'air, de l'objet au miroir et du miroir aux yeux : l'image est déplacée d'un côté à l'autre suite au rebondissement de la colonne d'air au retour sur le plan miroir. Elle rend compte au moins qualitativement du phénomène de la réflexion. Lucrèce présente le raisonnement suivant :

Ainsi en est-il de l'image ; une fois projetée par le miroir, elle chasse et pousse devant elle, en se dirigeant vers nos regards, la couche d'air interposée entre elle et nos yeux et nous en donne la sensation avant celle du miroir. Mais à peine avons-nous aperçu le miroir lui-même, qu'immédiatement une image venue de nous parvient à celui-ci, et, réflétee par lui, revient jusqu'à nos yeux ; et, comme, dans sa marche, elle déplace en avant d'elle une autre couche d'air, qu'elle nous fait voir tout d'abord, elle nous semble ainsi reculée au-delà du miroir, à sa distance exacte. Aussi, je le répète encore, rien d'étonnant que l'image nous apparaisse avec son recul dans le miroir, puisque, dans ce cas comme dans le précédent, l'impression est l'effet d'une double colonne d'air. (Théorie du miroir. Livre IV).

Lucrece ramène à la nature l'égalité de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion « [...] *la nature ayant voulu que l'angle de réflexion fût toujours égal à l'angle d'incidence* » (Théorie du miroir. Livre IV).

Les atomistes tentent d'expliquer certains phénomènes, en particulier la distance : l'objet paraît d'autant plus éloigné que la longueur de la colonne d'air agité devant les yeux est plus longue. La couleur est difficilement analysée : en fait, dans le cadre de cette théorie l'atome n'a pas de couleur propre, celle des objets dépend du mouvement et de l'agencement de ses atomes. La difficulté de voir dans la nuit est due à « *l'air obscur qui se trouve derrière le jour, étant plus épais, bouche les ouvertures, obstrue les canaux des yeux* » et ne laisse aucun simulacre mettre la vue en action [...] (Phénomènes divers de la vision. Livre IV.)

Pour eux, certaines « erreurs » comme la vision des rames brisées dans l'eau, les étoiles qui semblent attachées à la voûte céleste alors qu'elles sont en mouvement permanent, sont imputées aux jugements de l'esprit qui donne l'illusion de voir ce que les sens n'ont pas vu.

Des phénomènes analogues sont analysés par les atomistes comme les tromperies mais ne sont pas étudiés. Ayant une très grande confiance dans les sens, ils ne poussent pas l'étude expérimentale de ces phénomènes.

Nous retenons que l'une des difficultés rencontrées par la théorie des simulacres est celle de comprendre comment le simulacre d'un objet assez grand à l'instar du soleil, d'une montagne, d'un arbre, peut pénétrer dans l'œil. Il faut donc supposer qu'il diminue de dimension au fur et mesure qu'il s'approche de l'œil, il est inscrit dans un cône dont le sommet est situé dans l'œil

de l'observateur et la base sur l'objet. Ainsi pour plusieurs observateurs situés à des distances différentes, il faut admettre que les simulacres émis par l'objet se comportent différemment d'un observateur à un autre. Pour Bracco (2004, p.7), « *l'œil de l'observateur joue un rôle actif indirect dans cette théorie puisqu'il conditionne les caractéristiques de la pyramide visuelle dans laquelle doit s'inscrire le simulacre pour parvenir à l'œil* ».

Cette théorie indique que les simulacres peuvent être arrêtés par les corps opaques, traverser les milieux transparents et subir la réflexion sur les miroirs. Elle rend compte, du moins très qualitativement, du phénomène de la réflexion des Simulacres sur un miroir et affirme au passage une première loi d'optique : l'égalité de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion. Cependant, les conceptions des atomistes ont été combattues par plusieurs penseurs de l'antiquité gréco-latine ainsi que par des adeptes de la scolastique aux XV^e et XVII^e siècles en occident.

2.1.2. L'optique d'Euclide

Euclide (III^e Siècle av. J.C.) a été un partisan de l'école pythagoricienne. Comme nous l'avons déjà signalé, son « souci est de rendre compte des *illusions* d'optique, par une méthode géométrique ». Ainsi son optique repose selon Simon (1996) sur le concept de « rayon visuel » obéissant à la théorie de l'émission. En postulant que « *les rayons émis par l'œil se transmettent en ligne droite*⁴ » et vont percuter l'objet visé, Euclide géométrise l'optique. Ronchi indique que le concept du rayon visuel est utilisé par Euclide dans son optique comme un moyen de raisonnement et un outil de progression dans le champ de l'expérimentation, il écrit :

Pour entreprendre l'œuvre de découverte et de conquête, l'homme a créé une arme d'une puissance formidable, la théorie du rayon lumineux⁵, abstraction mathématique nécessaire à l'esprit humain pour qu'il puisse s'orienter et avancer sur un terrain qui paraissait impraticable. Avec cette « lumière » simple, idéale, obéissant à des lois impossibles en pratique l'homme s'est créé le moyen de raisonner et de progresser même dans le champ expérimental (1996, p.19).

Le modèle du rayon visuel fonde l'optique d'Euclide. Il permet selon Lindberg (1976, p. 12) de traiter les problèmes optiques en problèmes géométriques :

⁴ Ronchi (1996, p.14)

⁵ Ici Ronchi ne distingue pas entre rayon visuel et rayon lumineux. Il s'agit en fait du rayon visuel.

La rectilinéarité des rayons, qu'Euclide se donne dans son premier postulat, permet de développer une théorie de la vision selon des lignes géométriques. Cette règle simple gouvernant la propagation de la lumière ayant été donnée (aussi bien que la réflexion, introduite dans la proposition 19), il est possible d'user de lignes droites d'un diagramme géométrique pour représenter les rayons visuels et transformer ainsi les problèmes optiques en problèmes géométriques.

À l'aide de ce concept du rayon visuel, Euclide énonce les lois de la réflexion sous forme géométrique, lois qui ont été généralisées à des miroirs convexes et concaves, et expérimente pour vérifier la propagation rectiligne de la lumière.

En bref, pour Euclide et pour Ptolémée par la suite, l'optique est une pure géométrie du regard construite sur l'hypothèse de la notion du rayon visuel. Simon (2003, p.86) l'exprime ainsi :

Grâce à la notion de rayon visuel, le mathématicien réussit à faire correspondre à un élément de l'objet, le point sur lequel tombe le rayon, un élément du regard. Il est dès lors possible de définir la notion d'angle visuel, fondant l'analyse perspective de la vision directe, et celles de réflexion et de réfraction du rayon visuel.

Après Euclide, plusieurs savants se sont servis de cette géométrisation du rayon visuel pour étudier la réflexion ou la réfraction :

- Héron d'Alexandrie [I^{er} siècle ap. J. C.] formule la loi de la réflexion « en fonction du principe de minimum » qui satisfait elle-même au principe de plus court chemin : « le plus court chemin entre deux points, dans un milieu donné, est la droite⁶ ». Il étend à tort la loi du chemin minimum pour énoncer la loi de la réfraction.
- Ptolémée [100 – 170 ap. J. C.] soumet les résultats d'Euclide à l'expérimentation et entame l'étude de la réfraction.
- Damianus, qui vécut vraisemblablement après Ptolémée, semble, de l'avis de plusieurs historiens des sciences, avoir tout tiré de l'œuvre d'Héron d'Alexandrie. Il « fait appel comme lui à une structure conique pour la vision perspective et dispose le sommet du cône à l'intérieur de l'œil » et précise que « si la vue doit atteindre le plus vite possible

⁶ En géométrie euclidienne.

la chose à avoir, il est nécessaire qu'elle y aille en ligne droite, celle-ci étant la plus courte de toutes les lignes qui ont les mêmes extrémités » (cité par Ronchi 1996, p.22).

Nous constatons que les explications présentées par les savants grecs pour rendre compte de la vision ont été diverses, la seule qui a permis selon Blay (2007) et Simon (1996) un développement véritable d'une science géométrisée est celle des rayons visuels, développée par Euclide et définitivement formulée par Ptolémée. Sous cette forme, elle constituera un point de référence pour la totalité des études géométriques de la vision jusqu'au X^e siècle de notre ère.

Cette théorie, bien que dominante, présente des points faibles qui ont faussé et retardé pour longtemps le développement des idées. Parmi celles-ci, nous évoquons :

- La vision d'un corps qui était conçue comme une opération globale unique ;
- La géométrisation « perspective » qui amena les philosophes de l'époque à considérer l'œil entier comme le point sommet du cône perceptif et à ne voir en lui qu'un organe sensitif. Cela les a conduits à ne pas chercher à connaître la structure réelle de l'œil.

2.1.3. Ptolémée et l'expérimentation

« Ce dernier livre⁷ est sans comparaison le plus curieux de tous, on y voit des expériences de physiques bien faites, ce qui est sans exemple chez les anciens »

Jean Baptiste Delambre, *Histoire de l'astronomie ancienne*, t. II, p. 427

Claude Ptolémée [100/90 ? – 160/170 ? Après J.C.], astronome grec d'Alexandrie, publia au environ de l'an 140 une compilation de toutes les connaissances astronomiques des Anciens sous le nom d'*Almageste*. Dans ce livre, il est aussi question d'optique. Elle reste essentiellement une science de la vision : « *c'est par elle [l'optique] que les arabes ont appris tout ce que les Grecs avaient découvert ou démontré sur la vision, les miroirs et les réfractions* » souligne Simon (1988, p.83). Elle cherche à analyser le processus de la vision qui est fondé sur le concept de rayon visuel, qualifié par Simon (1998, p.18) comme « *une curieuse entité. Il s'agit d'une excroissance sensorielle qui obéit à des lois géométriques (la rectilinéarité) – d'une sorte d'organe additionnel, qui va à distance palper les objets comme un pseudopode émis par l'œil* » et il ajoute « *le rayon visuel sent l'objet où il est, c'est-à-dire hors*

⁷ Il s'agit du livre V de l'optique de Ptolémée

de notre corps : pour Ptolémée par exemple, il a le sens de sa propre longueur, ce qui explique notre perception des distances ».

Dans cette partie d'optique, Ptolémée s'est interrogé « sur la nature de ce qui provoque la vision » puis il « étudie géométriquement la manière dont se fait la vision et les diverses conditions de son exercice correct », évoque les méprises de la vision qui concernent « *la vision fidèle* » et « *la vision faussée* » et analyse toutes les causes d'erreurs visuelles possibles : défaut de l'œil, illusions d'optique, etc.

Dans l'optique de Ptolémée, l'idée qu'on se fait de la vision conduit à tenir l'image obtenue à travers la réflexion et la réfraction comme un pur et simple leurre qui s'inscrit sous le signe du faux. Dans le début de son livre III, Ptolémée illustre cette idée en écrivant :

Sur les différents éléments qui tombent sous la vue, sur la manière dont on les voit, et sur les différentes façons dont le regard est abusé en recherchant la vérité de ce qu'il y a à voir, nous nous sommes expliqué dans ce second livre. Toutefois nous devons poursuivre sur les choses qui comportent du faux et de l'incertain. Nous avons montré que certaines sont vues de manière directe, et sur elles, nous nous sommes brièvement et suffisamment expliqué. Mais d'autres surviennent quand se brise le rayon visuel, comme nous l'avons noté plus haut ; il est temps de procéder à des démonstrations qui parachèvent leur science, et de distinguer entre les deux espèces de ce genre de représentation. (Lejeune, 1989, p.223)

Ptolémée explique comment se produit la brisure du rayon visuel et précise la nature du milieu que rencontre ce rayon lors de la réflexion ou de la réfraction :

La brisure du rayon visuel se produit tantôt par inversion, et résulte d'une réflexion par des milieux qui empêchent sa pénétration et sont appelés communément « miroirs », tantôt avec pénétration et résulte d'une réfraction dans les milieux qui n'empêchent pas la pénétration et sont communément appelés « transparents » (Ibid., p.223).

Plus précisément, dans le livre V, Ptolémée étudie la théorie de la réfraction et entame l'étude des images réfractées par les dioptrés de différentes formes. Cette étude répond à un seul type d'enjeu, la recherche de lois qui gouvernent le phénomène de la réfraction.

Ptolémée indique alors, que la réfraction du rayon visuel dépend de la nature du liquide que traverse ce rayon et qu'à chaque état du milieu correspond une quantité bien déterminée de brisure :

Ce genre de brisures du rayon visuel ne se produit pas [uniformément] dans tous les liquides et milieux rares, mais dans chacun d'eux se produit [une brisure] de quantité déterminée qui correspond à l'état du milieu [avec la déviation tout juste nécessaire] pour qu'il puisse pénétrer (Ibid., p. 223).

Il signale aussi que la réfraction résulte seulement du choc des rayons visuels sur les surfaces de séparation de deux milieux transparents de natures différentes : « [le rayon visuel] se propage en ligne droite et les brisures des rayons sont dues seulement au choc sur les surfaces des milieux de compositions différentes » (Ibid., p. 223). Il ajoute que la réfraction se produit non seulement quand le rayon visuel passe d'un milieu plus rare au milieu plus dense, mais aussi lors du passage inverse, et que les angles ne sont pas égaux, comme dans le cas de la réflexion, mais qu'ils « présentent une certaine relation quantitative par rapport à la normale [au point d'impact]. Nous devons maintenant mesurer les différences concrètes des angles [d'incidence et de réfraction] dont cette relation est la loi générale » (Ibid., p. 224).

Pour Ptolémée, la réflexion et la réfraction sont deux sortes de brisures :

À savoir : primo dans les deux cas, tout objet apparaît sur le prolongement du rayon visuel qui l'atteint après brisure, c'est à dire selon la direction [initiale] du rayon qui va de l'œil [au point d'incidence] de la surface où se produit la brisure ; secundo, [l'image] se situe sur le prolongement de la perpendiculaire menée de l'objet à la surface où se produit la brisure (Ibid., p. 224).

Il dégage en conséquence que « le plan qui contient le rayon brisé doit être normal à la surface réfringente » (Ibid., p. 224).

Pour fonder ses résultats, Ptolémée adopte une démarche expérimentale :

- Pour présenter le phénomène de la réfraction, il propose l'expérience de la pièce de monnaie placée dans un récipient appelé « *baptisir* ». Il en donne cette description :

Quand au phénomène de la réfraction, nous pouvons le saisir sur le vif par la pièce de monnaie placée dans le récipient appelé baptisir. L'œil est placé à un endroit tel que le rayon visuel qui affleure le bord du récipient aboutit plus haut que la pièce de monnaie. Toutes conditions égales, on versera doucement l'eau dans le récipient jusqu'à ce que le rayon visuel qui affleure le bord soit brisé vers l'intérieur et tombe sur la pièce de monnaie. Le résultat est que des objets, qui au départ n'étaient pas vus, apparaissent alors sur une droite tirée de l'œil à un point plus élevée que la position véritable. On croit non pas que le rayon visuel est réfracté, mais que ceux-ci nagent et s'élèvent jusqu'au rayon visuel. C'est pourquoi, ils apparaîtront alors sur le prolongement du rayon visuel [incident] et d'autre part sur la normale menée de [l'objet] à la surface de l'eau, selon les lois que nous avons expliquées (Ibid., p. 225).

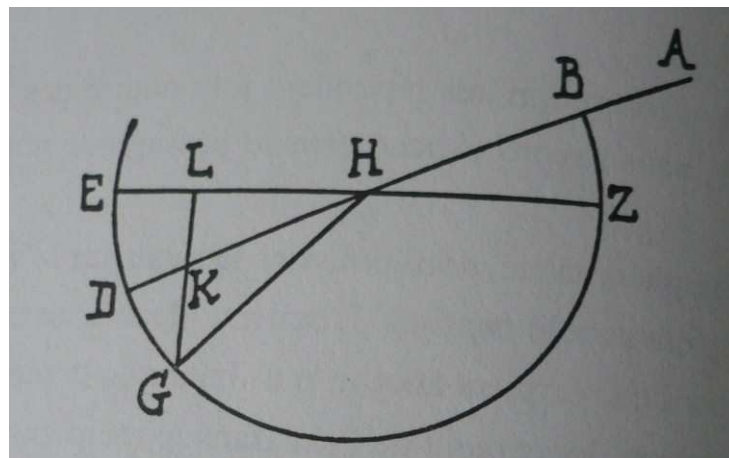


Fig.1 : baptisir (Lejeune, 1989, Fig. 79, p. 225)

- Pour établir la relation entre l'angle d'incidence et l'angle de réfraction pour différentes interfaces : il conçoit et fabrique lui-même ses propres instruments de mesure. Une description détaillée des dispositifs expérimentaux utilisés par Ptolémée est présentée par Simon (1988, pp.168-169). Ces dispositifs concernent :

L'interface air – eau

Ptolémée utilise une tablette en bronze, partagée en quatre quadrants par des axes AEG et BED, dont chacun est gradué de 0 à 90° (figure 2).

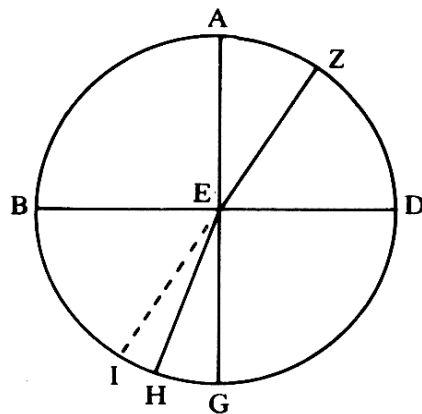


Fig. 2: la tablette pour mesurer les angles (Simon, 1988, fig.21, p.168)

L'axe AEG constitue l'origine des graduations et est perpendiculaire au diamètre BED. BED coïncide avec la surface d'un récipient contenant de l'eau claire. En E, il place une marque colorée (mire). Il place une autre mire en Z et une troisième plus longue en H, sur l'arc opposé GB, jusqu'à l'observation en un point I du prolongement de ZE.

L'angle d'incidence est AEZ tandis que l'angle de réfraction est GEH : ils se lisent directement sur la graduation du disque.

L'interface air – verre

Ptolémée ajoute un demi-cylindre en verre où il place sa face plane sur le diamètre BED et son centre en E et le fixe sur le demi-disque BGD (figure 3). Il colore en noir le rayon incident ZE et il déplace la mire H sur l'arc BG jusqu'à l'apparition du point I prolongement de la droite ZE. La lecture des angles se fait directement.

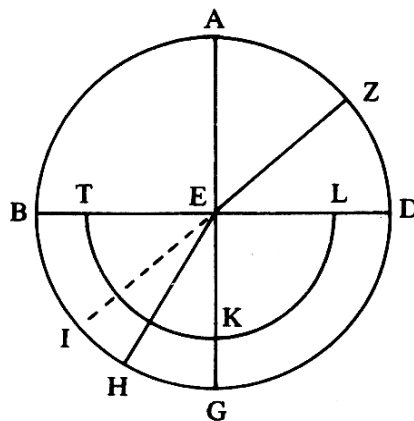


Fig.3: la tablette et le demi-cylindre en verre (Simon, 1988, fig.22, p.168)

L'interface eau – verre

Dans ce cas, Ptolémée fixe le demi-cylindre en verre sur le demi-disque BAD et il remplit le récipient situé sur l'autre moitié du disque avec de l'eau jusqu'à ce qu'elle effleure la face plane du verre BED (figure 4).

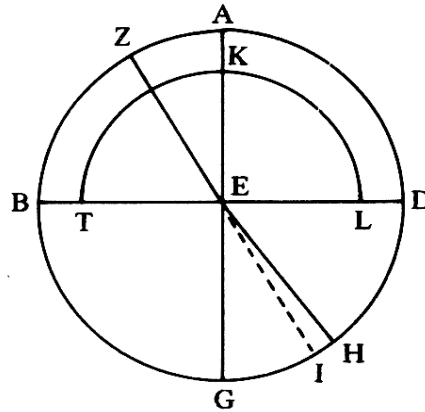


Fig.4: la tablette et le demi-cylindre en verre pour l'interface eau-verre (Simon, 1988, fig.23, p.168)

Ptolémée dresse des tableaux de mesures en faisant varier dans chaque cas l'angle d'incidence de 10° en 10° jusqu'à la valeur 80° et mesure à chaque fois l'angle de réfraction.

Il étudie aussi la réfraction atmosphérique. Cette étude expérimentale lui permet d'énoncer un certain nombre de lois parmi lesquelles :

- *la réfraction est la même quantitativement dans les deux sortes de passages, mais diffère qualitativement. En effet, au passage du milieu plus rare au milieu plus dense [le rayon visuel] se rapproche de la normale, tandis que dans le passage d'un milieu plus dense à un milieu plus rare elle s'écarte de la normale* (Lejeune, 1989, p.242).
- *de plus, les milieux et les angles sont différents mais la différence entre [angle d'incidence et angle de réfraction] est d'autant plus grande que la densité d'un des deux milieux croît* (Ibid., p.242).
- Si dans une même table, i' est un angle d'incidence plus grand que i , et r' et r deux angles de réfraction correspondants on a :

$$\frac{i'}{i} > \frac{r'}{r} \text{ et } \frac{i'}{r'} > \frac{i}{r} \text{ alors } \frac{i'-i}{i} > \frac{r'-r}{r}$$

En conclusion, dans cette étude, Ptolémée cherche à comprendre le phénomène de la vision, traite des illusions et toutes les causes d'erreurs possibles. Dans le cas de la réfraction, il poursuit un enjeu théorique : la recherche de la loi de la réfraction. Pour ce faire, il pratique une démarche expérimentale. Il réalise un dispositif expérimental qui lui permet de mener une étude systématique de la réfraction. Il énonce certains résultats qualitatifs présentés sous forme d'inégalités entre angles d'incidence et de réfraction.

2.2. Moyen Âge : la dioptrique dans la civilisation musulmane

2.2.1. Introduction

L'optique en pays d'islam est héritière de l'optique gréco-romaine, on y retrouve manifestement ses questions, ses concepts, ses résultats et ses traditions. Cette dépendance qui caractérise la première période de cette optique naissante s'enrichit rapidement d'une « recherche novatrice » lors de la seconde étape dont l'apogée se situe entre les X^e et XI^e siècles. Deux figures de marque ont contribué à enrichir cette période : Ibn Sahl et Ibn Al Haytham. Leurs apports dans l'étude de la dioptrique sont considérables.

2.2.2. Ibn Sahl

Abū Sa'd al-'Alā' Ibn Sahl est un mathématicien de la deuxième moitié du X^e siècle. Il a vécu à Bagdad sous le règne de la dynastie Buwayhides dont le territoire s'étendait approximativement sur l'Irak et l'Iran occidental. Ni sa naissance, ni sa mort, ne sont connues. Tout suggère qu'il est né dans la dernière décennie de la première moitié du X^e siècle et qu'aux alentours des années 986, il est encore en activité.

En tant que mathématicien, Ibn Sahl est connu surtout par ses travaux sur les coniques, en particulier « sur la quadrature de la parabole », « sur les propriétés des trois coniques ». Ses travaux en optique comportent, entre autres, « *le traité sur les instruments ardents* » qui s'inscrit dans la continuité d'une tradition déjà anciennement datant du III^e siècle avant notre ère, à savoir l'embrassement d'un corps par une lumière au moyen d'instruments ardents. Il illustre clairement cette idée dans l'introduction de son « Livre sur les instruments ardents » :

J'ai persisté un temps à chercher la vérité de ce qu'on attribue aux mathématiciens sur le pouvoir d'embraser un corps par une lumière à une grande distance, et de ce qu'on a associé à Archimède : avoir embrasé les bateaux des ennemis par cette sorte de procédés

ingénieux jusqu'à ce que j'eusse connu l'état du sujet dans son ensemble, et que je l'eusse poursuivi en détail (cité et traduit par Rashed, 1993, p.1).

Dans « Les catoptriciens grecs », Rashed (2000) attire l'attention sur l'importance de certains objets comme le miroir ardent, qui, en plus du but pratique auquel il est destiné, « *a joué un rôle important dans l'incitation à la recherche depuis le second siècle avant l'ère chrétienne au moins, et jusqu'au XVIII^e siècle, en attirant non seulement les géomètres du premier rang, mais aussi toute une foule de mathématiciens de moindre prestige* » (p. XII).

Dans cette perspective, Ibn Sahl semble se poser deux questions déjà anciennes à propos des miroirs ardents qui sont, selon Rashed (1993) : « *La première est d'ordre théorique, portait sur les propriétés géométriques des miroirs, sur la possibilité d'embraser une substance combustible en fonction de la distance et de la position de la source lumineuse* » (p. XVI)

La deuxième touche à la véracité de la légende d'Archimède, ce qui a conduit les catoptriciens de l'époque à s'interroger « *sur la forme du miroir et la composition du système catoptrique qui aurait été utilisé par Archimède* » (*Ibid.*, p. XVI).

Ainsi, Rashed avance que « *La recherche sur les miroirs ardents semble encore vivante à la veille des travaux d'Ibn Sahl* », recherche dans laquelle il est impliqué et qui soulève alors une « *une nouvelle interrogation* », celle de « *l'embrasement par la lumière qui traverse un « instrument » « -Alā-» et qui se réfracte dans l'air* » (*Ibid.*, p. XVII).

Dans ce sens, Ibn Sahl écrit dans l'introduction déjà citée :

[...] j'ai puisé de l'aide dans ce que j'ai trouvé dans les livres des anciens, dont j'ai tiré ce qu'ils en contenaient, à savoir la description de l'embrasement par la lumière du soleil réfléchi sur un miroir à une petite distance, et une espèce d'embrasement par la lumière d'un corps proche qui se réfléchit sur un miroir. J'ai poursuivi l'examen de ce qui n'y était pas contenu, jusqu'à ce que j'eusse déterminé cela, à savoir la description de l'embrasement par la lumière du soleil qui pénètre dans un instrument et se réfracte dans l'air (Rashed, 1993, pp.1-2).

Le problème des miroirs ardents se voit donc reformulé et étendu à la recherche de l'embrasement en un point donné, et ce, en utilisant la réfraction de la lumière provenant d'une source lumineuse, éloignée ou proche, et qui pénètre dans un instrument.

Nous voyons l'importance du champ d'étude des miroirs ardents dans l'élaboration de la théorie géométrique des lentilles d'Ibn Sahl. A propos des catoptriciens grecs, Rashed (2000) écrit :

Si on écarte l'étude des miroirs ardents, on ne comprendra rien à l'histoire de la catoptrique ; et on sera aussi désarmé devant celle de l'anacoustique et de la dioptrique à partir du X^e siècle, avec Ibn sahl et Ibn al- Haytham : nous savons en effet à présent que la première théorie géométrique des lentilles a vu le jour comme une extension de la recherche sur les miroirs ardents (p.XIV).

Dans son étude du phénomène d'embrassement, Ibn Sahl ne propose pas seulement une explication du phénomène, mais il expose aussi la fabrication au moins théorique de ses instruments ardents.

En tant que théoricien des coniques, Ibn Sahl utilise ses connaissances pour calculer, dans différentes configurations, quelle forme donner aux instruments ardents. Ainsi, après avoir cherché mathématiquement comment devait être la forme de la surface d'un miroir ardent, il réalise le même travail dans le cas d'une lentille. Cela l'amène à étudier comment la lumière est réfractée au point C de l'interface cristal-air. A la base de toutes les constructions d'Ibn Sahl se trouve le schéma de la figure 5 :

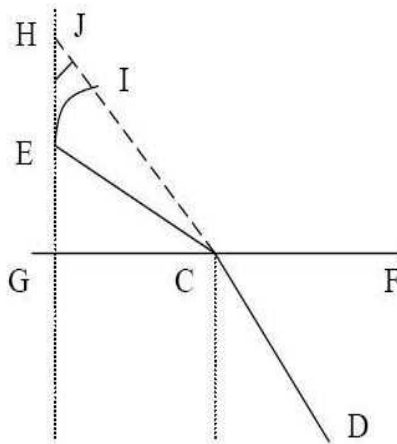


Fig 5 : schéma de Ibn Sahl (Rashed, 1993, fig. 11 p. 24)

Dans son étude de la réfraction de la lumière dans les lentilles, Ibn Sahl considère une surface plane GF séparant l'air et un morceau de cristal. Il considère la droite DC suivant laquelle se propage la lumière dans le cristal (rayon incident), le rayon CE dans l'air (rayon réfracté) et la

droite GE (la normale à la surface GF au point G), elle coupe la droite CD au point H et le rayon réfracté en E. il écrit :

Si l'embrassement a lieu par une lumière qui traverse un instrument, nous prenons délibérément une portion de cristal qui est limitée par une surface plane, soit C ; il faut qu'elle soit d'une grandeur qui correspond au besoin et que toute ses parties soient de pureté homogène. Déterminons deux droites telles que la lumière traverse le cristal suivant l'une d'elles, soit CE. Menons le plan CDE ; que l'intersection de ce plan et de la surface C soit la droite FCG ; les deux angles DCF et ECG sont aigus, le plus petit d'entre eux est l'angle ECG ; menons la droite CH sur le prolongement de la droite CD, supposons sur la droite CH le point H, et menons la droite GH perpendiculaire à la droite CG ; qu'elle rencontre la droite CE au point E. La droite CE est donc plus petite que CH (cité et traduit par Rashed, 1993, p.p. 23-24).

Ibn Sahl dégage que le rapport $CE / CH < 1$, rapport qu'il dit être constant. Si l'on appelle i l'angle d'incidence et r l'angle de réfraction, le rapport CE / CH est égal au rapport $\sin i / \sin r$, qui n'est rien d'autre que l'inverse de l'indice de réfraction du cristal par rapport à l'air en notations modernes : $CE/CH = 1/n$ ou bien $\sin r / \sin i = CH/CE = n$.

Dans ses écrits, Ibn Sahl n'érige nulle part ce fait au statut de *loi physique*. Il semble que ce rapport ne représente pour lui qu'un outil de calcul auquel il revient constamment. D'autre part, il n'écrit pas explicitement que ce rapport dépend des milieux considérés. Finalement, il privilégie un autre rapport dans ses constructions : il reporte la distance CE sur CH et appelle I le point correspondant. Puis, il considère le point J milieu de IH et forme le rapport CI/CJ , rapport qui n'a pas de signification physique immédiate. Muni de ce rapport constant et de la loi du retour inverse de la lumière, il montre que l'hyperbole est une courbe anaclastique⁸.

Selon Rashed (1993), le problème d'embrassement à une certaine distance par les rayons solaires ou par les rayons émis par une source située à une distance finie est à l'origine de ses recherches catoptriques et dioptriques et l'a conduit à entreprendre la recherche anaclastique.

Ibn Sahl procède alors par :

L'application à certains phénomènes lumineux de structures géométriques, notamment celles qu'offre la théorie des coniques, afin d'atteindre le but pratique préalablement

⁸ L'anaclastique est une surface qui permet de faire converger les rayons d'un faisceau parallèle en un seul point.

visé : l'embrasement. L'objet fabriqué – miroir ou lentille – doit donc épouser les structures géométriques que l'on applique (p. XLI).

En quelque sorte, il s'agit de la construction de modèles en utilisant un formalisme mathématique « pour répondre à une exigence pratique : embraser à partir d'une source éloignée ou proche » (Ibid, p. XLI). Rashed ajoute que « son unique dessein est d'embraser, son étude est purement géométrique. A aucun moment, en effet, l'expérimentation, naturellement présente, n'intervient cependant comme partie de la preuve » (Ibid, p. XLI). Son travail consiste donc uniquement « à la conception et à la fabrication du gabarit de la lentille » (Ibid., p. XLI).

Rashed (1993) indique que la recherche dioptrique réalisée par Ibn Sahl « s'ouvre sur l'étude de la réfraction, poursuit par la construction d'une lentille plan convexe, passe ensuite à la construction mécanique de l'hyperbole, pour s'achever sur l'étude de la propriété anaclastique de la courbe » (Ibid., p. XXXIV).

Il poursuit qu' « Ibn Sahl avait donc conçu ce domaine de recherche sur les instruments ardents, et, peut-on dire, la dioptrique de surcroît. Mais, obligé à penser d'autres coniques que la parabole et l'ellipse – l'hyperbole par exemple – comme courbe anaclastique » (Ibid., p. LXIX).

En conclusion, soulignons que dans sa recherche dioptrique, Ibn sahl poursuit deux enjeux. Le premier, d'ordre technique, consiste à répondre à une exigence pratique : la construction de gabarits de lentilles afin d'embraser un objet. Le second est d'ordre théorique : la recherche de la forme que doit épouser la surface de ces gabarits afin d'obtenir la convergence en un point de l'axe de la lentille de tous les rayons réfractés issus d'un faisceau parallèle à cet axe et traversant la surface, c'est-à-dire la recherche de l'anaclastique. Ses objets d'étude sont la lentille plan-convexe et la lentille biconvexe (figure 6). Notons également que la démarche d'Ibn Sahl s'inscrit dans un cadre purement géométrique d'un part et qu'il traite uniquement de ce qui touche à la propagation de la lumière, indépendamment des problèmes de la vision, d'autre part.

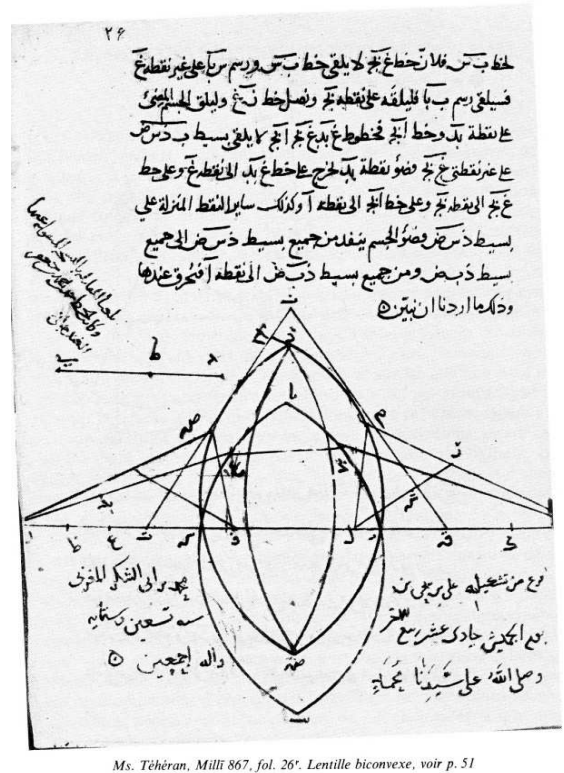
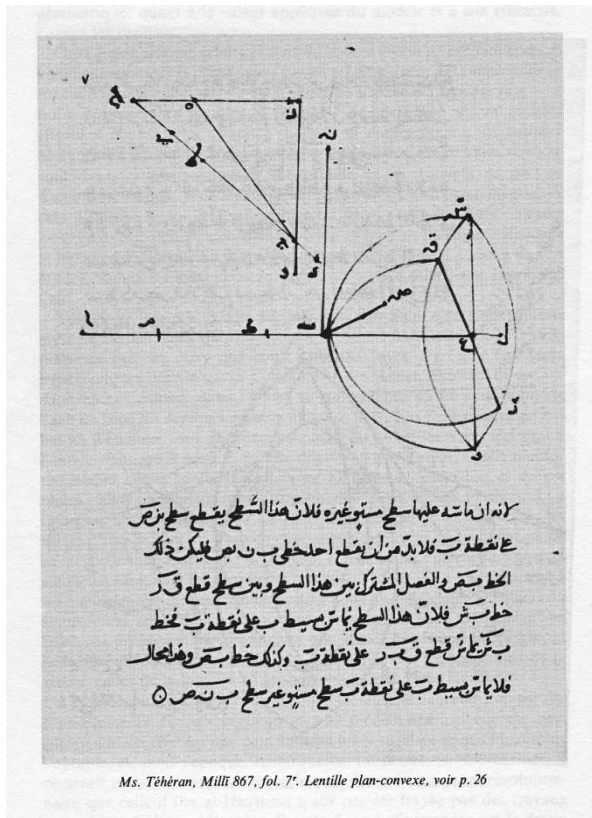


Fig.6 : Lentille plan convexe et lentille biconvexe conçues par Ibn Sahl,

(Rashed, 1993, p.p. XLIII, XLIV)

2.2.3. Ibn al-Haytham

Abu Ali al-Hassan Ibn al-Hassan Ibn al-Haytham est né en Irak dans l’actuel Bassora en 965. Il complète ses études à Bagdad sous le règne des Buwayhides. Il quitte son pays pour s'installer au Caire, où il passe l'essentiel de sa vie, jusqu'à sa mort en 1039 – 1040. On sait peu de choses sur lui, si ce n'est que son œuvre scientifique est immense, touchant aussi bien aux mathématiques qu'à l'astronomie. L'optique en est la partie la plus marquante. En Occident, il est connu sous le nom d'Alhazen.

Il s'est intéressé à la vision des objets, que ce soit en vision directe ou par réflexion, ou encore par réfraction. Il conçoit les images réfléchies et réfractées comme une altération de la vision directe. Il avance l'idée que la lumière possède une existence propre indépendante de la vision et que la vision d'un objet n'est possible que si l'œil reçoit de la lumière émise par l'objet.

Les travaux optiques d'Ibn Sahl récemment mis à jour, principalement son traité sur les instruments ardents, imposent de repenser la genèse des travaux d'Ibn al-Haytham non plus dans la seule filiation de l’optique de Ptolémée : ces derniers s’insèrent dans un contexte qui

n'est pas isolé de celui de son prédécesseur arabe. En effet, différentes sources⁹ indiquent qu'Ibn al-Haytham avait connaissance du traité d'Ibn Sahl. Ainsi, il « *a poursuivi la recherche sur les miroirs ardents et sur les instruments ardents et a laissé un traité sur la sphère ardente, suffisamment proche de la lentille biconvexe hyperbolique de son prédécesseur* » (Rashed, 1993, pp. LXX- LXXI).

Son étude des dioptries et des lentilles sphériques traite non seulement du problème d'embrasement par réfraction mais s'attache aussi à l'image d'un objet vu par réfraction, elle n'est donc pas séparée du problème de la vision.

Dans la partie consacrée à la lentille sphérique du septième livre de son optique, Al-Haytham porte un intérêt particulier à l'image qu'elle donne d'un objet. Son étude se limite à l'examen d'un seul cas, quand l'objet et l'œil sont sur le même diamètre de la sphère :

Il se peut cependant que certains visibles familiers soient vus à travers un corps transparent sphérique plus dense que l'air, et dont la convexité est du côté de l'œil, si le visible est derrière une sphère en cristal ou de verre ou de leurs homologues, et que le visible soit dans l'air et non pas à l'intérieur de la sphère. Les positions des visibles qui ont cette propriété sont nombreuses et de multiples sortes. Cependant ces visibles sont rarement perçus par l'œil, et, s'ils le sont, l'œil les examine rarement avec attention, et distingue peu les différences de leurs formes. C'est pourquoi il n'est pas heureux d'examiner toutes ces sortes ; aussi nous limitons- nous à une seule de leurs positions, position particulière dans laquelle l'œil et le visible sont sur une seule perpendiculaire à la surface du corps sphérique (cité et traduit par Rashed, 1993, p. 105).

D'autre part, dans son traité sur la sphère ardente, il étudie le phénomène de la réfraction d'un rayon lumineux qui émane du soleil et pénètre dans des corps transparents tels que le verre, le cristal, l'eau et leurs homologues. Il détermine géométriquement la position de l'image donnée par une lentille et du point d'embrasement donné par une sphère ardente et vérifie expérimentalement ses résultats. Il énonce les propriétés suivantes pour la réfraction:

[...] le rayon du soleil émane du soleil suivant une ligne droite, et pénètre dans tout corps transparent qui fait face au soleil. S'il pénètre dans un corps transparent et rencontre ensuite un autre corps transparent de transparence différente de celle du corps

⁹ R. Rashed. (1993, p.LXXIII)

dans lequel il se trouve, sans être cependant perpendiculaire à la surface du deuxième corps, il se réfracte et ne pénètre pas en ligne droite.

S'il est perpendiculaire à la surface du deuxième corps, il se propage et ne se réfracte pas. Si le deuxième corps est plus dense que le premier corps, la réfraction du rayon se fait en se rapprochant de la perpendiculaire à la surface du deuxième corps. Si le deuxième corps est plus subtil que le premier corps, la réfraction du rayon se fait en s'écartant de la perpendiculaire à la surface du deuxième corps ; nous avons montré cette notion dans le septième livre de notre ouvrage de l'optique, et nous avons indiqué la méthode pour l'examiner et l'expérimenter. Cette notion a été également montrée dans le cinquième livre de l'ouvrage de Ptolémée, de l'optique [...] nous disons : si une sphère en verre ou en cristal, ou leurs homologues, fait face au corps du soleil, alors le rayon du soleil se réfracte sur la circonférence d'un cercle sur la sphère vers un seul point. Donnons de cela une démonstration [...]

Le verre, le cristal, l'eau et leurs homologues, sont plus denses que l'air. Si le rayon du soleil se propage dans l'air et aboutit à un corps en verre, en cristal, en eau ou en un de leurs homologues, sans être perpendiculaire à sa surface, il se réfracte et ne se propage pas sur son prolongement, et sa réfraction se fera dans la direction de la perpendiculaire à la surface de ce corps ; il pénètre ensuite dans le deuxième corps, qui est le verre ou son homologue, sur le prolongement de la droite suivant laquelle il s'est réfracté ; s'il aboutit à l'autre bout de ce corps, et il s'il y a de l'air derrière celui-ci, alors il se réfracte également, et sa réfraction se fera dans la direction opposée à la normale à la surface de l'air qui entoure ce corps. Si le rayon se réfracte à partir de l'air dans le verre, l'angle de déviation sera inférieur à la moitié de l'angle entouré par le rayon et la perpendiculaire¹⁰, et supérieur à son quart [...]. A mesure que l'angle entouré par le rayon et la normale croît, l'angle de déviation croît, et le rapport de l'angle de déviation à l'angle entouré par le rayon et la normale avant la réfraction sera plus grand. Et si les angles des rayons et de la normale sont égaux, alors les angles de déviation sont égaux. (Ibid., pp.111-112).

En s'appuyant sur une analogie mécanique, Al-Haytham explique la réfraction de la lumière par la décomposition du mouvement en deux composantes : l'une parallèle, l'autre perpendiculaire à la surface réfringente. Il précise que la première composante se conserve

¹⁰ Il s'agit dans le langage moderne de l'angle d'incidence

tandis que la seconde se trouve « accélérée » ou « retardée » et il ramène cette variation de la composante perpendiculaire à la résistance qu'oppose le corps diaphane lorsqu'il est traversé par la lumière. Voici ce qu'il dit à propos de cette interprétation :

Les lumières qui se propagent à travers les corps transparents, se propagent par un mouvement très rapide, inappréciable à cause de sa rapidité. Pourtant leur mouvement dans les corps minces, c'est-à-dire dans ceux qui sont diaphanes est plus rapide que leur mouvement dans les corps plus épais, c'est-à-dire qui sont moins diaphanes. En fait tout corps diaphane, quand la lumière le traverse lui oppose une petite résistance qui dépend de sa structure, (rapporté par Ronchi, 1996, p. 44).

Al-Haytham explique l'embrasement par l'excès de la chaleur qui résulte de la concentration des rayons du soleil en un seul point lorsqu'ils traversent une lentille sphérique :

[...] Tout rayon parmi les rayons du soleil, s'il parvient en un point, y produit une chaleur ; si donc de nombreux rayons se réfractent vers un seul point, il parvient en ce point beaucoup de chaleur. Et si la chaleur augmente en un point quelconque et se multiplie, il s'y produit un embrasement, en raison de l'excès de chaleur (cité et traduit par Rashed, 1993, p.112).

Tout le long de son étude, Al-Haytham applique une démarche généralement mixte combinant la démonstration géométrique et l'expérimentation pour établir ses lois et ses relations. L'expérimentation constitue chez lui, non seulement une partie intégrante de la preuve en physique, mais aussi un moyen pour tester la validité d'une hypothèse. En comparant la démarche d'Ibn al-Haytham à celle d'Ibn Sahl, Rashed écrit :

Contrairement à Ibn Sahl, nous l'avons plus d'une fois relevé, Ibn al-Haytham était un expérimentateur. Bien plus, c'est le premier physicien que je connaisse pour lequel l'expérimentation ne se réduit à un élément d'une méthodologie empirique, mais fait partie intégrante et nécessaire de la preuve en physique, et intervient en personne pour donner à la connaissance optique sa valeur apodictique (Ibid, p. LXXIII).

Rashed ajoute un peu plus loin que pour Ibn al-Haytham « les lois de la réfraction élaborée doivent être contrôlables par les expériences ; elles doivent d'autre part expliquer tous les résultats des expériences ». (Ibid, p. LXXIII)

Dans son étude de la lentille sphérique, Ibn al-Haytham recourt à l'aberration sphérique d'un point à distance finie dans le cas du dioptré pour montrer géométriquement que l'image d'un segment obtenue par réfraction est observée sous la forme d'un anneau. Pour vérifier ce résultat, Ibn al-Haytham propose une expérience qu'il décrit ainsi :

Si donc l'expérimentateur veut expérimenter cette notion, qu'il considère une sphère de cristal ou de verre pur, et quelle soit d'une sphéricité aussi parfaite que possible. Soit une petite parcelle de cire ; qu'elle soit de la grandeur d'un pois chiche – en effet l'expérimentation sur un petit corps sera plus claire – qu'il la colorie en noir, car le noir <d'un corps> petit dans le milieu transparent est plus apparent ; qu'il malaxe la portion de cire pour qu'elle s'arrondisse et qu'elle ait la forme d'une sphère ; qu'il pique cette cire sur la pointe d'une aiguille, et qu'il pose la sphère transparente devant l'un de ses deux yeux ; qu'il ferme l'autre œil ; qu'il élève l'aiguille et la place derrière la sphère transparente, qu'il regarde le milieu de la sphère transparente et qu'il pose la parcelle de cire en face du milieu de la sphère jusqu'à ce que la parcelle de cire, l'œil et le centre de la sphère transparente soient sur une seule droite par rapport à la sensation ; qu'il regarde la surface de la sphère transparente, alors il voit dans sa surface du noir circulaire sous la forme d'un anneau. S'il ne le voit pas, qu'il avance ou recule la parcelle de cire jusqu'à ce qu'il voit ce noir circulaire. S'il voit ce noir circulaire, il abaisse la cire ; le noir circulaire alors disparaît. Si ensuite il ramène la cire à sa position, alors il voit le noir circulaire.

On montre donc par cette expérience que si le visible est derrière un corps sphérique transparent plus dense que l'air, et que l'œil, ce visible, et le centre du corps sphérique sont sur une même droite, alors l'œil perçoit ce visible sous la forme d'un anneau (cité et traduit par Rashed, 1993, p.110).

En conclusion, dans ses recherches dioptriques, Ibn al-Haytham poursuit deux enjeux, l'un est technique et consiste en la conception d'instruments pour réaliser l'embrassement par réfraction, l'autre est théorique et concerne l'étude de l'image donnée par une lentille sphérique. Dans ses travaux, il utilise différentes démarches : mathématique, expérimentale ou mixtes.

2.3. La dioptrique en Occident

2.3.1. Les lentilles : Antiquité – Moyen Âge

Depuis l'antiquité, les lentilles convexes étaient utilisées comme « verres ardents » pour produire le feu en focalisant les rayons solaires et pour observer les objets lointains. Ainsi, dans les *Nuées* d'Aristophane¹¹ figure le dialogue suivant (cité par Djebbar, 2001, p. 271) :

« *Tourneboule* : Tu as déjà vu, chez les droguistes, cette pierre, tu sais ?... la belle, la transparente... on allume le feu avec... ?

Socrate : Le cristal, tu veux dire ?

Tourneboule : C'est ça. Eh bien ! J'en prendrais une pendant que le greffier enregistrerait, je me tiendrais comme ça, à bonne distance, au soleil, et je ferais fondre le texte de son assignation¹². Qu'en penses-tu ? ».

Coleman (1986) dans « La soupe de lentilles » souligne l'apparition, il y a plus de deux mille ans d'une lentille primitive constituée « d'une bouteille sphérique en verre, remplie d'eau, qui était utilisée pour allumer le feu et que l'on appelait « verre ardent » ». (p. 248)

Les écrits de Pline l'ancien [23-79] indiquent également qu'un tel instrument était connu des romains et probablement utilisé pour corriger la vue.

Rashed (1993, p. 234) rapporte que Tāqī ad- dīne Ibn Ma'rūf, dans son livre d'optique achevé en 1574, évoque les lentilles et ramène leur usage à la période antique :

À partir de cela, nous sommes parvenus à fabriquer une lentille – ballūra- par laquelle nous voyons les choses qui sont cachées en raison de la distance comme les lunules les plus fines et les voiles des bateaux qui se trouvent à des distances excessives et que la vue ne peut saisir, avec les yeux les plus perçants ; ainsi la lentille qui a été fabriquée par les philosophes grecs qui l'ont placée dans le phare d'Alexandrie.

¹¹ Aristophane [450-386 av. J.C] est un auteur comique grec

¹² Le commentateur rappelle en note que telle assignation était gravée au stylet sur des tablettes en cire, lesquelles fondaient sous l'action de la chaleur.

Aucune source digne de foi n'indique que ces morceaux de verres (ou cristal de roche) épais étaient soumis à une étude scientifique. Ils sont restés des curiosités et des objets à usage utilitaires tout au long de la période antique grecque et romaine.

Ce n'est qu'au X^e et XI^e siècles, pendant la civilisation musulmane, que des études approfondies de la réfraction de la lumière qui pénètrent ces instruments commencent à voir le jour. La première dans l'histoire est faite par Ibn Sahl sur les lentilles planes convexes et les lentilles biconvexes ; d'autres ont suivi parmi lesquelles, celle faite par Ibn al- Haytham sur les lentilles sphériques et les sphères ardentes. En fait, cette activité scientifique qui s'opère sur les lentilles à cette époque n'est pas isolée. En effet, un artisanat florissant et de qualité d'un cristal de roche al- ballūr s'exerçait à Basra. Rashed (1993, pp. 233-234) rapporte les propos d'al- Bîrûnî successeur d'Ibn Sahl et contemporain d'Ibn al- Haytham et d'al- Tîfāshî, concernant les emplois et les propriétés de cette roche en cristal :

Selon lui, il s'agit d'al-mahā (ou al-mihā), c'est à dire d'une substance composée, comme l'indique le mot arabe lui-même, de deux éléments de la vie : l'eau mā' et l'air Hawā', comme ses deux éléments, cette substance est transparente et incolore. Al- Bîrûnî cite des poètes de l'époque al- Buhturî, al-Sāhib ibn Abbād...qui chantaient la pureté du cristal de roche et sa transparence. Al- Bîrûnî, souligne qu'à l'époque, il y avait un artisanat florissant et de qualité de ce cristal à Basra. Le fait est important pour nos deux auteurs, Ibn Sahl et Ibn al-Haytham qui à un moment ou un autre, ont évolué à Basra ou à Bagdad.

Il ajoute juste après que :

Le minéralogiste al- Tîfāshî [1184-1253] souligne parmi les propriétés de ce cristal, son utilité : « on reçoit grâce à lui [les rayons du] soleil, on regarde ensuite la position des rayons qui émanent de la pierre et qui seront reçus par un morceau de tissu noir, alors il s'embrase » (Ibid, pp. 233-234).

L'anglais Robert Grosseteste [1168 ?- 1253] fut, parmi les savants du Moyen-Age celui qui peut être considéré comme le fondateur de l'optique en occident. Il s'appuie sur le traité d'Ibn al-Haytham, étudie en particulier les « *lentilles de verres* » qui font leur apparition au XI^e siècle dans l'anonymat, et découvre qu'elles n'ont pas seulement la propriété de pouvoir mettre le feu, mais aussi, qu'elles ont un pouvoir grossissant. Il note : « *si nous comprenons bien cette partie de l'optique, nous pourrions faire apparaître comme toutes proches des choses...très lointaines.*

Des objets gros et proches pourront paraître très petits et nous pourrions lire incroyablement loin les lettres les plus petites » (cité dans Maitte, 1981, p. 31). Il réalise une étude expérimentale de la réfraction de la lumière à travers un récipient sphérique rempli d'eau (*De natura locorum*) et énonce une règle imparfaite indiquant que l'angle de réfraction est égal à la moitié de l'angle d'incidence.

Roger Bacon [1214- 1294], disciple de Robert Grosseteste, est un théologien qui rejoint l'ordre des Franciscains en 1257. Il est considéré parmi les premiers qui utilisent la méthode scientifique, une méthode qui repose principalement sur l'expérience. Voilà comment il décrit une observation du ciel à l'aide d'une lentille en « s'extasiant » devant « ... *les merveilles de la vision réfractée ... ainsi à une distance incroyable...une armée modeste nous semblera...très près de nous... nous pourrions également obtenir que le soleil, la lune et les étoiles semblent se rapprocher et descendre vers nous...* » (cité dans Maitte, 1981, pp. 31-32). Il s'intéresse à l'étude des propriétés des lentilles, à la réfraction et aux couleurs de l'arc en ciel.

Selon Ronchi (1996), les lentilles de verres furent appliquées pour la première fois, en Occident, à la correction de la vue vers 1285. On ne connaît pas de trace d'un inventeur particulier, tout suggère que les lunettes font leur apparition dans le milieu artisanal et hors de la communauté « savante ». Vasco Ronchi souligne que la découverte des lunettes a sans doute été faite par hasard par un vieux verrier qui confectionnait des disques de verre en forme de lentilles pour garnir les fenêtres des maisons des seigneurs de l'époque. En manipulant ces verres, ce maître verrier aurait pu remarquer que les objets proches se voyaient aussi nets et distincts qu'au temps de sa jeunesse, et ainsi probablement aurait-il inventé les lunettes.

Par ailleurs, Ronchi affirme que cette invention a été repoussée par les savants de l'époque : mathématiciens et philosophes l'examinèrent avec une grande hostilité. En réalité, en l'absence de connaissances sur la structure de l'œil et du fonctionnement de ses diverses parties d'une part, et en l'absence de travaux sur le comportement des surfaces courbes réfractantes en Occident à cette époque d'autre part, il était impossible d'expliquer pourquoi une lentille de verre à faces bombées, placée devant un œil presbyte, lui permettrait de mieux voir de près. Il semble alors que la pensée philosophique dominante admette que la meilleure manière de connaître « la vérité » est de n'altérer en rien la rectilinéarité des rayons ou la « course régulière des espèces ». Les lentilles de verres représentent des instruments « fallacieux » interposés entre l'objet et l'œil et sont susceptibles de tromper la vue. Les figures apparaissent souvent

plus grandes ou plus petites que les objets réels, plus proches ou plus éloignées, parfois renversées, déformées, dédoublées ou irisées. Pour eux, tout est tromperie et « illusion ».

Jusqu'à la fin du XVI^e siècle, les discussions sur le mécanisme de la vision qui ont animé l'antiquité persistent. Certains l'expliquent encore par l'introcession dans l'œil d'écorces venant de l'objet, d'autres soutiennent que quelque chose qui sort de l'œil et constitue un véritable *prolongement de l'âme* se dirige vers l'objet.

Ce n'est qu'en 1572 que l'œuvre d'Al-Haytham est réellement diffusée et rendue accessible à la civilisation occidentale.

2.3.2. Les lentilles : la période classique

2.3.2.1. Della Porta [1535-1615]

Della Porta est né vers 1535. Sa famille, noble et fortunée, s'est fixée à Naples. Il y meurt le 4 février 1615. Il travaille à Murano près de Venise où se trouvent déjà de célèbres cristalleries. Il publie en 1558, son premier ouvrage, la *Magia Naturalis*.

Della Porta est un propagandiste de la « magie naturelle », il se passionne pour tout ce qui a un caractère secret, caché ou mystérieux. Il s'intéresse à toutes les techniques de son temps: l'optique, la météorologie. Son optique s'apparente à une optique d'agrément dans la mesure où son but principal est de distraire, d'amuser, d'étonner. Certains des objets et des instruments que Della Porta manipule utilisent des phénomènes optiques dont les effets divers sont liés aux lentilles. Della Porta cite l'expérience de « la chambre obscure » à l'orifice de laquelle il ajoute une lentille. Il compare ce dispositif à l'œil et explique ainsi le mécanisme de la vision :

Maintenant je rapporterai une chose que j'ai tenu secrète et que j'ai voulu taire. Si tu appliquais une lentille de verre devant l'ouverture, tu verrais toutes les choses plus claires, les visages des gens qui marchent, les couleurs, les vêtements, les actes et toutes les choses et si tu les observais attentivement, tu en aurais tellement de plaisir que celui qui les a vus n'en a jamais assez de les revoir. Cette expérience montre aux philosophes et aux opticiens en quel endroit se fait la vision; et ainsi est résolue la question, discutée depuis longtemps, de l'introduction des figures dans l'œil (cité dans Ronchi, 1996, p.58).

Della Porta évoque les effets divers des lentilles convexes et concaves et la possibilité de les multiplier par association : « *si tu sais comment multiplier ces lentilles, j'affirme sans crainte*

que tu pourras lire les plus petits caractères d'écriture à une distance de plus de cent pas » (cité dans Hamou 1999, p.90). Il note aussi que :

Les lentilles concaves font voir très clairement les choses lointaines, les lentilles convexes les choses voisines; donc on peut en user pour la commodité de la vision. Avec les lentilles concaves, tu vois les choses lointaines petites mais claires; avec les lentilles convexes les choses voisines plus grandes mais peu nettes; si tu sais assembler avec justesse les unes et les autres, tu verras, agrandies et claires, les choses proches et lointaines [...].J'ai rendu par là de grands services à des amis dont la vue était mauvaise, et je les ai mis en état de voir très nettement (cité dans Ronchi, 1996, p.64).

Selon certains, ce texte contient le principe de la fabrication de la lunette à oculaire divergent. Nous remarquons que cette description reste très qualitative et qu'il n'y a pas d'information sur la distance qui sépare les deux types de lentilles. En conséquence, ce texte examiné dans son contexte décrit une « recette » pour la correction des défauts visuels par la juxtaposition des deux lentilles. Une recette sur laquelle s'accordent Danjon et Couder (1983), Poggendorff (1983), Ronchi (1996). Nous sommes de l'avis de Bracco (2004, p. 24) :

Il n'y a aucune indication sur la réalisation d'un quelconque instrument nouveau. Mais pour qui tente l'expérimentation, il n'y a qu'un pas entre accoler deux lentilles et faire varier continuellement leur séparation jusqu'à découvrir la propriété nouvelle d'une telle association.

Della Porta accuse les milieux scientifiques de l'incapacité d'expliquer les effets et les fonctionnements des lentilles et de ne pas les avoir recherchés ou énumérés. Dans le *De refractione* (1593), il tente lui-même de répondre scientifiquement à cette accusation en élaborant une théorie des lentilles concaves et convexes. Il étudie :

à fond la réfraction de la lumière soit à travers une sphère de verre (l'habituelle « pile cristalline »), soit à travers une sphère de verre (qu'il appelle « convexa sphaeralis superficies »), soit en fin à travers ce qui reste d'une lame à faces planes et parallèles, une fois enlevée une demi-sphère de verre : c'est-à-dire une lentille plan concave de très grande ouverture qu'il appelle « concava sphaeralis superficies » indique Ronchi (1996, p. 66).

Dans cet ouvrage, Della Porta tenta d'expliquer des expériences nouvelles et des instruments nouveaux par application des principes de l'optique d'alors. Cette tentative a prouvé que les

conceptions véhiculées étaient insuffisantes et inadaptées pour donner une interprétation cohérente des phénomènes observés.

En conclusion, Della Porta cherche à trouver, grâce aux lentilles, des effets susceptibles de surprendre et d'émerveiller, et notamment à accroître et à modifier les apparences dans des proportions considérables. Il poursuit alors un enjeu subordonné à un projet de « magie naturelle ». A cause de l'ostracisme du monde savant vis à vis des lentilles, il était impossible de concevoir leur fonctionnement. Della Porta tente de répondre scientifiquement à cette question en élaborant une théorie des lentilles et en étudiant le phénomène de la réfraction : son enjeu est alors théorique. En cherchant à produire des effets nouveaux et merveilleux par l'usage de lentilles ou en essayant de les théoriser, Della Porta applique tout au long de ses travaux une démarche expérimentale qualitative par essais et erreurs.

2.3.2.2. Galilée : la lunette astronomique

Galiléo Galilei [1564 - 1642] est un astronome et physicien de Florence. Outre les mathématiques, il enseignait la mécanique et l'astronomie. Son enseignement astronomique consistait à exposer le point de vue traditionnel qui s'appuyait sur la cosmologie d'Aristote, perfectionnée par Ptolémée et introduite en Occident par le biais de la civilisation musulmane.

L'univers hérité des astronomes grecs trouve dans le géocentrisme l'un de ses fondements : la sphère céleste limitée par le firmament solide portant des étoiles fixes et tournant autour de la Terre immobile. Le soleil et les autres planètes tournent autour du même centre. On y distingue la sphère des étoiles appelée aussi monde supra-lunaire qui est incorruptible et un monde sublunaire corruptible qui contient la Terre. Ce modèle fut aménagé pour satisfaire aux exigences des théologiens. Le chrétien trouve sa place au centre de cette construction.

Un nouveau système du monde existait depuis 1543. Les hypothèses en furent posées par le chanoine polonais Nicolas Copernic [1473- 1543]. Celui-ci stipule que « la Terre n'est pas le centre de l'univers ; que toutes les sphères tournent autour du soleil, centre de l'univers ; que tout mouvement céleste est produit par le mouvement de la terre et non par celui du firmament ; que la terre effectue une rotation complète autour de ses pôles en un jour et une révolution complète autour du soleil dans le plan de l'écliptique en une année ». Il s'agit du modèle héliocentrique. Comme Aristote, Copernic conserve la conception d'un univers fini.

Hamou (1999) signale que dès 1597, Galilée exprime dans une lettre adressée à Kepler sa préférence pour la théorie copernicienne, ce qui ne l'empêche pas de continuer de présenter

l'astronomie selon le système d'Aristote et de Ptolémée. De son côté Luminet (2007, p. 24) écrit qu'étant « *influencé sans vouloir l'admettre par le secret du monde de Kepler, Galilée se révèle très vite un fervent partisan du système héliocentrique proposé par Copernic, selon lequel la terre, une planète parmi les autres, tourne autour du soleil et non l'inverse. Mais comment le prouver ?* ». À cause de l'absence de preuves tangibles et en dépit des insistances de Kepler, il ne se déclare pas publiquement pour le nouveau système du monde.

Un autre événement se charge de provoquer Galilée : l'apparition en 1604 d'une étoile nouvelle dans la sphère des étoiles fixes, c'est-à-dire dans le monde supra-lunaire constitué, selon la cosmologie aristotélicienne, d'une essence inaltérable ce qui contredit le système géocentrique.

En 1609, Galilée entend parler d'une invention étonnante venant de Hollande, celle de la lunette astronomique. En regardant à travers deux lentilles de verres, placées à une certaine distance l'une de l'autre, il est possible d'obtenir une image très agrandie d'un objet lointain. Comme il pense que la lunette est le meilleur moyen pour observer le ciel afin de justifier la théorie héliocentrique de Copernic, il cherche à s'en fabriquer une. Celle qu'il réalise est connue depuis sous le nom de lunette de Galilée.

Hamou (1999) souligne l'accueil réservé par les péripatéticiens au *Sidereus Nuncius* (Le messager céleste), ouvrage paru en 1610 et dans lequel Galilée relate toutes les observations et découvertes astronomiques réalisées à l'aide de la lunette astronomique. Il écrit : « *À sa parution, l'ouvrage fut accueilli par ses adversaires mêmes comme une attaque frontale contre la doctrine aristotélicienne du ciel plutôt que comme une défense ouverte de Copernic* ». (p.41)

Dans la page une du « messager céleste » est écrit un paragraphe qui récapitule son contenu :

Le messager céleste révélant des spectacles grandioses et absolument admirables, et proposant à chacun, mais surtout aux philosophes et aux astronomes, de contempler ce que Galiléo Galilei, gentilhomme de Florence et professeur de mathématique à l'université de Padoue, a observé au moyen d'une lunette qu'il venait d'inventer, sur la face de la lune, les innombrables étoiles fixes, la voie lactée, les nébuleuses, mais avant tout les quatre planètes qui tournent autour de Jupiter à des intervalles et avec des périodes différentes, et à une admirable vitesse ; ces planètes que nul n'avait connues jusqu'à ce jour, l'auteur a été le premier à les découvrir tout récemment, et il a décidé de les nommer astres Médicéens (Hamou, 1999, p.32).

Nous reproduisons quelques passages du *Sidereus Nuncius* de tonalité « copernicienne » extraits de Hamou (1999) :

1/ La terre est un astre errant et a comme la lune et les planètes une lumière empruntée :

Nous serons plus prolixes dans notre Système du monde où le très fort réfléchissement de la lumière solaire par la terre est abondamment montré, à la fois par des raisonnements et par des preuves expérimentales, à ceux qui soutiennent que cette Terre doit être écartée du chœur des astres, en se fondant principalement sur l'argument qu'elle serait privée de mouvement et de lumière ; car nous démontrons qu'elle est un astre errant et qu'elle surpasse la lune en clarté, qu'elle n'est pas la sentine de l'ordure et des déchets du monde, et nous le confirmerons par six cents raisons naturelles (p.36).

2/ Comparant le mouvement des satellites de Jupiter à celui de Vénus et de Mercure autour du soleil, Galilée est amené à la conclusion de l'existence de plusieurs centres dans l'univers :

Nous avons un argument exceptionnel et lumineux pour enlever leurs scrupules à ceux qui, tout en admettant tranquillement la révolution des planètes autour du soleil dans le système copernicien, sont à ce point troublés par la circulation de la seule lune autour de la Terre, cependant que les deux < corps > accomplissent un circuit annuel autour du soleil qu'ils jugent que cette constitution d'univers doit être rejetée comme impossible (p. 37-38).

3/ La lunette offre en quelque sorte « une expérience cruciale » sur la nature de la voie lactée permettant de trancher entre deux théories contradictoires :

Ce qui a été observé par nous en troisième lieu est la substance ou matière de la voie Lactée elle-même qu'il a été possible d'examiner grâce à la lunette jusqu'à en juger d'après le témoignage des sens, de sorte qu'à la fois toutes les querelles qui ont torturé les philosophes durant tant de siècles sont tranchées par la certitude oculaire, et nous nous sommes libérés des discussions verbeuses (p.56).

Galilée cherche donc grâce à la lunette à répondre à un enjeu d'ordre épistémologique : montrer que le système géocentrique est insuffisant pour modéliser l'univers céleste et justifier la théorie héliocentrique de Copernic. Ainsi, Hamou (1999, p. 99) ramène l'enthousiasme de Galilée pour la construction de la lunette au besoin de fonder l'astronomie copernicienne :

La hâte, l'enthousiasme avec lesquels il entreprend toute affaire cessante la construction de sa lunette témoigne peut être qu'il pressentait dès l'origine qu'un instrument permettant de voir mieux dans les lointains était précisément ce qui manquait à une astronomie copernicienne encore spéculative et dont le défaut de base observationnelle altérerait le pouvoir de conviction.

Rosmorduc (1987, p. 46) souligne que la lunette est construite pour répondre à un enjeu théorique, les recherches astronomiques :

Aussitôt, son génie [Galilée] lui fait entrevoir, dans des objets de curiosité d'admirables instruments de découvertes. Sans perdre un instant, il en construit successivement plusieurs qui grossissent respectivement de 3 à 30 fois, quelques mois encore et l'astronomie physique est constituée.

De son côté, Kepler écrit des propos analogues dans sa « *Dioptrice* »: « *Galilée aurait célébré le plus beau triomphe en rendant manifeste l'usage de l'instrument pour l'investigation des secrets de l'astronomie* ».

En fabriquant sa lunette batave, Galilée cherche à montrer les limites du système géocentrique et à fonder le système héliocentrique, il poursuit donc un enjeu épistémologique mais il cherche aussi à explorer l'univers céleste et à faire progresser l'astronomie, répondant ainsi à un enjeu théorique. Nous remarquons ainsi l'existence de plusieurs types d'enjeux « emboîtés », en particulier, l'enjeu technique poursuivi par Galilée qui touche la construction de la lunette.

Mais quelle est la démarche suivie par Galilée pour mener à bien sa magnifique construction ? Il prétend avoir découvert la lunette en recourant à un raisonnement théorique. Voici comment il décrit son travail :

Quelle est ma part dans la découverte de cet instrument, et si je pouvais raisonnablement l'appeler mon enfant, je l'ai depuis longtemps raconté dans mon Sidereus Nuncius. J'y disais comment à Venise, où je me trouvais alors, me parvint la nouvelle qu'un Hollandais avait présenté au comte Maurizio une lunette qui faisait voir les choses éloignées aussi parfaitement que si elles étaient très proches. [...] Avec ce simple renseignement, je retournai à Padoue, où je demeurais alors, et je me mis à réfléchir à ce problème. Voici quel fut mon raisonnement. Cet instrument comporte un seul verre ou plusieurs. Ce ne peut être un seul verre car sa forme est soit convexe, c'est-à-dire plus épaisse au milieu qu'aux bords, soit concave, c'est-à-dire plus mince au milieu, soit

compris entre deux surfaces parallèles. Or cette dernière n'altère en rien les objets visibles en les agrandissant ou en les diminuant ; la forme concave les diminue; la convexe les agrandit bien, mais les présente très indistincts et troubles; donc un seul verre ne suffit pas pour que l'effet se produise. Passant alors à deux et sachant que le verre à faces parallèles ne change rien, comme je l'ai dit, j'en conclus que le phénomène ne pouvait résulter de l'emballage de ce verre avec l'un des deux autres. Cela m'oblige à expérimenter ce que donnerait l'assemblage des deux autres, c'est-à-dire le convexe et le concave.

Je garnis les extrémités d'un tuyau de deux verres, l'un convexe, l'autre concave; et le tournant vers les objets, je remarquai, qu'il les augmentait trois fois en diamètre. Je fis peu après un autre télescope, qui augmentait environ huit fois; en fin n'épargnant ni peine ni dépense, j'en procurai un qui grossissait environ trente fois en diamètre et ce fut par le moyen de ce dernier que je découvris les satellites de Jupiter, les taches solaires, les taches de Venus. Telles furent les étapes de ma découverte. » (Hamou, 1999, pp. 95-97)

La lecture de ce texte ne montre pas que Galilée disposait d'une théorie scientifique élaborée sur laquelle il se serait appuyé pour expliquer les réfractions causées par les lentilles. Galilée se présente comme supérieur aux artisans verriers qui ont confectionné leurs instruments en procédant par le hasard et le tâtonnement. Il est fort probable qu'il possède un savoir empirique qui égale ou dépasse celui des habiles artisans, ce qui suppose une connaissance sur les techniques de tailles, sur la nature des verres utilisés, sur la longueur de l'instrument (en langage moderne, la distance focale). Nous partageons l'avis de Hamou (1999, p. 97) que Galilée possède « *un savoir empirique élémentaire sur les propriétés des lentilles, nullement susceptible de traitement mathématique ou quantifié* ». Il ajoute :

Il est fort possible que Galilée soit parvenu à la formulation des règles empiriques mettant en relation la magnification, la force des lentilles (leur rayon de courbure ou le type de forme utilisé pour la taille) et la longueur de l'instrument. Le fait que la construction d'un bon télescope exigeait la production d'un grand nombre de lentilles dont la plupart étaient imparfaites laisse supposer que Galilée disposait d'un échantillon suffisant d'objectifs pour dresser les tables de comparaison nécessaire à l'établissement de telles règles. Tout ceci indique que Galilée était certainement en possession en 1609-1610 d'un savoir empirique sur les lentilles au moins égal ou supérieur à celui des

meilleurs artisans de son temps- en revanche aucune source textuelle ne laisse penser que ce savoir avait des prémisses théoriques satisfaisantes, du genre de celles qu'on pouvait trouver alors dans les « Paralipomènes à Vitellion » de Kepler. (Ibid, pp.97-98)

De son côté Rosmorduc (1987) rapporte une lettre adressée par Galilée à P. Dini dans laquelle il indique avoir réalisé « *des centaines et des milliers d'expériences, sur des milliers d'objets proches et lointains, grands et petits, brillants et obscurs...* » (p.48).

Nous penchons du côté de l'idée que la démarche suivie par Galilée pour confectionner sa lunette batave n'est pas théorique mais plutôt expérimentale et qualitative. Tout au long de ses recherches, il procède par essais et erreurs.

2.3.2.3. Johannes Kepler [1571- 1630]

Kepler, astronome allemand, a cherché à défendre l'hypothèse héliocentrique. A propos du système solaire de Copernic, il écrit :

Je sais certainement que j'ai senti sa véracité au plus profond de mon âme, et depuis que je contemple sa beauté avec un incroyable délice, qui me transporte, je me dois de prendre sa défense publiquement, envers mes lecteurs, avec toute la force dont je dispose. (cité par Cohen1960, p.132).

Il énonce plusieurs lois sur les mouvements des planètes. Il est aussi connu pour son travail en optique. En 1604, il publie l'*Astronomiae Pars Optica* ou *Paralipomènes à Vitellion* dans lequel il cherche à comprendre et à améliorer les méthodes d'observations astronomiques en particulier celle des éclipses. Chevalley (1980, p. 21) précise que l'optique de Kepler s'enracine dans « *la nécessité de perfectionner une technique astronomique* », en particulier pour comprendre une contradiction dans les observations : celle de la diminution du diamètre de la lune en conjonction par rapport à son diamètre en opposition. Chevalley précise que cette contradiction devient « insupportable » et nécessite l'élaboration « *d'une théorie exacte des éclipses pour l'astronomie de cette époque* ». (1980, p.21)

Pour Kepler, les éclipses sont l'objet de la « *partie noble et la plus ancienne de l'astronomie* », qui « *prouvent l'existence de Dieu et son amour pour les hommes, puisqu'elles sont les signes placés là dans le théâtre du monde tout exprès pour que les hommes soient incités à contempler l'œuvre divine et s'efforcer de la comprendre* » (Ibid, p.21). Chevalley ajoute que

cette théorie à une « importance à la fois technique, théorique et théologique ». Dans cette partie, « optique de l'astronomie », il est aussi question de la réfraction et de la vision :

On considère dans l'astronomie optique soit les objets mêmes qui se présentent à la vue, et dont on examine les espèces, c'est-à-dire la lumière et l'ombre, soit le milieu que traverse la lumière partant de ses espèces et qui est cause qu'elle nous parvient réfractée, soit enfin l'instrument de la vision, l'œil (cité par Chevalley, 1980, p.25).

L'étude des réfractions répond donc pour Kepler à un besoin astronomique, il écrit :

S'il importait à la certitude de l'astronomie que soient déterminés les angles selon lesquels les rayons des étoiles sont déviés du chemin rectiligne par réfraction, il importe aussi maintenant à sa beauté que l'on connaisse les causes de cet accroissement des angles (cité par Chevalley, 1980, p.201).

En examinant les tables donnant les angles d'incidence et de réfraction connues à l'époque¹³ et en réalisant des expériences, Kepler parvient :

À une formule donnant une valeur générale de la réfraction grâce à sa décomposition en deux parties consécutives, dont l'une est proportionnelle aux incidences [$i/r = \text{constante}$ pour des angles inférieurs à 30°] tandis que l'autre croît avec la sécante de l'angle de réfraction¹⁴ (Ibid, p.439).

Kepler expérimente avec des lentilles sphériques en verre ou des sphères remplies d'eau. Il détermine ainsi le lieu de convergence des rayons parallèles à l'axe de la sphère. Il propose les premières lois géométriques pour les lentilles concaves et convexes. Voici ce qu'il dit à propos des propriétés des lentilles convexes (figure 7) :

Si un point envoie des rayons parallèles sur une lentille convexe dont la portion de convexité est inférieure à 30° placée perpendiculairement à l'objet, et s'il n'arrive rien d'autre par ailleurs aux rayons, un seul rayon ne subira de réfraction, celui qui passe par le centre de la sphère et est perpendiculaire à la surface, les autres seront réfractés et

¹³ Ptolémée a établi les premiers tableaux de mesure connus pour la réfraction; Ceux-ci ont servi de base aux travaux d'optique réalisés par Ibn al-Haytham aux environs de l'an mil, Vitellion vers 1270, et Kepler.

¹⁴ $\sec(x) = 1/\cos(x)$

concourent sur la perpendiculaire à une distance d'environ un diamètre et demi de la sphère [...] (Hamou, 1999, p. 210).

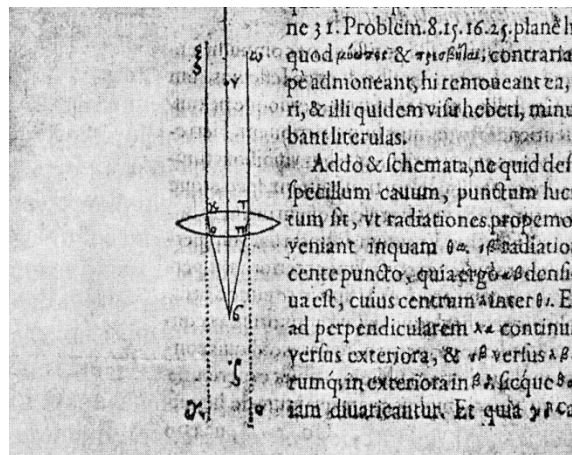


Fig.7 – Explication de l’effet d’une lentille biconvexe : page 202 des *Præcipua* : (Ronchi, 1996, p. 81)

Partant des travaux de Della Porta sur la chambre noire, il réalise des expériences sur « la balle » ou sur des sphères remplies d'eau et ce, en les plaçant au devant ou en arrière de l’orifice de la chambre noire. Le modèle de la chambre noire conduit Kepler à interpréter l’œil comme un système optique en faisant la correspondance entre la pupille et le diaphragme, le cristallin et le dioptré et enfin la rétine et l’écran sur lequel se forme l’image. (figure 8) Ce résultat lui permet de comprendre le mécanisme de la « vision proche » et de « la vision lointaine » et d’expliquer ainsi les rôles des verres correcteurs chez les myopes et les presbytes.

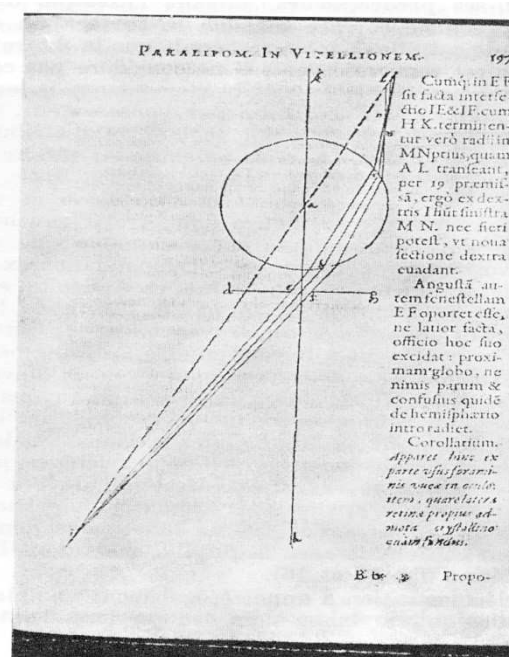


FIG. 16. — Démonstration de l’utilité de la pupille de l’œil (page 197 des *Paralipomena*).

Fig.8 – (Ronchi, 1996, p.80)

Suite à l'invention de la lunette de Galilée, Kepler publie un deuxième ouvrage en 1611, *La Dioptrice*. Il y propose la théorie de la lunette astronomique de Galilée afin de le soutenir contre les aristotéliens et les théologiens de l'église. Ceux-ci refusent en effet d'accepter le témoignage d'un instrument, fruit du « hasard » et de la « fortune », dont l'invention n'est fondée sur aucune théorie, et qui produit des artefacts et des illusions optiques. A ce propos Hamou (1999, p. 174) écrit :

Au sujet du télescope et des révélations télescopiques, la volonté de rétablir l'ordre véritable des préséances conduisit des auteurs comme Kepler et Descartes à s'engager dans une tâche que Galilée avait négligée ou refusé d'entreprendre. Il s'agissait de montrer que les découvertes s'intégraient à l'ordre a priori de l'architecture cosmique. Il s'agissait d'offrir, contre l'optique de fortune, une véritable explication de l'instrument prenant en compte le modus visionis et la théorie de la réfraction. Il s'agissait enfin d'opposer au conformisme épistémologique de Galilée, une réflexion renouvelée sur les rapports de la théorie et de l'expérience, une réforme méthodologique profonde, ou la bonne méthode scientifique se définit précisément comme la restitution de l'ordre naturel de l'invention.

Kepler se sert des lois qu'il a établies sur les lentilles pour expliquer le fonctionnement de la lunette de Galilée. Il en invente une autre qui porte depuis son nom¹⁵. Voici ce qu'il dit de l'approche qu'il a suivie :

Le télescope¹⁶ s'est ajouté ces dernières années à la grande masse des inventions du siècle, mais on ne doit pas le compter au rang des instruments ordinaires. A son sujet, certains se sont disputés le mérite de la première invention, d'autres se manifestèrent plutôt pour revendiquer son perfectionnement, pour autant que du côté de l'invention le hasard règne mais du côté du perfectionnement c'est la raison qui domine [...]. Moi-même j'ai, porté par une ambition honorable, ouvert un nouveau champ aux mathématiciens pour l'exercice de leur intelligence, en démontrant par des lois géométriques les causes sur lesquelles reposent ces effets si ardemment désirés, si nombreux et d'une merveilleuse variété [...] (Kepler, cité par Hamou, 1999, p.195).

¹⁵La lunette de Galilée est constituée d'une lentille concave et d'une lentille convexe. La lunette de Kepler comporte deux lentilles convexes.

¹⁶ Il s'agit ici de la lunette de Galilée. De nos jours, seuls les instruments permettant de voir loin dont l'objectif est un miroir sont appelés télescopes. Au XVII^e siècle, tous les instruments permettant de voir loin sont appelés télescopes, terme issu du grec : scope- regarder- et telos - loin.

En conclusion, dans son étude sur les réfractions, Kepler poursuit plusieurs enjeux. L'un est d'ordre technique, le perfectionnement des méthodes d'observations astronomiques, un autre d'ordre épistémologique, la défense de l'hypothèse héliocentrique et de la justesse des observations faites avec l'instrument d'observation de Galilée, un autre encore d'ordre théorique, l'élaboration d'une théorie de la lunette astronomique, et enfin un dernier d'ordre théologique, apporter la preuve de l'existence de Dieu et la compréhension de son œuvre. Pour ce faire, il applique différentes démarches : expérimentale, géométrique ou mixte.

2.3.2.4. Willebrord Snell Van Royen ou Snellius (1580-1626)

Snellius, hollandais, étudie le droit puis les mathématiques et l'astronomie. Il fut professeur de mathématiques à l'université de Leyde. Il est connu pour avoir établi en 1621 la loi de la réfraction mais il meurt sans avoir publié son travail¹⁷. Il cherchait à expliquer la vision d'un objet placé au fond d'un vase rempli d'eau.

La façon dont Snellius a établi la loi reste obscure. Pour certains, il aurait fait des expériences et des mesures. Pour d'autres, comme Leibniz (1686), il l'aurait trouvée à partir d'un raisonnement disant que la lumière prend le trajet le plus aisé.

Il soutient : que Snellius le premier inventeur des règles de la réfraction aurait attendu longtemps à les trouver, s'il avait cherché premièrement comment la lumière se forme. Mais il avait suivi apparemment la méthode dont les anciens se sont servis pour la catoptrique, qui est en effet par les finales, car cherchant la voie la plus aisée pour conduire d'un point donné à un autre point donné par la réflexion d'un plan donné (supposant que c'est le dessin de la nature), ils ont trouvé l'égalité des angles d'incidence et de réflexion comme l'on peut voir dans un petit traité d'Héliodore de Larisse, et ailleurs. Ce que M. Snellius, comme je crois, et après lui (quoique sans rien savoir de lui), M. Fermat, ont appliqué plus ingénieusement à la réfraction. (pp.52-53)

Quoi qu'il en soit, voici la règle telle que l'a donnée Snellius selon Delambre (1821) :

¹⁷La paternité de la loi de la réfraction est discutée. Elle était attribuée à Descartes jusqu'à ce que Huygens ne mentionne l'avoir vue dans les manuscrits de Snell environ soixante-dix ans plus tard. Cette loi connue sous le nom « Snell-Descartes » est appelée loi de Snell dans les pays anglo-saxons.

La route CF du rayon se change en CE ; prenons CD pour **rayon**, CF sera la sécante¹⁸ de $FCD=ACG$, ou la cosécante¹⁹ de FCB , CE sera la sécante de ECD ou la cosécante de l'angle rompu²⁰ ECB .

$$CE/CF = \text{coséc } ECB / \text{coséc } FCB$$

$$CE/CF = \text{coséc angle rompu} / \text{cosec angle d'incidence}$$

$$= \text{vitesse accélérée de la lumière} / \text{vitesse primitive}$$

Les vitesses sont en raison directe des cosécantes des angles avec la perpendiculaire.

(p.227)

Snellius indique que ce rapport est de $4/3$ lorsque la lumière passe l'air dans l'eau et il est de $3/2$ lorsque la lumière passe de l'air dans le verre

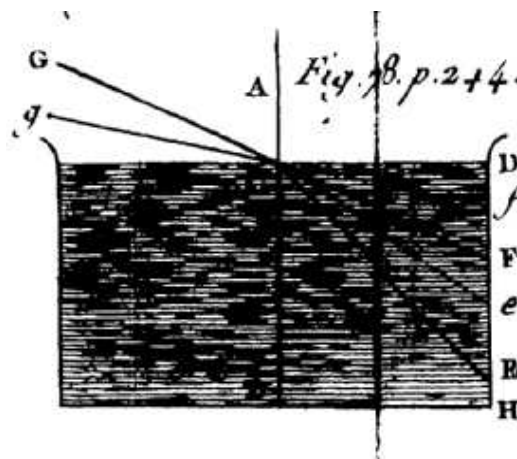


Fig.9 : figure de la réfraction (J. E. Montucla (1725-1799) : Histoire des mathématiques, tome II, fig. 78, p. 244)

En conclusion, dans son étude sur la réfraction, Snellius cherche à expliquer la vision d'un objet placé au fond d'un récipient plein d'eau. Il poursuit donc un enjeu théorique. Pour ce faire, il utilise selon certains une démarche expérimentale, pour d'autres un raisonnement

¹⁸ sécante $\alpha = 1/\cos\alpha$, CF sera la sécante de FCD lorsque le **rayon** $CD = 1$, de même CE sera la sécante de ECD

¹⁹ coséc $\alpha = 1/\sin\alpha$

²⁰ Angle rompu : angle de réfraction

mathématique s'appuyant sur le principe d'économie naturelle selon lequel la lumière suit toujours le trajet auquel correspond le minimum de temps.

2.3.2.5. René Descartes (1596-1650)

Descartes, mathématicien, physicien et philosophe français, ayant vécu de longues années au Pays-Bas, publie la *Dioptrique*²¹ en 1637. Il conteste la méthode suivie par les artisans et Galilée pour l'élaboration de la lunette astronomique et écrit dans la première page du discours premier :

« À la honte de nos sciences, cette invention si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune ».

Il ne masque pas son mécontentement vis-à-vis de la manière avec laquelle s'est produite cette découverte. Il évoque comment un verrier du nom de Jacques Metius²² qui n'a pas fait d'études arrive par l'expérience et le tâtonnement à cette fameuse invention. Il ajoute que, possédant

plusieurs verres de diverses formes, il s'avisa par bonheur de regarder au travers de deux, dont l'un était un peu plus épais au milieu qu'aux extrémités, et l'autre au contraire beaucoup plus épais aux extrémités qu'au milieu, et il les appliqua si heureusement aux deux bouts d'un tuyau, que la première des lunettes dont nous parlons, fut composée (Descartes, Discours de la méthode, édition 1966, pp. 99-100).

En tant que rationaliste, Descartes éprouve une amertume de voir chercher la vérité au hasard et *« en marchant à tâtons dans les ténèbres ».*

Pour exprimer cette situation scandaleuse pour les scientifiques d'alors, Hamou (1999) écrit : *« avec cette invention de la lunette, la science se voit comme saisie par la non science, la connaissance humaine brutalement transformée et élargie par un instrument de fortune, une méthode qu'elle n'a pas secrétée et dont elle ne peut revendiquée la paternité ».* Et il ajoute *« pour Descartes, c'est clair il y a un scandale et l'effort de sa dioptrique, on le verra, sera de rétablir l'ordre légitime de l'invention ».* Descartes s'insurge contre cette situation *« où la clarté méthodique dans la manière de poser et de résoudre les problèmes »* se trouve bafouée, ce qui anime chez lui, une contre révolution *« face à l'envahissement de l'imprévisible*

²¹ *Dioptrique* : science qui traite essentiellement des rayons réfractés dans les milieux denses transparents, les milieux naturels de l'œil humain comme les verres artificiels.

²² Un des premiers inventeurs présumés de la lunette.

nouveauté, des méprises heureuses, des savoirs bricolés et des découvertes faites de manière improvisée, il s'agira dans le discours d'exposition et de justification de rétablir la présence du sujet rationnel, la prévisibilité de la loi, l'antériorité des principes premiers- en d'autres termes l'ordre des raisons. » (p.174)

Descartes entend donc, faire table rase de cette « invention » fille du hasard et de la fortune qui reste « un peu malaisé », remettre l'instrument dans « l'ordre des raisons » et montrer que la lunette est méthodiquement inventable. Pour lui, l'expérience sensible, ne peut pas être une source de connaissances fiables : « *la vue est le plus noble de nos sens, soit, mais elle n'est qu'un sens et, comme telle, est utile à la vie plutôt qu'à la connaissance* » (Descartes cité dans Hamou, 1999, p. 241). La tâche que Descartes se propose de réaliser est de « *donner aux lunettes leurs figures propres, non pas celles qu'elles tirent d'un modèle empirique qui est passablement réussi, mais celles qu'elles doivent avoir, conformément à leur finalité propre qui est d'augmenter ou de parfaire la vision* » soutient Hamou (1999, p. 245) car l'invention est « un peu malaisée » et n'a pas atteint son dernier degré de perfection du premier coup.

La « méthode » nécessite donc de trouver la forme des verres à tailler et leur position relative afin d'obtenir une image nette de l'objet et beaucoup plus grande, et ce, grâce à un raisonnement mathématique fondé sur les principales propriétés de la lumière et de l'anatomie de l'œil.

Descartes rappelle ses intentions ainsi :

Par la Dioptrique j'eus dessin de faire voir qu'on pouvait aller fort avant en la philosophie²³ pour arriver par son moyen jusques à la connaissance des arts qui sont utiles à la vie, à cause que l'invention des lunettes d'approche, que j'y expliquais, est l'une des plus difficiles qui aient jamais été cherchées. Personne que je sache n'a suffisamment déterminé les figures que ces verres doivent avoir (cité dans Hamou, 1999, p.239).

Un exemple d'application de la méthode fut proposé par Descartes pour résoudre le problème de l'*anaclastique*. Voici comment il procède :

Si quelqu'un qui n'étudie que les seules mathématiques cherche cette ligne qu'en dioptrique on nomme anaclastique, et dans laquelle les rayons parallèles se réfractent de manière que tous après la réfraction se rencontrent en un seul point, il s'apercevra facilement [...] que la détermination de cette ligne dépend du rapport des angles de réfraction aux angles d'incidence [...] au contraire, si quelqu'un, qui n'étudie pas

²³ Au XVI^e siècle, on appelait philosophie, sous entendu « naturelle », ce que nous appelons aujourd'hui physique.

seulement les mathématiques, mais qui tâche, [...] de chercher la vérité sur tout ce qui se présente à lui, [...] il ira plus loin et trouvera que le rapport entre les angles d'incidence et les angles de réfraction dépend de la variation de ces mêmes angles en raison de la différence des milieux ; que cette variation à son tour dépend de la façon dont le rayon pénètre dans tout le corps transparent ; que la connaissance de la propriété de pénétrer dans un corps suppose également connue la nature de l'action de la lumière ; et qu'enfin pour comprendre l'action de la lumière, il faut savoir ce qu'est en général une puissance naturelle, ce qui est dans toute cette série le dernier terme et le plus absolu [...]. Je ne vois rien cependant qui puisse empêcher quelqu'un, qui se servirait parfaitement de notre méthode, de connaître cette ligne avec évidence» (cité dans Hamou, 1999, p. 252).

Il faut noter que la résolution du problème de l'anacastique et la découverte de la loi de la réfraction restent, pour plusieurs historiens, obscures. Hamou (1999) soutient que :

Les voies par lesquelles Descartes parvient à ces découvertes et le rôle qu'y joua Mydorge²⁴ ne sont pas bien connues. Une chose est sûre cependant, l'explication par les causes physiques exposés dans la dioptrique n'est pas celle qui l'a conduit à la découverte. (p. 250)

En réalité, Descartes propose différentes analogies pour expliquer les propriétés fondamentales de la lumière : propagation, réflexion et réfraction. Dans le cas de la réfraction, en raisonnant comme si la lumière était composée de « balles » et en reprenant le modèle « balistique » d'Ibn al-Haytham qui repose sur la décomposition du « mouvement » de la lumière, Descartes retrouve la loi de Snell en 1637. S'appuyant sur l'idée que « l'action de la lumière, suit en ceci les mêmes lois que le mouvement de cette balle », il décompose le mouvement en composantes normale et parallèle à la surface réfringente, et conserve la composante parallèle en faisant varier l'autre en rapport avec la résistance du milieu (figure 10). Le fait que la lumière passant de l'air à l'eau se rapproche de la normale à la surface de séparation, l'amène à la conclusion que la composante normale de la vitesse est augmentée, et donc que la lumière va plus vite dans l'eau que dans l'air, résultat qui « choque le sens commun » selon Pierre de Fermat. Descartes avance que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est constant et caractéristique du milieu $\sin i / \sin r = \text{constante}$.

²⁴ Mathématicien du cercle de Mersenne qui s'est intéressé aussi à la détermination de la forme de l'anacastique

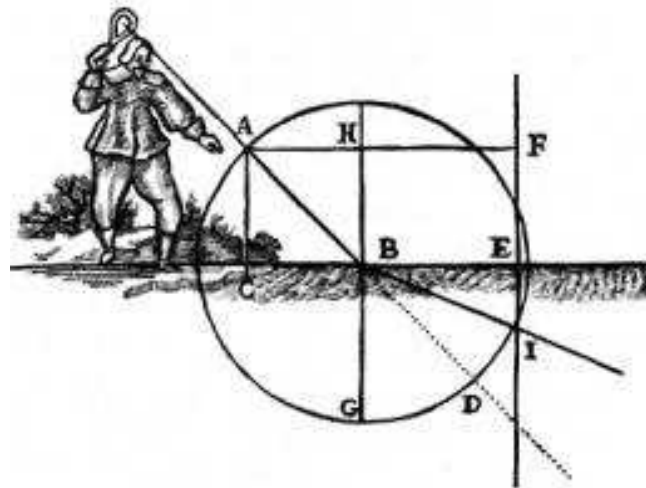


Fig. 10 : Le modèle « balistique » de Descartes, extrait du « *discours de la méthode* » (Descartes, 1966, p.115)

Pour plusieurs commentateurs, Descartes, loin d'appliquer d'abord les considérations physiques évoquées dans la dioptrique, est parvenu à la loi de la réfraction par « une bonne intuition mathématique ». Ensuite, en possession de cette loi, la résolution du problème de l'anaclastique devient triviale par un raisonnement géométrique. «*Si telle fut la voie de la « découverte » [...] elle serait apparue comme une découverte de fortune, faite en dépit de toute méthode*» souligne Hamou (1999, p. 251).

L'analyse géométrique du problème de l'anaclastique devait permettre de définir la forme adéquate des verres lenticulaires réalisant les réfractations requises. Descartes ne donne pas la solution générale, il se limite à souligner que l'ellipse et l'hyperbole sont les seules anaclastiques techniquement constructibles répondant aux exigences de convergence parfaite. Toutefois, il témoigne une préférence pour l'hyperbole qui est plus facile à tailler. Il décrit une machine susceptible de tailler les verres selon une forme hyperbolique.

En conclusion, nous constatons que plusieurs enjeux emboîtés sont poursuivis par Descartes dans ses recherches. L'un est un enjeu d'ordre épistémologique qui le conduit à contester la manière dont la lunette fut élaborée et perfectionnée par les verriers et Galilée et à proposer que son invention et son perfectionnement soient réalisables par la seule application de « la méthode ». Un autre est d'ordre théorique et concerne la forme de l'anaclastique. Un autre encore est d'ordre technique et porte sur la taille des verres adéquats répondants aux exigences de convergence parfaite.

Descartes est arrivé à ses résultats en utilisant, dans certains cas, des raisonnements mathématiques, et dans d'autres, des analogies.

2.3.2.6. Pierre de Fermat (1601?-1665)

Fermat, juriste et mathématicien français, naquit à Beaumont-de-Lomagne près de Toulouse. Il énonce son *principe d'économie naturelle* ou *principe de minimum* (1657) selon lequel le chemin emprunté par la lumière est celui qui minimise son temps de parcours en admettant l'idée, exprimée auparavant par Ibn al-Haytham, que la lumière conserve une vitesse constante dans un milieu homogène, mais moindre dans un milieu dense.

Il examine la proposition qui sert de fondement à la dioptrique de Descartes et qui conduit à la loi des sinus sur la réfraction. Il conteste sa démonstration en disant qu'elle lui semble « un véritable paralogisme ». Il relate dans une lettre adressée à un personnage anonyme comment fut faite la démonstration de son principe. En voici quelques extraits :

[...] dès que j'eus vu le livre de feu M. Descartes et que j'eus examiné avec quelque attention la proposition qui sert de fondement à sa dioptrique et qui établit la proportion des réfractions, je soupçonnai sa preuve ; sa démonstration me sembla un véritable paralogisme.

Premièrement, parce qu'il la fonde sur une comparaison et que la géométrie ne se pique guère de ces figures, les comparaisons y étant encore plus odieuses que dans le commerce du monde.

Secondement, parce qu'il suppose que le mouvement de la lumière, qui se fait dans l'air et dans les corps rares, est plus malaisé ou, si vous l'aimez mieux ainsi, plus lent que celui qui se fait dans l'eau et les autres corps denses; ce qui semble choquer le sens commun.

Et enfin, parce qu'il prétend que l'une des directions ou des déterminations du mouvement d'une balle subsiste toute entière après la rencontre du second milieu.

J'ajoutai même quelques autres raisons, qu'il serait ou superflu ou ennuyeux de vous déduire. Il vit mes écrits, il y répondit et, après plusieurs réponses et répliques de part et d'autre, nous nous séparâmes comme le prévenu et le témoin, l'un dans l'affirmative, l'autre dans le négative, quoique j'eus enfin des lettres de sa part pleines de civilité.

[...] je ne voyais point d'autre moyen plus assuré que de chercher les réfractions dans cet unique principe, que la nature agit toujours par les voies les plus courtes, sur le fondement duquel je lui indiquai qu'on pouvait chercher par la géométrie le point de réfraction, en le réduisant au problème ou théorème que vous savez. Mais, parce que j'en jugeai l'invention très difficile et très embarrassée, puisque ces questions des maximis et minimis conduisent d'ordinaire à des opérations de longue haleine et qui se brouillent aisément par une infinité d'asymétries qu'on trouve sur son chemin, [...].

Je surmontai toutes les asymétries avec peine, et voilà que tout à coup, à la fin de mon opération, tout se débrouille et il me vient une équation très simple qui me donne justement la même proportion que M. Descartes.

Je crus sur l'heure avoir équivoqué, car je ne pouvais me figurer qu'on aboutît à une même conclusion par des routes tout à fait opposées, M. Descartes supposant, pour un des moyens de sa démonstration, que le mouvement de la lumière trouve plus de résistance dans l'air que dans l'eau, et moi supposant tout le contraire[...].

Je refis donc pour lors la question à diverses reprises, en changeant les positions, et je trouvai toujours la même conclusion, ce qui me confirma deux choses; l'une que l'opinion de M. Descartes sur la proportion des réfractions est très véritable; et l'autre, que sa démonstration est très fautive et pleine de paralogismes (Ronchi, 1996, pp. 118- 120).

En conclusion, il est clair que l'enjeu poursuivi par Fermat est épistémologique fondé sur sa contestation de la démonstration de Descartes de la loi de la réfraction. Pour ce faire, il cherche par la géométrie le point de réfraction en s'appuyant sur le principe que la nature agit toujours par les voies les plus simples.

2. 3. Synthèse générale

Le tableau 2 ci-dessous présente les démarches utilisées par les scientifiques ayant contribué à la genèse de la loi de la réfraction ainsi que les enjeux qu'ils poursuivaient et les résultats qu'ils ont obtenus.

Savants	Lieux géographiques	Enjeux	Démarches	Résultats
Ptolémée	Alexandrie	Théorique	Expérimentale	Inégalité entre les angles
Ibn Sahl	Bagdad	Technique- Théorique	Mathématique	$CE/CH = Cte$
Ibn Al - Haytham	Caire	Technique- Théorique	Expérimentale- Mathématique- Mixte -Analogie	Inégalité entre les angles
Della Porta	Naples + Murano	Enjeu subordonné à la magie naturelle - Théorique	Expérimentale qualitative- Essais / Erreurs	Chambre noire
Galilée	Venise+Padoue +Florence	Épistémologique – Théorique - Technique	Expérimentale qualitative- Essais / Erreurs	Invention de la lunette
Kepler	Allemagne	Technique- Théorique Epistémologique- Astromomique- Théologique	Expérimentale- Mathématique- Mixte- Analogie	$i/r = Cte$ pour les petits angles
Snellius	Pays Bas	Théorique	Expérimentale- Mathématique	$CE/CH = Cte$
Descartes	Pays Bas	Epistémologique- Théorique- Technique	Mathématique - Analogie	$\sin i/\sin r = Cte$
Fermat	Toulouse	Epistémologique	Mathématique	Principe de Fermat

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des enjeux et démarches

A l'opposé de la thèse qui soutient l'aspect instantané et solitaire des productions scientifiques, la genèse de la loi de la réfraction montre que cette loi est le résultat de travaux s'étendant de l'antiquité au XVII^e siècle conduits en une grande diversité de lieux.

Elle porte un coup dur à la représentation simpliste et cumulative d'une science qui progresse linéairement à la suite de généralisations tirées d'observations et d'expériences.

Elle confirme qu'une connaissance scientifique est fille de son époque : elle est le résultat d'activités réalisées par des hommes dans le contexte socio-culturel, technique et politique, dans lequel ils vivent.

Les scientifiques ne cherchaient pas à établir une loi pour elle-même mais à résoudre des problèmes liés à des pratiques sociales, c'est-à-dire « d'une société ». Ces problèmes sont de nature théorique, ou technique, ou épistémologique, ou idéologique, etc., et ce faisant, les scientifiques ont été amenés à étudier la réfraction et à établir une loi. Ils n'ont pas tous suivi la même démarche : certains ont fait des expériences, d'autres uniquement des calculs, d'autres encore se sont appuyés uniquement sur des réflexions spéculatives et intuitives, etc. Les expériences réalisées étaient construites en réponse à une question ainsi que les observations.

Cette genèse montre que la méthode scientifique basée sur la démarche expérimentale, tenue pour acquise par la science moderne, n'est pas la seule juge de la « vérité scientifique ». Ainsi si « quelque chose » guide l'activité des scientifiques, c'est plus un projet, une intention, qu'une manière établie d'y parvenir.

Chapitre2

Cadre théorique didactique

1. Introduction

Les choix didactiques qui fondent l'élaboration de la séquence d'enseignement s'inscrivent dans une vision socio-constructiviste de l'apprentissage-enseignement. Ils nous ont conduit à élaborer des documents à caractère historique afin de mettre les élèves dans une situation d'investigation. L'approche historique préconisée pour promouvoir leur compréhension de la nature des sciences s'apparente à celle proposée par Rudge et Howe (2009) : l'approche explicite et réflexive, mais se distingue d'elle car nos objectifs pédagogiques sont uniquement épistémologiques.

Cette approche commence par l'intégration du thème scientifique d'étude dans la progression pédagogique de la classe et la proposition d'un questionnement à caractère historique (comment en est-on arrivé là ?), la spécification d'une problématique particulière en lien avec l'objectif d'apprentissage visé, le recueil des conceptions des élèves sur le contenu épistémologique à aborder et l'émission d'une(s) hypothèse(s) à tester ; suivent la résolution du problème s'appuyant sur la collecte d'informations tirées de documents historiques, l'analyse collective des informations et les débats entre élèves, la confrontation des hypothèses et des résultats obtenus ; pour finir, l'enseignant généralise les résultats trouvés et fait le lien entre le fonctionnement de la science dans le passé et la situation actuelle.

Pour cette séquence d'enseignement, nous avons retenu deux objectifs principaux d'apprentissage qui sont en lien avec les pratiques scientifiques : montrer la diversité des démarches utilisées par les scientifiques et la diversité des enjeux poursuivis, et ce afin de contrer l'image renvoyée par l'enseignement traditionnel de scientifiques qui sont tous à la recherche de lois et font des expériences.

L'organisation de la séquence d'enseignement est conçue selon les étapes suivantes :

1- Construction du problème

- Intégration de la séquence dans la progression du programme (après l'enseignement de la loi de la réfraction).
- Présentation du problème aux élèves en s'appuyant sur un questionnaire à caractère historique: « *selon vous, comment les scientifiques ont pu établir la loi de la réfraction autrefois ?* »
- Mise en commun et analyse des réponses fournies par les élèves, émission d'une (es) hypothèse(s) à tester.

2- Résolution du problème

Travail documentaire (en classe et en petits groupes)

- Répartition des documents historiques sur l'ensemble de la classe, chaque texte étant distribué à un groupe d'au moins deux élèves.
- Lecture individuelle des documents guidée par une consigne précisant le type de renseignements à prélever des textes (en particulier souligner les termes importants permettant d'identifier la nature de(s) la démarche(s) utilisées et le(s) enjeu(x) poursuivis par chaque physicien) et à réunir dans un tableau de format identique à celui qui sera utilisé pour la synthèse collective.
- Mise en commun au sein de chaque groupe des informations recueillies. .

Synthèse

- Mise en commun des informations réunies par chaque groupe et constitution du tableau récapitulatif.
- Analyse du tableau et confrontation de(s) l'hypothèse(s) et du(es) résultat(s) trouvé(s).
- Validation ou réfutation de l'hypothèse à tester.

3- Institutionnalisation

L'enseignant généralise les résultats trouvés et fait le lien entre le fonctionnement de la science dans le passé et la situation actuelle autrement dit, l'introduction de l'interprétation moderne doit être motivée par le débat historique qui précède.

Notons que pour être en mesure d'identifier facilement la nature d'une démarche utilisée ou d'un enjeu poursuivi par un scientifique à partir de l'étude de documents historiques, l'élève doit d'un côté, bien connaître au préalable les différents types de démarches, ou du moins celles qui sont les plus utilisées, et les problèmes explorés par les scientifiques, et de l'autre, être en mesure de comprendre les « textes historiques de savoirs » écrits par des savants par le passé pour qu'il puisse les exploiter convenablement comme support didactique. Par conséquent, une transposition didactique doit être opérée, elle concerne d'un côté un savoir à contenu épistémologique relatif aux pratiques scientifiques, les démarches et enjeux spécifiques du physicien, de l'autre, un savoir à contenu scientifique figurant dans des documents historiques originaux dont l'exploitation directe par les élèves est généralement difficile.

2. Le choix d'une approche de transposition didactique : savoir savant vs pratiques sociales

2.1. Le concept de transposition didactique

Le concept de transposition didactique a été introduit par le sociologue Michel Verret (1975) qui a listé les contraintes qui pèsent sur le choix de ce qui doit être enseigné et qui est susceptible d'être appris : désyncrétisation et dépersonnalisation du savoir, programmabilité des apprentissages, etc. Puis il a été emprunté par Chevallard (1985, 1991) pour expliquer les transformations que subissent les théories mathématiques (savoir savant) lorsqu'elles deviennent savoirs scolaires, d'abord dans les programmes, puis dans les manuels et les salles de classe. Ce concept a été ensuite élargi en didactique d'autres disciplines scientifiques (Arsac et al. 1994 ; Caillot, 1996 ; Raisky, 1996).

En fait, la notion de transposition didactique part de l'idée générale qu'un savoir nécessite d'être didactisé pour être enseigné :

Le terme de transposition souligne que le savoir ne peut être transmis tel quel, et celui de didactique fait apparaître la nécessité de trouver des règles à cette transposition, qui soient adéquates à la structure du savoir que l'on veut faire acquérir, dans des modalités qui prennent en compte les processus d'apprentissage (Aster, 1985).

Dans ce sens, la transposition didactique, dans son ensemble, pourrait être considérée comme une opération légitimée par la spécificité même du processus d'instruction. Elle se décline en deux étapes selon Chevallard (1985) :

La première étape : la transposition didactique externe

Elle représente le processus de transformation, d'interprétation et de ré-élaboration didactique du savoir savant en savoir à enseigner constitué par les programmes scolaires qu'on peut aussi appeler curriculum formel ou prescrit (Chevallard, 1985 ; Perrenoud, 1994a, 1996 a).

Le curriculum formel est produit par la noosphère qui choisit ce qu'il faut transmettre, de manière organisée, aux élèves à l'école. Elle cherche à rétablir l'équilibre, la compatibilité entre l'école et la société avec une double contrainte : le savoir enseigné doit être suffisamment proche du savoir savant et suffisamment éloigné du savoir des parents.

Le curriculum formel intègre des connaissances, compétences, méthodes pédagogiques, supports didactiques et véhicule des valeurs et pratiques sociales, etc.

Astolfi et Develay (1989) classent le processus de décontextualisation et de recontextualisation parmi les transformations les plus importantes ayant lieu au cours de la transposition didactique externe. En effet, l'activité du scientifique est contextualisée, celui-ci opère dans un espace théorique et conceptuel particulier, un espace épistémologique bien délimité appelé contexte. Le produit de cette activité est par conséquent contextualisée, il est donc compris et utilisé seulement par rapport au contexte épistémologique dans lequel il a été créé. Pour Paun :

Ce contexte donne naissance à une évidente spécificité conceptuelle et méthodologique qui rend impossible son transfert tel quel dans l'espace scolaire et dans le cadre décrit par le processus d'instruction scolaire. Il n'est pas transférable tel quel, mais il est transposable (2006, p. 5).

Le processus de décontextualisation ayant lieu au cours de la transposition didactique externe consiste au remplacement du référent scientifique original par un « espace théorique de substitution » ayant toutes les caractéristiques imposées par le processus d'enseignement. Ce remplacement implique une recontextualisation qui positionne les contenus dans un contexte nouveau, celui de type pédagogique.

Astolfi et Develay (1989) proposent deux formes de décontextualisation : absolue et relative. Elle est absolue lorsque le référent scientifique original est ignoré et qu'il y a création d'un contenu didactique différent sans aucun lien avec ce contenu scientifique (cas peu fréquent).

Dans le cas d'une décontextualisation relative, trois formes sont identifiées :

- Une décontextualisation concernant le contenu scientifique proprement dit ;
- Une décontextualisation visant le contexte conceptuel (les notions sont intégrées dans d'autres structures conceptuelles, spécifiques pour la pédagogie) ;
- Une dernière forme concerne la modification ou le remplacement du modèle épistémologique initial par un modèle construit pour les besoins d'enseignement et d'apprentissage.

D'autres transformations significatives s'opèrent dans la transposition externe (Paun, 2006), telles que :

- La simplification (ou la présentation simplifiée) du modèle scientifique de référence. Signalons, cependant, que cette simplification ne doit pas porter atteinte aux sens scientifiques de base, à la compréhension des données qui constituent l'identité conceptuelle, épistémologique du référent scientifique ;
- Une transposition terminologique se produit également, objectivée dans des transformations lexicales, avec l'introduction de certains équivalents terminologiques qui ont le rôle de rendre accessibles les contenus à apprendre. Toutefois, il faut faire preuve de vigilance pour ne pas courir le risque de perdre ou d'affecter la substance sémantique des concepts scientifiques ou de tomber dans des vulgarisations scientifiques ;
- L'introduction d'aspects figuratifs dans les textes didactiques permet de favoriser la compréhension par les élèves des concepts plus abstraits qui peuplent souvent les textes scientifiques.

La deuxième étape : la transposition didactique interne

Le savoir à enseigner tel qu'il est présenté dans les programmes n'est pas accessible aux élèves. D'autres transformations sont donc nécessaires, elles se produisent dans le processus d'enseignement – apprentissage et tendent à faire du savoir à enseigner un savoir enseigné assimilable. La transposition didactique interne représente donc l'ensemble des transformations, successives et négociées, subies par le curriculum formel dans le cadre du processus d'enseignement et d'apprentissage tout au long du parcours professeur-élève. Elle relève largement de la marge d'interprétation, voire de création des enseignants dont les résultats s'objectivent dans le curriculum réel qui représente ce qui arrive à l'élève en tant qu'*«ensemble d'expériences, de tâches, d'activités qui engendrent ou sont censées engendrer*

des apprentissages» (Perrenoud, 1984, 1995, p. 237) et dans le curriculum réalisé qui représente ce que l'élève assimile effectivement.

La transposition didactique de Chevallard a été la cible de différentes critiques. La plus virulente est celle qui rejette la référence unique au savoir savant. Certains, comme Develay (1992), Martinand (2001), Perrenoud (1998), Raisky (2001), mais selon différentes approches, prennent les pratiques sociales comme référence aux activités scolaires.

2.2. Le concept de « pratique sociale de référence »

L'idée de *pratique sociale de référence* est avancée par Martinand en 1981, puis reprise en 1986 dans l'ouvrage « *connaître et transformer la matière* »²⁵. Elle s'inscrit dans une conception d'ensemble de la construction et de l'étude des curriculums d'éducation scientifique et technologique et renvoie aux trois aspects suivants :

- *pratique* : ce sont des activités objectives réelles de transformation d'un donné naturel ou humain qui sont considérées sous tous leurs aspects et non seulement de savoir et de savoir-faire ;
- *sociale* : les situations, tâches et qualifications concernent l'ensemble d'un secteur social, et non des rôles individuels ;
- *référence* : la relation avec les activités didactiques n'est pas d'identité, il y a seulement terme de comparaison.

Pour Martinand (1983), la définition d'un contenu d'enseignement ne se ramène pas uniquement au savoir universitaire correspondant mais suppose une réélaboration qui se réfère à des activités sociales diverses (activités de recherche, d'ingénierie, de production mais aussi des activités culturelle, domestique, etc.). La référence aux pratiques sociales est nécessaire, puisque les activités scolaires veulent être des images d'activités sociales réelles.

Pour Perrenoud (1998), il n'y a pas de savoirs sans pratiques, on atteint d'abord les pratiques, les savoirs s'y trouvent « en creux ».

Calmettes (1996) souligne trois points importants liés à l'idée de pratique sociale de référence :

²⁵ J.L. Martinand, *Connaître et transformer la matière*. Berne, Peter Lang, 1986, pp 137-140.

- Celle-ci apporte des élargissements importants à la notion de transposition didactique, elle n'est pas limitée seulement au passage du savoir savant au savoir enseigné mais à l'ensemble des éléments d'une pratique, y compris les rôles sociaux. Ainsi, les contenus d'une science sont (ou devraient être) transposés différemment dans les actes d'enseignement suivant les pratiques qui leur servent de référence pour la transposition didactique. Johsua et Dupin (1993) résumant ce point en écrivant : « *Martinand conteste une focalisation excessive sur le texte du savoir et une sous-estimation des pratiques effectives qui donnent sens à ces textes. Ceci concerne à la fois la base empirique de ces pratiques et l'espace problématique où elles prennent corps* » (p. 203).
- Elle permet d'une part, d'explicitier et de discuter les raisons des choix des contenus enseignés, des supports didactiques (matériels, documents, etc.), l'organisation et la planification du travail, la préparation et l'évaluation de la production, et d'autre part, d'analyser et de critiquer les situations à l'école en repérant ses concordances et ses différences, ses écarts avec la pratique.
- Malgré l'existence d'écarts entre pratique sociale de référence et situations de classe, ces dernières doivent garder une cohérence interne au niveau didactique et externe avec la pratique de référence :

L'origine de la notion de pratique de référence est moins l'indignation devant l'écart entre pratique vivante et activité scolaire que le besoin d'effectuer un choix explicite de référence, de contrôler les écarts entre la pratique choisie et les activités scolaires, d'assurer une cohérence entre les différentes composantes de l'activité scolaire en relation avec une pratique de référence (Martinand, 1989).

En didactique des disciplines, un débat émerge parmi les chercheurs sur la manière d'envisager les rapports entre pratiques et savoirs. Nous repérons au moins trois positions distinctes. Pour quelques auteurs (Chevallard, 1991 ; Joshua, 1996 ; Tavignot, 1991), la transposition didactique concerne spécifiquement des savoirs (savoir savant pour le premier, savoir expert pour le deuxième, savoir savant et savoir faire pour le troisième) qui sont au centre des activités, les pratiques étant secondaires. D'autres, comme Develay (1992) et Perrenoud (1998), n'accordent pas de privilège ni au savoir savant ni aux pratiques sociales de référence mais les juxtaposent. Pour eux, pratiques et savoirs sont transposables et sont à l'origine des savoirs scolaires. Pourtant, Perrenoud (1998, p. 489) reconnaît qu'il « *y a confusion lorsqu'on laisse entendre que savoirs et pratiques sont des*

réalités clairement distinctes » et tente de montrer « *qu'il n'y a pas de savoirs sans pratiques, ni de pratiques sans savoirs* ». Pourquoi alors différencier savoirs et pratiques en définissant deux sources de la transposition didactique ?

Pour Martinand (2001) et Raisky (2001), ce sont les pratiques qui sont enseignées : les savoirs ne sont qu'une composante de la pratique. Martinand considère les pratiques au sens global. C'est par rapport à toutes les composantes d'une pratique (culturelle, de production, d'ingénierie, etc.) que la question de la référence doit être posée. En effet, ce qui caractérise une pratique sont les objets de travail, les instruments matériels, intellectuels, les problèmes, les relations entre les acteurs dans les situations, les savoirs et les attitudes mises en jeu. Les savoirs sont ainsi contenus, inclus dans la pratique et ne peuvent être contextualisés ou isolés d'elle. De même, Raisky (2001) adopte la position de Martinand et considère que « *les références sont des situations, des activités et non d'abord des savoirs* ». Ainsi toute situation, construite à travers une activité humaine met en œuvre et génère des savoirs. Ce ne sont donc pas « les pratiques qui sont des habillages de savoirs, ce sont les savoirs qui sont contenus dans la pratique pour pouvoir les faire fonctionner ». Il faut « *prendre en compte des pratiques dans tous leurs aspects y compris dans leurs composantes de savoirs, discursifs ou non, explicites ou implicites, individuels ou collectifs* » (Martinand, 2003, p.128). La séparation des savoirs savants et pratiques sociales de référence semble incohérente. Elle a engendré une critique ferme de la part de Martinand à l'égard de la proposition de Dévelay : « *cela revient à proposer une sorte de dualité instable qui se résout en fait en une centration sur le savoir avec prise en compte des contextes pratiques du savoir* » (Martinand, 2003, p.128).

En conclusion, d'après l'analyse qui précède sur la transposition didactique, nous considérons que la conception de Martinand apparaît la plus adaptée pour la transposition du savoir de référence lié aux pratiques des scientifiques (les démarches et enjeux) tandis que celle de Chevallard convient davantage pour traiter les « *textes historiques de savoirs* » des savants.

3. Le choix des objectifs d'enseignement en lien avec les pratiques des scientifiques

3.1. La notion d'objectif – obstacle

3.1.1. Définition

Introduit par Martinand (1986), le concept d'objectif – obstacle s'efforce d'articuler deux termes antagonistes. D'une part, la notion classique d'objectif pédagogique d'origine behavioriste défini à partir de la seule analyse des programmes et de la matière enseignée et par laquelle on cherche à rendre opérationnels des contenus d'enseignement. Cette définition s'effectue le plus souvent sans s'interroger sur l'existence même de difficultés permanentes liées aux représentations des élèves. D'autre part, l'idée d'obstacle dont la source théorique est la notion « d'obstacle épistémologique » élaborée par Bachelard en explorant l'histoire des sciences. Ainsi, les obstacles sont en relation avec les erreurs couramment commises par les élèves, erreurs qui ne sont pas :

Seulement l'effet de l'ignorance, de l'incertitude, du hasard que l'on croit dans les théories empiristes ou behavioristes de l'apprentissage, mais l'effet d'une connaissance antérieure, qui avait son intérêt, ses succès, mais qui, maintenant, se révèle fausse, ou simplement inadaptée. Les erreurs de ce type ne sont pas erratiques et imprévisibles, elles sont constituées en obstacles. Aussi bien dans le fonctionnement du maître que dans celui de l'élève, l'erreur est constitutive du sens de la connaissance acquise (Brousseau, 1998, p.4)

Pour Martinand, l'acte d'apprendre et d'enseigner s'organise autour du franchissement d'obstacles « intéressants » qui sont repérés à partir de l'étude des conceptions des élèves. Il propose la notion d'objectif – obstacle pour appréhender les obstacles comme un mode de sélection des objectifs : « ce sont bien eux qu'il faut mettre au centre pour définir les véritables objectifs ». L'obstacle est alors perçu dans sa face dynamique. Celle qui permettrait la progression de la pensée par rupture avec des conceptions antérieures :

Dans la mesure où ces obstacles ont une signification épistémologique profonde, je crois qu'ils fournissent la clé pour formuler les buts les plus essentiels d'une éducation scientifique. Autrement dit, il s'agit d'exprimer les objectifs en termes d'obstacles franchissables, car parmi la diversité des objectifs possibles, les objectifs intéressants sont les objectifs-obstacles. [...] Il nous paraît légitime de faire de leur franchissement les

vrais objectifs conceptuels [...] L'ambition pratique est donc de fournir aux maîtres, avec une liste d'obstacles à franchir par les élèves, la description des buts des activités, afin de permettre d'orienter les interventions pédagogiques et l'évaluation.» (Martinand, in Bednarz et Garnier, 1989, cité dans Astolfi, 1992, p. 108).

La phase cruciale dans les enseignements organisés autour de la notion d'objectif-obstacle concerne avant tout l'identification ou la recherche du « bon obstacle » à faire franchir aux élèves pour qu'ils apprennent. C'est autour de cet obstacle que le formateur construit la situation d'enseignement de telle façon que l'élève puisse le « travailler » sans le contourner. Son dépassement constituera un palier décisif dans le développement cognitif de l'apprenant.

3.1.2. Origine des obstacles

Avant d'identifier les étapes possibles pour caractériser un objectif- obstacle, il est intéressant de distinguer les différents types d'obstacles qui peuvent être repérés et qui constitueront d'éventuels objectifs d'acquisition lors d'une séquence d'enseignement-apprentissage.

Brousseau (1998) distingue trois origines des obstacles : ontogénique, épistémologique et didactique :

- *Origine ontogénique* : les obstacles ontogéniques sont liés au développement psychogénétique de l'individu. Ils surviennent du fait des limitations (neurophysiologiques entre autres) de celui-ci à un moment de son développement, il développe des connaissances appropriées à ses moyens à cet âge là. Ainsi, Piaget démontre notamment que la conservation de la substance ou des quantités numériques n'est pas acquise avant l'âge de sept ans et situe le stade de la pensée formelle autour de 12 -14 ans.
- *Origine épistémologique* : le concept d'obstacle épistémologique résulte des travaux de Bachelard (1938) sur l'histoire des idées scientifiques, il est lié au mode de représentation que possède l'apprenant d'un concept scientifique. Bachelard le définit comme une résistance au développement de la connaissance, interne à l'acte d'apprendre et auquel on ne peut, ni ne doit échapper, du fait même de son rôle constitutif dans la connaissance visée :

Il ne s'agit pas de considérer des obstacles externes comme la complexité ou la fugacité des phénomènes, ni d'incriminer la faiblesse des sens et de l'esprit humain ; c'est dans l'acte même de connaître intimement qu'apparaissent par une sorte de nécessité

fonctionnelle des lenteurs et des troubles... On connaît contre une connaissance antérieure en détruisant des connaissances mal faites, en surmontant ce qui dans l'esprit même fait obstacle [...] (1938, pp. 13-14).

Pour Sanner (1983), ces obstacles constituent ce qui s'oppose au progrès de la rationalité de façon indirecte et obscure car ils surgissent du tréfonds de l'inconscient collectif. Ainsi, un obstacle épistémologique :

N'est jamais le fruit unique d'une erreur passagère qu'il suffirait de réparer, d'une ignorance qu'on pourrait combler, d'une mode qui passerait et a fortiori d'une inaptitude! Il peut résulter de circonstances culturelles, sociales, économiques... mais ces « causes » s'actualisent en conceptions qui demeurent, une fois les causes disparues et qu'il ne suffit pas d'oublier, car c'est à ce niveau que le « débat » doit trancher (cité par Brousseau, 1998, p.18).

En étudiant les obstacles dans les sciences physiques, Bachelard identifie : « *l'obstacle de l'expérience première, de la connaissance générale, l'obstacle verbal, l'utilisation abusive des images familières, la connaissance unitaire et pragmatique, l'obstacle substantialiste, réaliste, animiste, celui de la connaissance quantitative* » (Brousseau, 1998, p.5).

- *Origine didactique* : ce sont des obstacles qui sont liés aux situations d'enseignement et d'apprentissage dans lesquelles sont inscrits l'apprenant et l'enseignant. Ils ne dépendent selon Brousseau (1998) que d'un choix ou d'un projet du système éducatif. Parmi ceux-ci, on peut citer : les obstacles dus à la transposition didactique, certaines simplifications réalisées par l'enseignant peuvent entraîner des erreurs dues aux connaissances incomplètes ou erronées ; les obstacles dus à la pratique pédagogique adoptée, des incompréhensions peuvent être liées aux techniques et aux procédés employés par le maître, tels que les obstacles du langage (l'obstacle verbal de Bachelard) ; les obstacles liés au contrat didactique, en effet certaines règles implicites, régissant les rapports entre le maître et ses élèves en ce qui concerne une tâche, sont perçues par ces derniers comme des repères réguliers lors de son exécution et peuvent se dresser comme des obstacles à l'appropriation par l'élève de certaines notions.

3.1.3. Caractérisation d'un objectif- obstacle

Les obstacles d'origine proprement épistémologique sont ceux qui constituent les véritables obstacles parmi lesquels sont sélectionnés les objectifs-obstacles et autour desquels se construisent des situations d'apprentissage et d'enseignement.

Astolfi et Develay (1989, p. 58) suggèrent les étapes suivantes pour caractériser un objectif-obstacle :

- *Repérer les obstacles à l'apprentissage (dont les représentations font parties), sans les minorer ni les survaloriser ;*
- *Définir inversement, et de manière plus dynamique, le progrès intellectuel correspondant à leur éventuel franchissement ;*
- *Sélectionner, parmi les diversités des obstacles repérés, celui (ou ceux) qui paraît franchissable au cours d'une séquence, produisant un progrès intellectuel décisif ;*
- *Se fixer comme objectif le dépassement de cet obstacle jugé franchissable ;*
- *Situer cet objectif parmi les familles que distinguent les taxonomies classiques, l'aspect dominant d'un objectif-obstacle relevant toujours de l'une d'elles (objectif d'attitude, de méthode, de connaissance, de savoir-faire, d'acquisition d'un langage ou d'un code, etc.) ;*
- *Traduire cet objectif en termes opérationnels selon les méthodologies classiques de formulation des objectifs ;*
- *Construire un dispositif (ou plusieurs), cohérent avec l'objectif, ainsi que des procédures de remédiation en cas de difficultés.*

Pour Meirieu (1988), dans une situation-problème, l'objectif principal de formation se trouve dans l'obstacle à franchir et non dans la tâche à réaliser. Ainsi, c'est le formateur qui perçoit l'objectif à atteindre et doit placer l'obstacle correspondant au cœur du dispositif d'apprentissage, de telle façon qu'il soit « travaillé » par l'élève sans être contourné. Ce dernier du point de vue où il se trouve « ne peut savoir ce qu'il doit savoir avant de le savoir ! » car il est orienté seulement par la tâche à effectuer. Le dépassement de l'obstacle permet d'atteindre le niveau de conceptualisation visé.

3.2. L'inductivisme : une conception qui fait obstacle à la diversité des démarches et consolide le mythe de la méthode scientifique.

La conception « l'observation prime » (Chalmers, 1987) signifie que les théories résultent de l'observation et/ou de l'expérience première. Elle est consolidée par la vision inductiviste à

laquelle se réfère des processus d'enseignement fondés sur l'induction et la généralisation décrits par Johsua et Dupin (1993) pour lesquels l'observation et l'expérience sont les fondements des connaissances scientifiques : l'expérience doit permettre de dévoiler à l'élève ce qui n'est pas connu de lui au départ.

L'inductivisme trouve ses origines dans l'empirisme proposé par Francis Bacon (1561-1621) comme règle première de la recherche. Il stipule qu'il ne faudrait pas trop s'éloigner des expériences et des observations lors de l'élaboration des théories bien qu'il n'évacue pas hors du discours scientifique la possibilité de spéculations métaphysiques ultérieures. Claude Bernard (1813-1878) considère quant à lui, les faits (issus d'observations ou d'expériences) comme les arbitres suprêmes des théories. Il annonce dans « *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* » vouloir faire de cette discipline « une science indépendante ayant ses méthodes et son but ». Il propose les étapes de ce qui devrait constituer une démarche expérimentale logique et rigoureuse: le fameux « *OHERIC* » (**O**bservation sans préjugé – **H**ypothèse réaliste – **E**xpérience avec un témoin – **R**ésultat produisant un fait qui consiste en l'arbitre suprême des théories- **I**nterprétation conduisant à la **C**onclusion «qui s'impose».)

Pour Auguste Comte (1798-1857), fondateur du positivisme, les connaissances « positives » sont celles qui découlent directement de l'observation et de l'expérience par l'usage bien combiné du raisonnement. Cette doctrine considère dépourvue de sens toute proposition métaphysique. Il prône la méthode inductive : les théories ne doivent pas se faire *a priori* ; on doit seulement interpréter *a posteriori*. Dans cette perspective, les modèles, les notions et les lois scientifiques existent en eux-mêmes et serait un reflet exact du monde, indépendamment de tout sujet.

Le Cercle de Vienne (1920-1930) regroupe des savants de différentes disciplines et d'inspiration positiviste. Ils se fixent comme objectif principal d'homogénéiser la méthodologie des différentes sciences en s'inspirant des principes épistémologiques des sciences « pures ». Ils partent de l'idée que les sciences de la nature devraient servir de modèle aux sciences humaines. Ces épistémologues se donnèrent donc la tâche de définir « La méthode scientifique » mais ils échouèrent. Ils proposèrent une version moderne de l'empirisme selon laquelle un énoncé n'a de sens que s'il découle logiquement des faits, autrement dit, les connaissances ne sont établies qu'à partir de phénomènes accessibles à des expériences concrètes et pouvant être soumis à la vérification empirique. Ce style de pensée entend éradiquer tout énoncé métaphysique du langage scientifique.

En conclusion, le positivisme et l'empirisme sont deux variantes de la conception inductiviste qui considère que l'observation est première, indépendante de la théorie, et fournit une base sûre et objective à partir de laquelle il est possible d'extraire la connaissance par le double processus de l'induction et de la généralisation.

Dans une revue de littérature sur l'enseignement des sciences physiques en France, Robardet (1997) signale que depuis son début en 1902, cet enseignement est imprégné d'inductivisme : il est fondé sur « l'expérimentation » et « l'observation méticuleuse » et sur le rapport étroit à la réalité. Toutes les réformes entreprises depuis, et qui se sont succédées jusqu'à la période actuelle, débouchent sur le développement d'une pratique pédagogique fortement inductiviste. Malgré l'évolution de l'enseignement au cours de ces quinze dernières années, le recours aux approches inductivistes est encore très fréquent dans l'enseignement secondaire actuel. Ce constat, n'est pas spécifique à la France, des études effectuées à l'étranger confirment ce diagnostic.

La conception inductiviste qui imprègne fortement l'enseignement des sciences physiques s'érige en obstacle tant chez les élèves que chez les enseignants à l'idée de la diversité des démarches scientifiques à laquelle adhère la majorité des épistémologues actuels. En effet, la pratique pédagogique développée actuellement par la plupart des enseignants s'appuie sur l'observation et l'expérience en vue d'induire la loi. Cette méthodologie constitue ce qui est appelée la démarche expérimentale, baptisée aussi la démarche scientifique. Elle serait constituée d'*étapes bien déterminées* à respecter de manière rigoureuse. Une telle démarche consolide le mythe de la méthode scientifique universelle. En outre, le mot « démarche » fait référence selon Hagège (2007) « *à une manière de marcher, à une manière propre d'action, à une manière de progresser (de la raison, de la pensée) ou à une tentative auprès de, quelqu'un pour réussir une entreprise* ». Une référence qui pourrait induire l'idée d'un procédé constitué d'une succession d'étapes organisées capables d'amener n'importe qui à produire des idées. Par ailleurs, l'examen de la plupart des manuels scolaires des années quatre-vingt-dix (Robardet, 1995 ; Roletto, 1998) permet de constater que la démarche utilisée est fortement imprégnée d'inductivisme, ce qui ancre davantage cet obstacle.

3.3. La découverte des lois, une conception qui fait obstacle à la diversité des enjeux poursuivis par le scientifique.

Une conception sur le mode de « connaître » marque l'épistémologie réaliste. Elle présente :

La connaissance, [comme] un savoir graduellement acquis sur ce qu'est la réalité objective, posée en face du sujet ou de l'observateur. Ce savoir est tacitement entendu comme un savoir appartenant au monde réel, à la réalité en soi, c'est-à-dire celle qui existerait avant, après et en dehors de l'esprit humain (Larochelle & Désautels, 1992, p. 18).

Ce point de vue suppose qu'il existe une réalité ontologique, qu'elle est accessible à l'être humain et quelle est saisissable dans son essence. Selon ce scénario, « *le savant est perçu comme l'observateur par excellence, travaillant en toute objectivité, dévoilant peu à peu la réalité telle qu'elle est. Il joue le rôle d'un explorateur ou un découvreur de terres inconnues : il découvre les « lois de la nature » » (Ibid., p. 20-21).*

Le terme de « découverte » implique donc la croyance à l'existence antérieure de ce qu'on découvre, il est ancré dans une vision réaliste où le scientifique n'aurait qu'à révéler le monde tel qu'il est. Ainsi le savant dans son rôle d'explorateur cherche à dévoiler des lois qui existent réellement et qui sont des répliques des phénomènes observés.

Cette représentation imprègne fortement l'enseignement actuel et est renforcée par la pratique de la méthode inductive utilisée pour dégager les lois cachées de la nature. Elle se trouve aussi renforcée par le point de vue courant que véhicule bon nombre de manuels scolaires sur l'activité du scientifique, celle-ci est réduite en « *un patient travail de découverte de la réalité, basée sur une observation attentive et fidèle des faits* » (Mathy, 1997, p.125). Selon cette conception, l'activité du scientifique est principalement orientée vers la recherche des lois et des théories. Cette image de la découverte, de la recherche des lois, se dresse en obstacle et contre la vision contemporaine selon laquelle les scientifiques, dans leur quête du savoir, cherchent à résoudre des problèmes de natures différentes, ce faisant, ils sont amenés à établir des lois et des théories, à inventer des dispositifs et objets techniques, à découvrir des vaccins et médicaments, etc.

4. L'élaboration d'un contenu d'enseignement visant à montrer la diversité des démarches scientifiques et des enjeux

4.1. La transposition didactique des démarches scientifiques

4.1.1. Les démarches du physicien

Nous nous appuyons sur les démarches scientifiques, plus précisément du physicien, telles qu'elles ont été modélisées par Guillon (1996) dans sa thèse : « *Étude épistémologique et didactique de l'activité expérimentale en vue de l'enseignement et de l'apprentissage des démarches du physicien, dans le cadre des travaux pratiques de première et deuxième année d'université* ». Cette thèse servira de savoir de référence (Martinand, 1986) ou savoir expert (Joshua, 1996) sur lequel se porteront des transformations plus ou moins importantes pour en faire un savoir à enseigner et un savoir enseigné.

Les objectifs d'enseignement de la séquence innovante étant fixés pour des élèves de classe de seconde de l'enseignement tunisien, les savoirs sur les démarches introduits au niveau universitaire par Guillon sont difficilement accessibles non seulement aux élèves mais aussi au professeur qui aura la charge de guider la séquence d'enseignement en classe lors de l'expérimentation. Celui-ci n'a en effet pas de formation initiale en épistémologie des sciences. Une transposition didactique de ces démarches est donc nécessaire. Elle peut se représenter par une transformation du domaine de référence (les démarches du physicien) au domaine de l'enseignement, dans lequel sont modifiés, ajoutés ou ignorés, des éléments constitutifs du domaine de référence.

Nous détaillons ci-dessous les différentes démarches dégagées par Guillon et précisons la façon dont elles sont mises en œuvre en classe actuellement. Précisons auparavant que les relations entre les concepts, les théories, les modèles scientifiques sont complexes et qu'il faut prendre en considération deux pôles :

- le monde du réel, qui constitue le « milieu » dans lequel nous vivons et dont une partie seulement est accessible à l'observation directe ou indirecte ;
- le monde des concepts, des théories, des modèles construits collectivement par la communauté scientifique.

Cette distinction est nécessaire pour permettre la construction de nouvelle connaissance, celle-ci résultant de multiples interactions entre ces deux pôles. Cependant, le risque est grand d'identifier exactement la représentation et la réalité qu'elle représente ou de considérer le modèle comme réplique de la réalité. En effet, réalisme naïf et inductivisme imprègnent fortement l'enseignement actuel des sciences.

Guillon propose les deux schémas de droite de la figure 11 pour rendre compte du passage entre ces deux mondes ainsi qu'un troisième schéma pour la démarche mathématique.

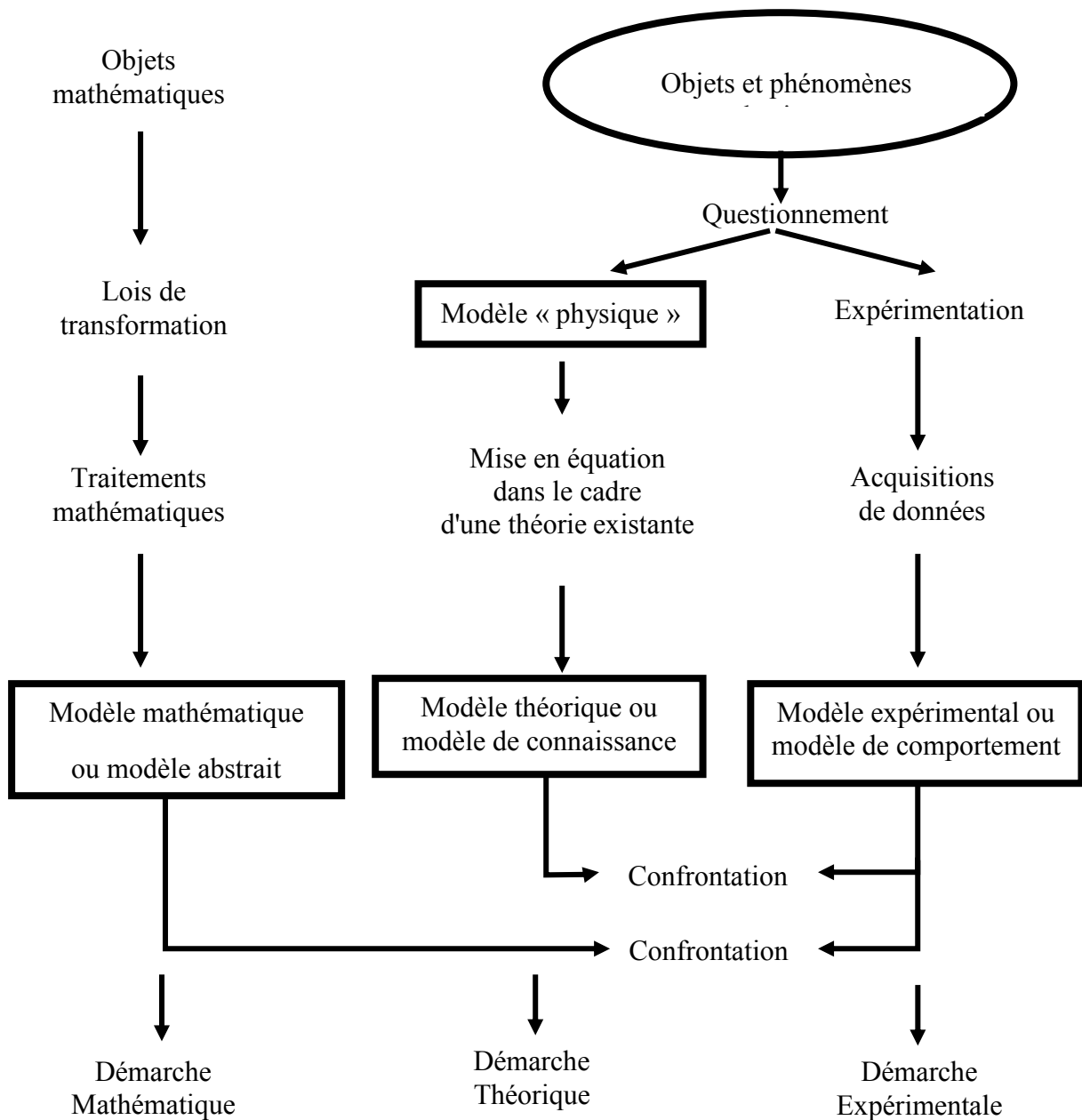


Fig. 11 : Les démarches du physicien

(D'après le schéma synoptique d'A. Guillon, 1995, p. 116)

La démarche expérimentale :

Le dictionnaire Grand Larousse (1961) propose la définition suivante : c'est « l'ensemble des moyens mis en œuvre pour atteindre un but fondé sur l'expérimentation scientifique ». D'une manière générale, les spécialistes distinguent deux types de démarches expérimentales: la démarche expérimentale du physicien (chercheur) ou savante et la démarche expérimentale scolaire.

La démarche expérimentale savante sous-tend l'élaboration de savoirs scientifiques dont les étapes sont résumées par Guillon (1996, p. 26) selon la succession : « *question- choix du système- boîte noire- choix des grandeurs d'entrée/sortie – expérience – acquisition des données- recherche du modèle expérimental* ». Notons que cette démarche n'est pas séquentielle et linéaire. Selon Develay (1989, p. 8), ces étapes peuvent être présentées de la façon suivante : « *formulation d'un problème de recherche ; émission d'hypothèses ; élaboration d'un protocole expérimental ; réalisation pratique et résultats des mesures ; analyse et interprétation des résultats* ».

Du côté de l'enseignement, la démarche expérimentale est constituée d'étapes bien déterminées qui se résument souvent en quatre (Johsua, 1989 ; Giordan, 1978) : observations, expérience prototypique, interprétation et formulation de la loi. La plupart des manuels scolaires français des années quatre-vingt dix (Robardet, 1995 ; Roletto, 1998) et la quasi-totalité des manuels tunisiens actuels adoptent encore cette démarche pour agencer les concepts et lois de sciences physiques.

En salle de classe, les élèves ne sont pas (ou rarement) impliqués dans les activités intellectuelles du physicien. En effet, pour différentes raisons, les phases suivantes sont souvent absentes et non évoquées:

- La problématisation ou la position du problème à résoudre en situation d'apprentissage n'est pas facile à gérer par l'apprenant car elle est en lien avec sa capacité à se poser des questions, à comparer une situation nouvelle avec une situation connue, à mettre en place des stratégies de résolution, etc. ;
- L'émission d'hypothèse est une activité intellectuelle qui suppose l'antériorité d'une théorie qui implique toujours des entités imaginaires dont on postule l'existence ;
- La vérification des hypothèses, une étape compliquée qui consiste entre autres à concevoir un protocole, inventorier le matériel nécessaire afin de réaliser l'expérience, n'est pas facile à gérer avec succès ni par les élèves ni par le maître ;
- La modélisation est souvent absente, les modèles sont présentés de façon dogmatique comme des évidences non questionnées et non rattachées à des problèmes.

Les élèves sont plutôt amenés à effectuer des tâches techniques telles que la réalisation de dispositifs ou de montages, à relever des mesures, à tracer des courbes, etc. Ainsi, la connexion entre l'expérience et la théorie n'est pas souvent perçue par les élèves (Guillon, 1996).

Selon Develay (1989), l'expérience²⁶ est un produit du processus d'expérimentation²⁷ qui ne représente qu'une partie de la démarche expérimentale.

Dans notre travail, pour simplifier donc, la démarche expérimentale sera enseignée à l'élève comme un processus qui s'appuie principalement sur l'expérience et permet la construction d'un savoir scientifique (modèle expérimental ou de comportement), et ce, selon une logique hypothético-déductive (fig.12).

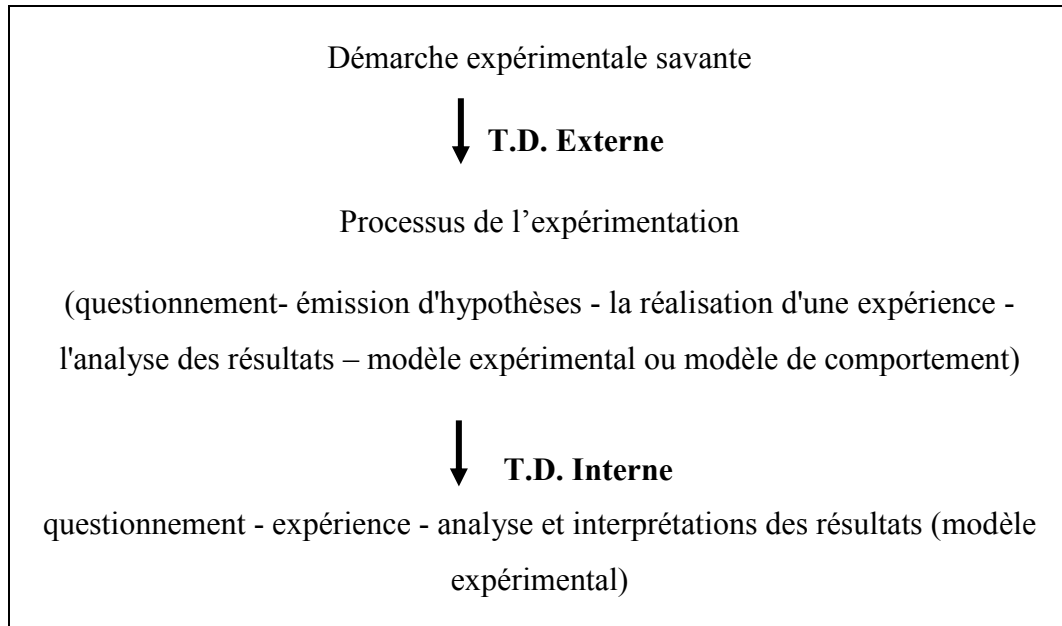


Fig. 12 : la transposition de la démarche expérimentale

La démarche théorique :

Selon Guillon (1996, p. 24), la démarche théorique savante est constituée par la succession des étapes suivantes : « *question - choix du système -choix du modèle physique - application d'une théorie - modèle théorique* ». Ces étapes peuvent être présentées de la façon suivante :

- La formulation d'un problème relatif à un phénomène physique « réel » (objet physique ou système physique) ;
- Le système physique est représenté par un schéma simplifié qui constitue le modèle physique de l'objet ou du système ;

²⁶ L'expérience est la face visible d'une activité intellectuelle souterraine généralement beaucoup plus riche et dont elle ne conserve qu'une partie. (M. Develay, sur la méthode expérimentale, Aster N°8, 1989, p. 5)

²⁷ *Ibid.*, p.5, L'expérimentation constitue le processus qui conduit à partir de l'émission de l'hypothèse à la réalisation d'une expérience et à l'analyse de ses résultats.

- Le modèle physique ainsi constitué, soumis à une analyse théorique, génère le modèle théorique qui rend compte du phénomène physique tel qu'il nous apparaît.

La démarche théorique fait abstraction du processus d'expérimentation, associe au phénomène physique, objet d'étude, une représentation (description) simplifiée susceptible d'être soumise à une étude théorique permettant de traduire la situation physique « *au moyen de règles générales pouvant être exprimées sous formes de relations littérales, de lois..., ou plus particulières sous forme de courbes, de diagrammes, constructions géométriques, d'équations numériques etc.* » (Robardet & Guillaud, 1997, p. 101). Ces relations constituent ce qu'on appelle le modèle théorique et permettent de rendre compte du phénomène étudié.

Une première approximation de la démarche théorique est celle qui figure le plus souvent dans les manuels scolaires : elle consiste à fabriquer un modèle physique, une description simplifiée de la situation en question. La mise en équation dans le cadre d'une théorie existante du modèle physique conduit à des relations physico-mathématiques : le modèle théorique ou modèle de connaissance (une loi, une théorie, une relation,...) constitue une représentation satisfaisante et utile de la situation (système ou phénomène complexe). Le modèle théorique permet donc de communiquer des connaissances à propos du phénomène ou de la situation qu'elle représente.

En salle de classe (fig.13), la démarche théorique pourrait être assimilée par l'apprenant comme suit : avec des idées en tête (une théorie), on soumet un modèle physique à un raisonnement logique permettant l'émergence d'un modèle théorique (lois, relations,...) qui rend compte de manière satisfaisante du phénomène.

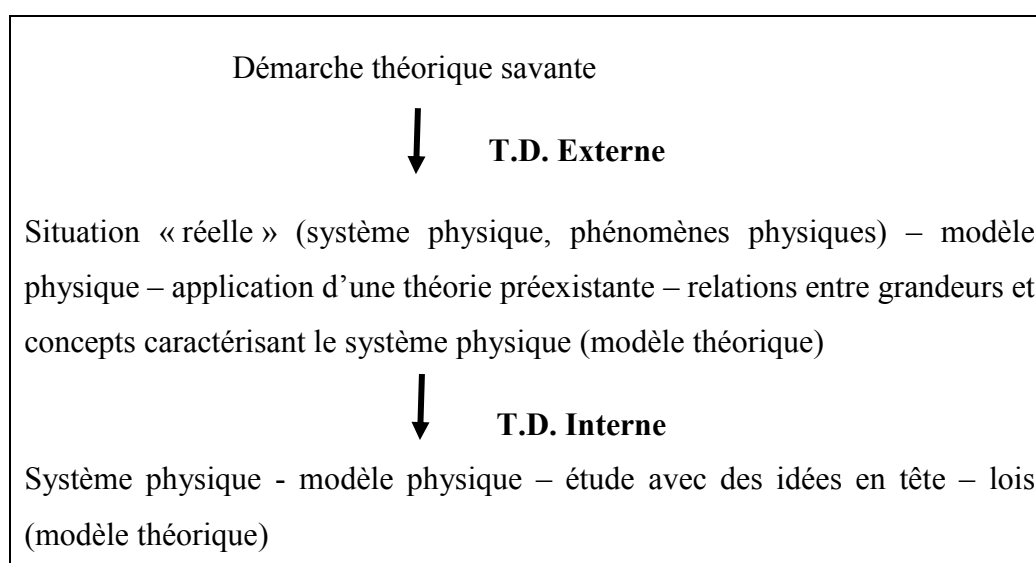


Fig. 13 : la transposition de la démarche théorique

La démarche mathématique :

Selon Guillon (1996) la démarche mathématique savante est constituée de la succession des étapes suivantes : « *objet mathématique – questionnement – choix des éléments théoriques – application de la théorie mathématique – calculs – modèle mathématique* » (p. 31).

Guillon (1995) note que la démarche « mathématique » au niveau de l'enseignement supérieur (DEUG) est mise de côté, compte tenu de la difficulté de sa mise en œuvre. Richoux (2005) fait la même constatation pour l'enseignement secondaire. Cependant, nos objectifs de recherche se distinguent des leurs : s'ils cherchent, entre autres choses, à mettre en œuvre une démarche scientifique lors des séances de TP, nous envisageons l'identification par les élèves des différents types des démarches du physicien.

Une première simplification consiste à définir l'objet mathématique en question, à préciser les lois de transformations (ou éléments théoriques), à passer aux traitements mathématiques dans le cadre d'une théorie qui conduisent à l'émergence du modèle mathématique (modèle abstrait) et qui sera confronté à l'expérience.

Pour l'élève, il s'agit de poser et résoudre des problèmes qui émergent à partir d'une situation de nature mathématique, et de procéder ensuite à des calculs avec des idées en tête conduisant au modèle mathématique (fig.14).

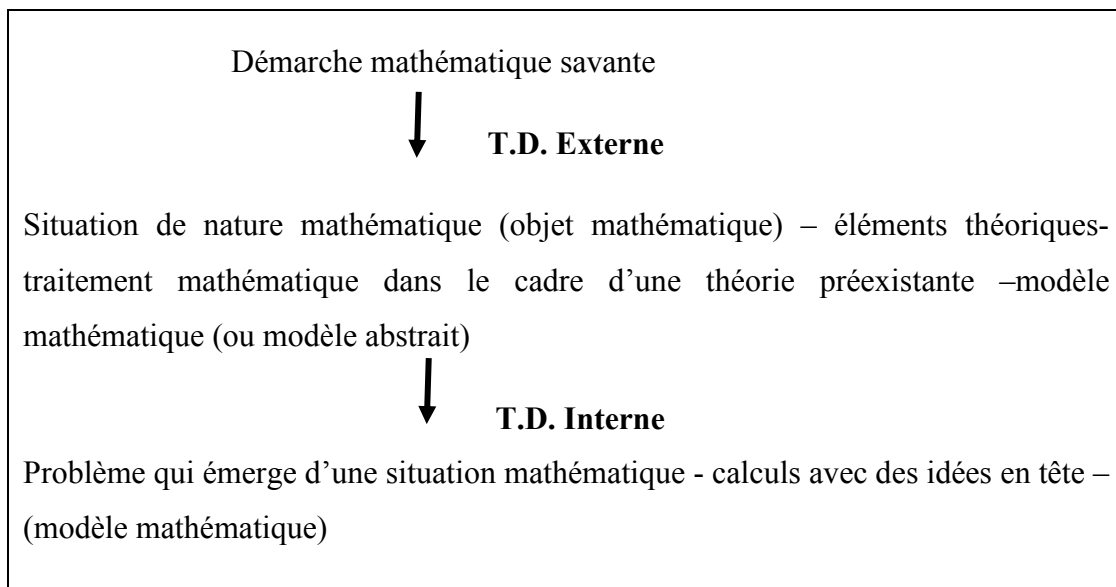


Fig. 14 : la transposition de la démarche mathématique

La démarche par analogie

En référence à une définition existant dans le lexique d'une publication de l'INRP, penser par analogie c'est rapprocher deux choses appartenant à des domaines différents, au nom d'une ressemblance entre les structures ou les rapports internes de ces choses :

Penser par analogie peut permettre de découvrir (fonction heuristique), de faire comprendre (fonction pédagogique), de se représenter (fonction figurative). En d'autres termes elle est un moyen facilitant pour passer de l'inconnu, et pour figurer ce qui est complexe à penser. Ce mode de raisonnement n'a pas de pouvoir explicatif mais peut être utilisé comme moteur de la connaissance, en mettant sur la piste d'explications qui seront validées par d'autres démarches. En établir les limites est un moyen d'en maîtriser l'usage [...] (INRP, 1985, p. 193).

L'utilisation de l'analogie est très ancienne. En mathématique pythagoricienne, elle est définie comme rapport ou proportion ($a/b = c/d$). En physique, on retrouve essentiellement l'idée de ressemblance, de similitude porteuse de sens entre éléments, qui implique elle-même l'existence à la fois de points communs et de différences. Chez Maxwell, l'analogie est définie comme correspondance entre relations de systèmes différents : « *par analogie physique, j'entends cette ressemblance partielle entre les lois d'une science et les lois d'une autre science qui fait que l'une des deux peut servir à illustrer l'autre* » (cité par Armatte, 2005, p. 94)

Selon Paty (2008), l'analogie des faits entre eux est essentiellement, pour Poincaré, de nature structurelle : elle est similitude profonde, souvent cachée sous la dissemblance apparente, mais elle n'est pas un principe d'explication. Elle figure au rang des propriétés qui constituent l'intuition.

L'analogie est utilisée par les savants de diverses façons. Ainsi, Descartes propose différentes analogies pour expliquer les propriétés fondamentales de la lumière : propagation, réflexion et réfraction. Dans le cas de la réfraction, il considère que l'action de la lumière suit les mêmes lois que le mouvement d'une balle. Maxwell procède par analogie pour élaborer sa théorie d'électromagnétisme et Einstein pour divulguer ses travaux sur la relativité restreinte difficilement accessible à un public non spécialisé.

La démarche par essais et erreurs

Cette démarche privilégie des tâtonnements expérimentaux, des essais et erreurs. Elle doit être accompagnée d'une procédure de vérification performante consistant à analyser dans quelle mesure la solution trouvée satisfait à l'ensemble des contraintes évoquées dans le problème à résoudre.

Remarquons que les démarches par analogie ou par essais et erreurs n'obéissent pas à une procédure bien structurée en étapes bien définies et ne font généralement pas appel aux analyses quantitatives. Elles se limitent le plus souvent aux intuitions, comparaisons, tâtonnements, essais et erreurs. Elles ne sont donc pas transposables.

En conclusion, dans notre travail, nous visons à démystifier chez les élèves la vision mythique de la méthode scientifique qui repose sur l'unicité de la démarche scientifique, celle qui accorde une place prioritaire à l'expérience et occulte la réflexion théorique.

Pour ce faire, nous avons fait le choix de procéder à une simplification, non tout à fait rigoureuse, afin de permettre aux élèves de distinguer de façon simple, lors de l'étude des textes, la diversité des démarches utilisées par le physicien dans sa quête de sens. Ainsi, la « démarche expérimentale » est celle qui repose sur l'expérience, la « démarche théorique » celle qui s'appuie sur un développement théorique relatif à un objet physique, la « démarche mathématique » est celle qui est fondée sur des calculs mathématiques (démonstrations) relatifs à un objet mathématique, la « démarche par analogie » est celle qui exprime une ressemblance ou similitude entre deux systèmes différents et la « démarche par essais et erreurs » est celle qui se base sur un processus de recherche qui fait appel à des tâtonnements expérimentaux, à des essais et erreurs.

En perspective, un travail similaire pourrait être envisagé avec des enseignants en formation qui, munis de définitions rigoureuses des démarches scientifiques, se chargeront de les identifier à partir de documents conçus dans ce sens.

4.2. La transposition didactique des enjeux poursuivis par les scientifiques

4.2.1. Introduction

Pour Popper, « *la science naît dans les problèmes et finit dans les problèmes* » (cité par Fourez, 2002, p.37). Dans un recueil traduit de l'allemand « *Toute vie est résolution de problèmes. Questions autour de la connaissance de la nature* », il écrit « *les sciences de la*

nature, ainsi que les sciences sociales, partent toujours de problèmes ; elles partent du fait que quelque chose suscite notre étonnement, comme le disaient les philosophes grecs » (Popper, 1994, p.13). Il poursuit en insistant sur l'idée que le problème constitue un guide et un moteur de recherche :

Les sciences... s'organisent dans le problème, dans l'étonnement à propos de quelque chose qui, tout en faisant partie du quotidien, devient justement un objet d'étonnement, un problème pour le penseur scientifique. Je prétends que tout développement scientifique ne doit pas être compris qu'en envisageant son point de départ comme un problème ou une situation problème, c'est-à-dire comme le surgissement d'un problème dans une situation déterminée de notre connaissance tout entière (Ibid., p.18).

Pour Bachelard (1938) :

L'esprit scientifique nous interdit d'avoir une opinion sur des questions cibles que nous ne comprenons pas, sur des questions que nous ne savons pas formuler clairement. Avant tout, il faut savoir poser des problèmes. Et, quoi qu'on dise, dans la vie scientifique les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique (p. 14).

Ces citations précisent bien que les activités du physicien sont guidées par des questionnements, des problèmes de natures différentes. Autrement dit, les scientifiques ne cherchent pas à établir une connaissance pour elle-même (une loi, une théorie, un objet technique, un médicament, etc.) mais à résoudre des problèmes liés à des pratiques sociales c'est-à-dire « d'une société ». Ces problèmes sont de nature théorique, ou technique, ou épistémologique, ou idéologique, etc.

4.2.2. La transposition didactique des enjeux

Les physiciens dans leurs travaux de recherche poursuivent donc une diversité d'enjeux. Les termes qui les qualifient sont difficilement accessibles aux élèves, une transposition terminologique interne se référant aux pratiques scientifiques (les enjeux) est nécessaire pour permettre aux élèves de saisir leurs sens et par la suite à les identifier à partir des « textes de savoirs » savants.

Ainsi,

- *Un enjeu est théorique* si l'activité du scientifique vise à établir une relation entre deux grandeurs ; à élaborer une loi ; à expliquer un principe ou un mécanisme de fonctionnement d'un appareil, d'un organe vivant ; etc.
- *Un enjeu est technique* si l'activité du scientifique vise des réalisations techniques (un télescope, un astrolabe, une lentille, un microscope, etc.).
- *Un enjeu est épistémologique* si l'activité du scientifique consiste en l'analyse rigoureuse des discours scientifiques et de leurs modalités de production. Elle concerne les lois, les théories, les objets techniques, etc.
- *Un enjeu est idéologique* si l'activité du scientifique est guidée par une idéologie telle que la religion (le modèle géocentrique de Kepler traduit selon lui l'harmonie du monde créée par Dieu), un courant de pensée, etc.

4.3. La transposition didactique des documents historiques originaux

4.3.1. Introduction

Dans la perspective de proposer des activités variées d'apprentissage aux élèves, nous avons élaboré un corpus de textes qui se présentent sous forme de courts documents conçus en fonction de l'objectif déclaré : les démarches utilisées et les enjeux poursuivis par les physiciens. L'élaboration de ces documents s'appuie sur des textes historiques d'origine savante dont la période s'étend de l'antiquité au XVIII^e siècle. Ces textes présentent des difficultés relatives à la compréhension du contexte de production des savoirs, du langage conceptuel et du formalisme mathématique utilisés autrefois, à la maîtrise conceptuelle des notions enseignées (démarches et enjeux), etc. Aussi, pour rendre ces textes accessibles aux élèves, il est nécessaire d'opérer un certain nombre de transformations. Correspondant à un processus de décontextualisation/recontextualisation, ces transformations consistent à extraire un savoir de son contexte initial pour le recontextualiser dans le contexte de la classe. Les transformations lexicales, la simplification, la reformulation du savoir-savant historique en fonction du niveau des élèves, associées à un processus d'équivalence terminologique, ont pour rôle de rendre accessibles les contenus à apprendre. Il s'agit donc de réaliser une transposition didactique au sens de Chevallard (1985, 1991) afin de transformer le contenu des « textes de

savoirs » historiques en savoir à enseigner puis en savoir enseigné, autrement dit en textes didactiques dont le contenu puisse être assimilé par l'élève.

4.3.2. La transposition didactique des textes historiques

Les textes historiques discutant de la dioptrique, plus précisément de la loi des sinus pour la réfraction sont nombreux. Cette abondance nous montre que la question a été centrale, et que les réponses possibles ont été multiples. Une des préoccupations communes aux textes que nous avons élaborés est la question de la diversité des démarches utilisées et des enjeux poursuivis par les physiciens dans leur quête de sens. Leur rédaction est en lien avec ces deux objectifs principaux d'apprentissage, mais d'autres objectifs secondaires, comme la diversité des savants et la diversité des lieux géographiques où les recherches ont été menées, ont été aussi visées.

Nous avons élaboré un mini-corpus de neuf textes qui se présentent sous forme de courts documents préparés en fonction des objectifs visés. Ils sont de forme homogène, caractérisés par un « point d'entrée unique » qui est ici le nom des scientifiques. Les documents présentent l'information requise pour la conduite de l'activité en salle de classe sous différentes formes (textes, schémas, dessins, etc.). L'information a généralement été extraite de textes écrits par des historiens, à partir de sources primaires, ou nous pouvons l'avoir rédigée. Notre principal objectif est en effet de proposer aux élèves des textes faciles à lire.

Le document contient une partie introductive permettant de présenter le savant en question ainsi que le contexte historique et social dans lequel il a vécu afin de préciser les conditions générales dans lesquelles a baigné son travail. Nous avons pris en considération les débats et les querelles, les incertitudes et les hésitations, voire les maladresses et les erreurs qui ont marqué le cheminement vers telle ou telle idée, les enjeux majeurs qui ont guidé à une époque donnée telle ou telle activité scientifique et les démarches ou méthodologies utilisées dans les recherches.

Si la langue n'était pas accessible, une transposition terminologique a été réalisée en vue d'exprimer les concepts anciens en langage moderne (dioptrique, anacoustique, sécante, cosécante, angle rompu, baptistir, rayon visuel, etc.). Nous avons alors envisagé de donner un lexique pour faciliter la lecture, voire de réécrire le texte sans courir, cependant, le risque de perdre ou d'affecter la substance sémantique des concepts scientifiques. Notons que le

processus d'équivalence doit aussi tenir compte du besoin d'enrichissement du vocabulaire scientifique et épistémologique des élèves mais aussi de l'enseignant. Lorsque les idées présentées étaient difficiles d'accès par manque d'information sur le contexte, nous avons accompagné le texte d'autres explications. Enfin, dans le cas d'une difficulté liée au raisonnement utilisé ou à des subtilités dans les interprétations, nous avons procédé à des reformulations, redéfinitions voire remplacement du modèle initial par un modèle construit pour le besoin d'enseignement et d'apprentissage permettant l'accès simple au contenu.

5. Le choix d'une organisation pour la situation d'enseignement

5.1. La démarche d'investigation

5.1.1. Introduction

Selon Lederman (1998), la signification du terme « inquiry » a toujours été ambiguë dans les documents de réforme à l'éducation aux sciences. Elle est au moins perçue de trois manières différentes : elle peut être considérée comme un ensemble de compétences à acquérir par les élèves lors d'une enquête scientifique, elle se réfère également à la compréhension des processus scientifiques c'est-à-dire à ce que doivent comprendre les élèves à propos de l'investigation scientifique et enfin, elle porte strictement sur la pédagogie. Pour la dernière, beaucoup de chercheurs et éducateurs pensent que les élèves apprennent mieux les sciences à travers une approche d'investigation orientée vers l'enseignement. Ce point de vue est semblable à celui proposé par la National Research Council (NRC, 1996, p. 23) qui stipule que:

Scientific inquiry refers to the diverse ways in which scientists study the natural world and propose explanations based on evidence derived from their work. Inquiry refers also to the activities of students in which they develop knowledge and understanding of scientific ideas, as well as an understanding of how scientists study the natural world.

L'idée de l'investigation comme approche pédagogique utilisée pour transmettre les connaissances scientifiques aux élèves est celle que les documents de réforme de l'éducation scientifique communiquent le plus fréquemment de manière inconsciente aux enseignants selon Lederman (1998). Nous nous intéressons à cette approche qui est couramment désignée dans les pays francophones par la démarche d'investigation.

Dans la suite nous définissons la démarche d'investigation, précisons les critères permettant de la caractériser, l'approche privilégiée pour la mettre en œuvre, les références pour la construction des savoirs scientifiques (épistémologiques) et pour les méthodes d'enseignement – apprentissage et le type de situations compatibles avec cette démarche.

5.1.2. Contexte

Le recours à un enseignement basé sur l'investigation répond à plusieurs objectifs qui sont explicités dans les standards et les documents de références de plusieurs pays. Pour certains, il faut modifier la manière d'enseigner pour stimuler l'intérêt des élèves et lutter contre la désaffection pour les études scientifiques : rapport du High Level Group on Science Education (HLGSE, 2007) qui préconise l'enseignement scientifique fondée sur l'investigation (inquiry-based science education – IBSE) à l'échelon européen. Pour d'autres, il faut modifier les méthodes d'enseignement, surtout celles qui ont montré leurs insuffisances, et adopter des stratégies d'enseignement plus efficaces et attrayantes (NRC, 2000), et ce, pour apprendre aux élèves les concepts et les principes, et les engager de manière plus active dans le processus d'apprentissage. Les auteurs disent que *«students are much more likely to understand and retain the concepts that they have learned this way»* (cité par DeBoer, 2004, p. 33).

DeBoer assigne à l'investigation scientifique comme approche pédagogique plusieurs buts. Parmi ceux-ci, il en juge deux importants : le premier serait la préparation de futurs scientifiques, des scientifiques potentiels doivent s'engager dans les investigations scientifiques et acquérir de l'expérience en tant que scientifiques en formation. Cette approche permet d'offrir aux élèves une image plus conforme de l'activité scientifique, ainsi ils deviennent de plus en plus *«familiar with the methodologies used in the various disciplines, with appropriate equipment and with ways of taking and recording measurements. They need to learn how to collect data, how to analyze it, and how to test it against their predictions»*. (Ibid., p.19)

Le second but relève de la culture scientifique et de la promotion à la citoyenneté. Il concerne le développement de citoyens qui puissent:

Not become scientists themselves, but how will be autonomous, independent thinkers. As informed citizens they should have an inquisitive and questioning attitude and a faith in their ability to ask an important questions and seek answers to those questions, be able to solve problems by drawing together necessary resources and work alone or others on project to see them through to completion. (Ibid., p.19)

L'enseignement par investigation peut être aussi recommandé comme outil pédagogique pour valoriser les expériences (« la main à la pâte ») afin d'accomplir d'autres objectifs tels la compréhension des méthodes des sciences et de ses contenus « *it has long been recognized that the direct hands-on experience that accompanies scientific investigations is an important way to strengthen not only understanding of the methods of science, but also the content and principles of sciences* » (Ibid., p.19).

La France n'échappe pas à cette volonté partagée par un grand nombre de pays dans le monde, elle tente de modifier la manière d'enseigner les sciences. La démarche d'investigation, objet d'enseignement apparu pour la première fois dans les programmes de collège (BO, 25 Août 2005) privilégie la construction du savoir par les élèves, tend à leur inculquer une image plus conforme de l'activité scientifique et leur propose des tâches plus ouvertes et moins guidées au sein desquelles l'expérimentation occupe une place principale. Le canevas d'une séquence d'investigation, proposé dans les programmes depuis 2005 et présenté dans le Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008, comporte sept moments essentiels, et ce, dans le but de guider le travail de l'enseignant lors des phases de préparation de la séquence et lors de sa mise en place dans la classe.

- 1- le choix d'une situation-problème par le professeur ;
- 2- l'appropriation du problème par les élèves ;
- 3- la formulation de conjectures, d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles ;
- 4- l'investigation ou la résolution du problème conduite par les élèves ;
- 5- l'échange argumenté autour des propositions élaborées ;
- 6- l'acquisition et la structuration des connaissances ;
- 7- l'opérationnalisation des connaissances.

Notons que les auteurs relativisent la présentation de ce canevas et considèrent que « l'ordre dans lequel [les moments] se succèdent ne constituent pas une trame à adopter de manière linéaire », ils conseillent de l'utiliser avec souplesse, le passage par tous les moments de la démarche d'investigation n'étant pas systématique.

En Tunisie, les programmes officiels des sciences physiques de 1^{ère} année et 2^{ème} année de l'enseignement secondaire (2010) recommandent d'impliquer les élèves « *régulièrement dans des activités d'investigation, de structuration et d'intégration, dans toute les situations d'apprentissage, aussi bien en cours qu'en travaux pratiques* » (p. 6) sans toutefois préciser les références et les modalités pratiques de sa mise en œuvre.

5.1.3. Repères pour les démarches d'investigation dans l'enseignement des sciences.

La présentation de la démarche d'investigation dans les programmes de collège en France, considère que « cette démarche n'est pas unique » et qu'« elle n'est pas non plus exclusive », elle met l'accent sur la construction du savoir par l'élève, autrement dit, l'accent est mis sur ce que doivent faire les élèves. L'enseignant est invité à jouer le rôle de médiateur, au sens de Weil-Barais et Dumas-Carré (1998), qui aide les élèves dans leurs investigations et les guide dans leurs travaux.

La démarche d'investigation telle qu'elle est présentée dans les programmes officiels de collège en France est structurée autour de l'idée de « situation problème ». Cette notion de situation problème se retrouve dans les nouveaux programmes de seconde qui en font le cœur de l'exercice de l'activité expérimentale (BO, 29 avril 2010). Cette situation doit être élaborée par l'enseignant à partir de l'analyse des savoirs visés, des acquis initiaux des élèves et des obstacles cognitifs et erreurs. Il est également précisé que cette démarche s'appuie sur le questionnement des élèves sur le monde réel. Les investigations en vue de la résolution du problème sont menées par les élèves qui sont invités à formuler des hypothèses et à élaborer des protocoles expérimentaux afin de tester leurs hypothèses par l'expérience. Elles constituent des moments de débat interne aux groupes d'élèves et débouchent sur la construction de savoirs, de compétences méthodologiques et sur la mise au point de savoir faire technique. Ainsi posée, la démarche d'investigation s'affiche comme une stratégie d'enseignement relative à l'efficacité des apprentissages qui semble s'inscrire dans une perspective socioconstructiviste où les temps d'échanges et de confrontation d'idées permettent une meilleure motivation des élèves, un développement de l'esprit d'initiative, de la curiosité et de la créativité en lien avec l'autonomie.

Par ailleurs, Pélissier, Venturini et Calmettes (2007) dégagent en plus de l'aspect didactique relatif à l'efficacité de la transmission des savoirs scientifiques, un deuxième aspect, d'ordre épistémologique, qui vise à transmettre aux élèves la manière dont fonctionne la science au travers des pratiques de classe.

Une revue de la littérature de langue anglaise sur l'enseignement fondé sur l'investigation, inquiry –based science education en Europe ou inquiry –based science teaching dans plusieurs pays anglo-saxons révèle dans la plupart des cas des similarités avec ce qui précède. Ainsi, les

auteurs du projet 2061 de « Science for all Americans » recommandent que l'enseignement des sciences soit compatible avec la nature de la recherche scientifique. En conséquence:

Students need to get acquainted with the things around them - including devices, organisms, materials, shapes, and numbers - and to observe them, collect them, handle them, describe them, become puzzled by them, ask questions about them, argue about them, and then try to find answers to their questions. [...] Students should be given problems [...] that require them to decide what evidence is relevant and to offer own interpretation of what the evidence means (AAAS, 1989, p. 201, cité dans De Boer, 2004, p.32).

De son côté, La National Science Education Standards met l'accent sur l'enseignement par investigation comme stratégie d'enseignement efficace pour bien appréhender les concepts, principes, modèles et théories. Cet enseignement est décrit comme «*a set of interrelated process by which [...] students pose questions about the natural world and investigation phenomena, in doing so, students acquire knowledge and develop a right understanding of concepts, principles, models and theories.*» (NRC, 2000, p. 214, cité dans DeBoer, 2004, p.32). DeBoer (2004) précise que dans les deux Standards, Science for All Americans et National Science Education Standards, il y a reconnaissance de l'importance de l'enseignement par investigation pour donner une représentation exacte de la recherche scientifique, pour contribuer au développement intellectuel personnel, et pour offrir une façon de penser utilisée dans la résolution des problèmes quotidiens.

La démarche d'investigation préconisée aujourd'hui semble répondre à la définition de Linn, Clark et Slotta (2003):

We define inquiry as engaging students in the intentional process of diagnosing problems, critiquing experiments, distinguishing alternatives, planning investigations, revising views, researching conjectures, searching for information, constructing models, debating with peers, communicating to diverse audiences, and forming coherent arguments .» (Linn et al., 2003, p. 518, cité par Hammoud et al., 2010, p. 69).

Les résultats attendus sont davantage d'autonomie et une meilleure motivation des élèves.

À propos de la démarche d'investigation, Mathé, Méheut et de Hosson (2008) affirment se retrouver devant un problème de transposition didactique au sens de Chevallard (1991) du « savoir savant » (les démarches de la science) au « savoir à enseigner » (la démarche d'investigation telle qu'elle est décrite dans les directives officielles) ».

La plupart des curricula et standards scientifiques accordent une place primordiale dans la démarche d'investigation à la conception d'activités expérimentales par les élèves (Mathé, 2010). Millar (1996), Morge et Boilevin (2007) considèrent que la définition proposée est trop restrictive puisqu'elle ne retient que les situations dans lesquelles le protocole expérimental est à inventer et exclut toute situation de recherche dans laquelle le phénomène est donné, où l'expérience n'est pas à construire. Ces derniers définissent, à partir d'un ensemble de situations proposées dans la littérature didactique, des critères permettant de caractériser une démarche d'investigation :

- 1) *l'élève effectue un ou des apprentissages au cours de la séquence...*
- 2) *...en réalisant des tâches qui ne sont pas uniquement des tâches d'ordre expérimental*
...
- 3) *... et en participant à la recherche de validité des productions des autres élèves, autrement dit en participant au choix argumenté entre plusieurs méthodes, plusieurs hypothèses, plusieurs protocoles expérimentaux, plusieurs explications, plusieurs modèles .(p.31- 40)*

Ils soulignent l'existence de différents types de situation d'investigation. Certaines sont caractérisées par un enchaînement précis de tâches (situation problématique ouverte, situation de jeu ou dite adidactique, situation PACS pour Prévission, Argumentation, Confrontation, Synthèse), contrairement à d'autres (situation-problème, situation de modélisation).

Ces auteurs privilégient pour la construction scientifique des savoirs la référence à la pratique de la recherche scientifique qui comporte, comme la démarche d'investigation, un problème à résoudre, un travail en groupes et des échanges.

De Vecchi et Carmona (2007) ainsi que Maurines et Beaufils (2009, 2011) considèrent qu'investigation n'est pas synonyme d'expérimentation et que des documents peuvent être introduits à tous les moments d'une situation d'investigation pour réaliser différentes tâches. Pour ces derniers, les documents peuvent, en particulier, aider à émettre ou valider des hypothèses relatives à la nature des sciences.

Lunetta, Hofstein et Clough (2007) proposent de travailler avec les élèves, lors d'une situation d'investigation, les savoirs scientifiques mais aussi des questions d'ordre historique et épistémologique : nature de la science, construction des savoirs, statut des modèles, de l'expérience et des théories.

De notre côté, nous pensons que la démarche d'investigation est une démarche didactique ne servant pas uniquement à enseigner les savoirs scientifiques mais aussi les savoirs sur les sciences, en particulier les démarches scientifiques et les enjeux associés aux pratiques scientifiques.

Nous retenons qu'investigation n'est pas synonyme d'expérimentation et que des documents peuvent être introduits à tous les moments d'une situation d'investigation pour réaliser différentes tâches. Les élèves effectuent donc, un ou des apprentissages en réalisant des activités qui ne sont pas uniquement d'ordre expérimental et en participant à la recherche de validité des productions des autres élèves. En outre, il est possible de travailler avec les élèves les savoirs scientifiques mais aussi des questions d'ordre historique et épistémologique.

5.2. Démarche d'investigation et situation-problème

La démarche d'investigation présentée dans les programmes de 5ème s'articule autour du choix d'une situation-problème par l'enseignant. La situation-problème a été décrite par Brousseau (1983) : il s'agit « *...non pas de communiquer les informations qu'on veut enseigner, mais de trouver une situation dans laquelle elles sont les seules à être satisfaisantes ou optimales - parmi celles auxquelles elles s'opposent -pour obtenir un résultat dans lequel l'élève s'est investi.* » (cité dans Robardet, 1989, p. 64). Cette notion de situation-problème s'est particularisée chez Meirieu (1988), Astolfi (1993), Fabre (1999) autour de l'idée d'obstacle cognitif dont le franchissement serait source de progression :

Il est proposé aux sujets de poursuivre une tâche. Cette tâche ne peut être menée à bien que si l'on surmonte un obstacle qui constitue le véritable objectif d'acquisition du formateur. Grâce à l'existence d'un système de contraintes le sujet ne peut mener à bien le projet sans affronter l'obstacle. Grâce à l'existence d'un système de ressources, le sujet peut surmonter l'obstacle (Meirieu, 1988, cité dans Robardet, 1989, p. 64).

On retrouve ici les traits d'une épistémologie « bachelardienne » dans laquelle le problème à résoudre apparaît comme une anomalie au regard de ce qui est attendu (Mathé & al., 2008). Ce sont là les fameux « obstacles épistémologiques », c'est-à-dire les facteurs inconscients qui nuisent à l'appréhension des concepts.

Robardet (1989) dégage les attributs d'une situation-problème :

- la recherche de la situation ne sera entreprise qu'après l'identification parfaite de l'obstacle à franchir celui-ci constitue l'objectif pédagogique ;

- la situation doit être concrète et non épurée, c'est-à-dire, elle doit faire référence à la vie « réelle » ;
- l'élève doit être conduit à « *formuler ses conjectures* » et « *sera ainsi contraint d'explicitier ses représentations* » ;
- le problème présente un caractère énigmatique mais doit être à la portée de l'élève ;
- l'élève ne doit pas disposer dès le départ des instruments de la résolution. « *C'est le besoin de résoudre qui doit conduire l'élève à élaborer ou à s'approprier les instruments de la résolution* » ;
- « *la formulation de conjectures vise à révéler à l'élève l'écart qui existe entre ses représentations et les faits* ». (p. 65)

Elle devrait générer un débat cognitif et sociocognitif entre les élèves qu'il conviendra de gérer avec soin, en vue de promouvoir la construction d'un savoir scientifique en faisant évoluer favorablement leurs représentations.

Mathé (2010) distingue une forte ressemblance entre la « situation-problème » envisagée dans une démarche d'investigation et le « problème anomalie » de Kuhn (1962). Dans les deux cas le problème émerge de l'observation d'un phénomène non conforme aux attentes, aux idées a priori de l'observateur, qu'il soit élève ou scientifique.

5.3. Démarche d'investigation et socio-constructivisme

Dans la présentation de la démarche d'investigation par les programmes de collège en France, les savoirs scientifiques sont construits par un sujet en quête de connaissance, ils sont inventés, négociés et argumentés, souvent dans le cadre d'une entreprise collective. Les connaissances sont ainsi construites par le sujet, en interaction avec un milieu pour apprendre, dans un contexte social (les pairs, l'enseignant) dans lequel la médiation de tutelle est privilégiée (Bruner, 1983). Ainsi, lors des investigations, l'enseignant délègue la réalisation des tâches à ses élèves. Ceux-ci peuvent observer un phénomène, émettre des hypothèses, concevoir un protocole expérimental, modéliser une situation, élaborer des productions en réponse aux tâches, rechercher la validité de leurs productions, confronter les preuves qui fondent leurs arguments et s'écoutent en se respectant. À l'enseignant, incombe le rôle du « guide – médiateur » des investigations qui consiste à enrichir le questionnement, à inscrire l'activité dans une démarche cohérente, à susciter le raisonnement, à favoriser le dialogue et les échanges entre les groupes lors des argumentations et confrontations des idées, à inciter au doute et à la critique et à instaurer un conflit socio-cognitif constructif. Dans ce contexte les savoirs peuvent être co-construits par les élèves et l'enseignant.

D'un point de vue didactique, selon Larcher et Schneeberger (2007), les principes constructivistes sont affirmés dans la démarche d'investigation ; chez Morge et Boilevin (2007), les situations d'apprentissage reposent sur l'hypothèse socio-constructiviste ; pour Calmettes (2008b) « le constructivisme et le socio-constructivisme apparaissent à la fois des références épistémologiques (construction des savoirs scientifiques) et des références pour les méthodes d'enseignement-apprentissage ».

5.4. Démarche d'investigation et démarche hypothético-déductive

Depuis l'émergence des sciences expérimentales au XVII^e siècle, deux grands types d'approches prétendent caractériser les démarches propres aux sciences : la première est centrée sur l'induction, « la démarche inductive », la seconde sur la déduction, « la démarche déductive ».

Le raisonnement inductif considère que les lois et théories résultent de l'observation et de l'expérience première et que le réel est source de savoir. Il s'agit de formuler des généralités ayant le statut de « vérités » à partir d'un nombre important de récurrences observées dans la nature ou à travers des expériences. Cette démarche sous-entend que les lois existent dans la nature et sont indépendantes du savant.

Robardet et Guillaud (1997) précisent les principes fondamentaux de l'inductivisme comme suit :

- *l'observation fournit une base sûre et objective à partir de laquelle peuvent être extraits des énoncés singuliers constituant les faits.*
- *l'observation est première et indépendante de la théorie.*
- *le raisonnement par induction et généralisation est légitime pour valider les énoncés généraux que sont les lois à partir des énoncés singuliers constituant les faits. (p.25)*

La conception inductiviste de la démarche scientifique a été la cible de nombreux critiques, notamment des épistémologues (Bachelard, 1938 ; Popper, 1985 ; Chalmers, 1987) qui dénie toute valeur opératoire à l'induction comme démarche de construction du savoir scientifique. Selon Popper, l'activité scientifique ne commence ni par l'observation ni par l'expérimentation, elle commence par l'émission de conjectures, issues de faits expérimentaux qui resteront valides jusqu'à leur réfutation (contradiction par un fait particulier ou falsifié). En conséquence, si une théorie scientifique n'est pas falsifiée, elle reste toujours une hypothèse ou une conjecture.

Le critère de falsification proposée par Popper ne se trouve pas en totale compatibilité avec l'histoire des sciences. En effet, l'histoire révèle que des hypothèses, indiscutablement démenties par l'observation ou l'expérience ont été, néanmoins, maintenues. Ce n'est donc pas seulement à l'expérience fondée sur l'observation que revient la charge de la preuve, encore faut-il que le résultat énoncé soit admis par la communauté scientifique du moment. Ainsi, Kuhn (1970) et d'autres épistémologues ajoutent un critère d'ordre social, celui de l'intersubjectivité, étendu comme le résultat de la confrontation entre arguments, points de vue et représentations de plusieurs chercheurs.

Le raisonnement déductif hérité d'Aristote consiste en la déduction des faits à partir de vérités générales. Dans cette démarche la théorie est première, le réel n'est plus source de savoir mais objet de confrontation avec le savoir, et l'expérience ne sert qu'à vérifier la proposition déduite. Kuhn (1970), Popper (1985) et Chalmers (1987) s'accordent que l'observation n'a de sens qu'à travers une théorie préexistante, c'est la théorie qui donne son sens aux faits et non l'inverse. Dans ce cadre, les lois ne sont plus des objets à découvrir, mais des modèles à construire par les humains, imparfaits et teintés d'une forme de subjectivité.

Comme le souligne Grandit, Triquet et Guillaud (2010), la « clé de voûte » des démarches déductives est l'hypothèse dont l'importance est bien affirmée. En effet, « *il s'agit là d'une hypothèse qui est le fruit d'un travail de la pensée sur les faits et les idées déjà en place, qui gouverne toute la conduite du scientifique* » précisent les auteurs (p. 2).

Si Claude Bernard (1865) affirme que la méthode scientifique (la méthode expérimentale) repose entièrement sur la « vérification » expérimentale d'une hypothèse scientifique, Grandit et al (2010) précisent, de leur côté, que le test de l'hypothèse n'est pas nécessairement expérimental. Pour eux, « *c'est la soumission de l'hypothèse au réel ou à défaut à un substitut du réel qui est déterminante dans cette démarche* ». (*Ibid*, p. 2)

Robardet et Guillaud (1997) présentent une démarche didactique « constructrice du savoir scientifique » inspirée de la démarche déductive et qualifiée « d'hypothético-déductive » qu'ils décrivent ainsi :

Un enseignement rénové s'efforcera de partir d'une situation problématique, d'une question proposée aux élèves, de l'évocation ou de la monstration d'un phénomène. Ceux-ci conduits par l'enseignant dans une démarche de résolution de problème, devront formuler des hypothèses compatibles avec leurs connaissances du moment et leurs

conceptions. L'expérience sera alors élaborée dans le but de mettre ces hypothèses à l'épreuve. L'expérience, alors « expérience test », permettra d'effectuer le tri entre les hypothèses plausibles. Le résultat de l'expérience conduira éventuellement à poser de nouvelles hypothèses qui devront être soumises à une nouvelle expérience-test. Lorsqu'on aura ainsi élaboré une réponse acceptable pour le problème initial, on cherchera à bien définir le domaine de validité de cette réponse. Cela conduira à élargir le champ de référence au-delà de celui de la situation initiale. C'est généralement à l'issue de ce travail que les concepts pourront être définis de manière opératoire et que les résultats peuvent être institués sous la forme d'une loi.

La démarche que nous venons de décrire [...] est parfois qualifiée d'« hypothético-déductive » (pp. 85-86).

Nous constatons que le canevas proposé de la démarche d'investigation dans les programmes de collège en France s'apparente fortement avec la présentation de Robardet et Guillaud sus citée.

Sophie Roux (2007), épistémologue, donne la description suivante de la démarche hypothético-déductive :

Soit H une hypothèse théorique qui est conforme à toute les données dont on dispose. On en déduit une conséquence nouvelle, qui est expérimentalement testable. De deux choses l'une :

- i. soit cette conséquence nouvelle se révèle contraire à l'expérience, on considère alors que l'hypothèse est infirmée ou encore réfutée par l'expérience E ;*
- ii. soit l'expérience est telle qu'on l'avait prévu par déduction, on considère alors que l'hypothèse est confirmée par E (ou corroborée = non-infirmée, si l'on tient à avoir la prudence poppérienne). (cité par Mathé, 2010, p. 31).*

La démarche « hypothético-déductive » est donc proposée comme une alternative souhaitable à l'inductivisme prégnant dans l'enseignement des sciences (Désautels et al. 1993 ; Robardet & Guillaud, 1997). Elle peut s'avérer commode pour mettre en œuvre un enseignement basé sur l'investigation comme les programmes en France le suggèrent.

5.5. Démarche d'investigation et situation adidactique

Selon Brousseau (1988), une situation a pour fonction de modéliser et de contextualiser l'environnement spécifique d'un savoir ou d'un de ses aspects. Elle « désigne l'ensemble des circonstances dans lesquelles une personne se trouve, et des relations qui l'unissent à son

milieu » et où se manifeste directement ou indirectement une volonté d'enseigner (Brousseau, 1986). L'élève apprend en s'adaptant à un milieu qui est facteur de contradictions, de difficultés et de déséquilibres. Le savoir, fruit de l'adaptation de l'élève, se manifeste par des réponses nouvelles qui sont la preuve de l'apprentissage. Construire une situation revient donc à structurer un milieu au sein duquel le savoir enseigné va pouvoir prendre tout son sens pour l'élève.

Le milieu chez Brousseau est défini comme un milieu antagoniste avec lequel l'élève (actant) interagit. Il est composé selon Perrin-Glorian (1998) de trois composantes – non indépendantes que Calmettes (2009) classe de la manière suivante :

- *La composante matérielle est constituée de données objectives, matérielles ou non.*
- *La composante cognitive comporte des savoirs stables, institutionnalisés, nécessaires pour mettre en place un mode de résolution.*
- *La composante sociale est constituée des autres acteurs qui peuvent intervenir dans la résolution : partenaires, autres élèves, professeur.*

Selon la nature de l'interaction entre l'actant et le milieu, Brousseau (1998) envisage deux situations:

- *La situation est didactique* lorsqu'un « actant organise un dispositif qui manifeste son intention de modifier ou de faire naître les connaissances d'un autre actant et lui permet de s'exprimer en actions. »
- *La situation adidactique* modélise la production de connaissances de l'élève sans la médiation directe du professeur, autrement dit, « le maître se refuse à intervenir comme proposeur des connaissances qu'il veut voir apparaître ». L'élève devient, au moins pour un temps, responsable dans la construction de ses apprentissages. En ce sens, les démarches d'investigations paraissent compatibles avec les situations adidactiques.

Conclusion

On peut penser que, dans une démarche d'investigation de type «situation problème», adidactique et socio-constructiviste, les apprenants, en interaction avec un milieu qui prend en compte les objets matériels, les connaissances initiales, les interactions entre pairs, vont produire les comportements qui permettent la construction des connaissances attendues. Les concepts et les savoirs scientifiques y apparaissent comme construits selon une approche hypothético-déductive.

Partie 3

Conception de l'étude

Chapitre 1: Méthodologie 1 : conception de la situation d'enseignement innovante et de la formation de l'enseignant

Chapitre 2 : Méthodologie 2 : élaboration et traitement des questionnaires

Chapitre 1

Méthodologie 1 : conception de la situation d'enseignement innovante et de la formation de l'enseignant

1. Introduction

Notre objectif était d'élaborer et de valider une séquence d'enseignement pour la classe de seconde de l'enseignement secondaire tunisien. Afin d'enrichir la banque de séquences innovantes élaborées par le groupe DidaScO dans le domaine de l'optique, nous avons décidé d'en concevoir une. Nous avons choisi un thème au programme de la classe de seconde pour lequel nous connaissions l'apport important des savants des pays arabo-musulmans au Moyen-Âge. Il relève de l'optique géométrique, plus particulièrement de la dioptrie : il s'agit de la loi des sinus pour la réfraction.

Notre démarche de recherche relève de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988). Le processus de validation de l'expérimentation en classe est interne et repose sur la confrontation entre analyse *a priori* et *a posteriori*. Elle prend en compte non seulement les élèves mais aussi l'enseignant, acteur essentiel de toute situation d'enseignement. La conception de cette ingénierie a dû tenir compte de différentes contraintes liées au contexte éducatif tunisien. Après une brève description de cette méthodologie de recherche, nous présentons un panorama de l'expérimentation réalisée puis détaillons comment la séquence innovante a été élaborée et expérimentée, et l'enseignant formé.

2. Ingénierie didactique

2.1. Définition

S'appuyant sur les travaux de Yves Chevallard, Artigue (2002) définit le concept d'ingénierie didactique de la façon suivante :

L'expression « ingénierie didactique » apparaît dans la didactique des mathématiques française, au début des années 80, comme un moyen de répondre à deux questions fondamentales (Chevallard, 1982) :

- *Comment prendre en compte la complexité de la classe dans les méthodologies des recherches ?*
- *Comment penser les relations entre recherche et action sur les systèmes d'enseignement?*

Elle précise que ce concept est étroitement lié à la théorie des situations :

Comprendre le concept d'ingénierie didactique, c'est donc d'abord comprendre ce concept dans ses relations avec la théorie des situations didactiques. Elles ont conditionné sa naissance et ont façonné son évolution ultérieure (cité par Emprin, 2007, p.222).

Selon Annie Bessot, Guy Brousseau considère que l'ingénierie didactique est au cœur de la didactique en étant à la fois :

- *l'indispensable instrument de confrontation de la science didactique avec la contingence,*
- *l'instrument et l'objet des observations,*
- *et le moyen de mise en œuvre et de diffusion de ses résultats vers les enseignants et le public (cité dans cours 2, Artigue, 2009, p.3).*

Elle est vue comme une méthodologie de recherche qui se différencie des autres types de méthodes expérimentales et qui possède les deux principales caractéristiques :

- *être une méthodologie de recherche caractérisée 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,*
- *être une méthodologie dont la validation est essentiellement interne, fondée sur la confrontation entre analyse a priori et analyse a posteriori (et non externe basée sur la comparaison des performances de groupes expérimentaux et témoins) (cours 1 Artigue, 2009, p. 6).*

Notons que les objectifs de recherche associés à une ingénierie didactique peuvent être divers et ne se limitent pas à l'apprentissage de notions mais peuvent s'étendre aux recherches qui visent l'étude des processus d'apprentissage d'un concept donné tels que « *les travaux sur l'apprentissage de méthodes et le travail en groupe* » (Douady, 1987, cité par Artigue, 1996, p.248)

2.2. Les différentes phases de la méthodologie d'ingénierie didactique

Artigue (2009) explicite quatre phases du cadre de la méthodologie de l'ingénierie didactique qui balisent et orientent l'itinéraire de la recherche, elle écrit :

Chaque « lesson study » particulière nécessite un travail d'ingénierie didactique spécifique incluant analyses préalables et analyses a priori collectives, implémentation dans une classe, et un dispositif spécifique d'analyse a posteriori pouvant conduire à sa révision (cours2, p.2)

1. Les analyses préalables

La préparation de la phase de conception qui suivra nécessite de faire émerger les connaissances liées au domaine étudié en s'appuyant sur un certain nombre d'analyses préliminaires qui prennent en compte les objectifs de la recherche. Ces analyses préalables concernent le plus souvent:

- l'analyse épistémologique des contenus visés par l'enseignement ;
 - l'analyse de l'enseignement usuel et de ses effets ;
 - l'analyse du champ de contraintes dans lequel va se situer la réalisation didactique effective ;
 - l'analyse des conceptions des élèves, des difficultés et des obstacles rencontrés.
- (Artigue 1996, pp. 249-250)

2. La conception et l'analyse a priori de situations didactiques

Cette seconde étape se fait en deux temps. La conception de l'ingénierie renvoie à l'intention du chercheur et repose sur la sélection de variables :

- « macro-didactiques » ou « globales » relative à l'organisation globale de l'ingénierie ;
- « micro-didactiques » ou « locales » relatives à l'organisation des séquences d'enseignement – apprentissage.

L'analyse a priori est à concevoir comme une analyse du contrôle du sens, elle a donc pour objectif de déterminer en quoi les choix effectués permettent de contrôler les comportements des élèves et leur sens. Elle va se fonder sur des énoncés hypothétiques qui seront vérifiés au cours de la phase suivante et validés par la confrontation entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori*.

3. Expérimentation ou implémentation

C'est la phase classique de la conduite de la situation d'apprentissage qui comprend la construction et la position du problème, sa dévolution aux élèves, sa résolution et l'institutionnalisation par l'enseignant. Elle doit permettre un recueil de données diverses, éclairant l'objet de la recherche.

4. L'analyse *a posteriori* et l'évaluation

L'analyse *a posteriori* et la validation interne s'appuie sur l'ensemble des données recueillies lors de l'expérimentation : observation directe ou à l'aide d'un enregistrement vidéo de la séquence d'enseignement, productions des élèves en classe et hors classe. Pour compléter ces données, on recourt le plus souvent aux informations 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. La validation des hypothèses de la recherche se fonde sur la confrontation entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori*.

3. Panorama de la recherche

Le contexte de recherche n'a pas permis de co-construire la séquence d'enseignement avec l'enseignant qui allait la tester comme dans les groupes Sésame ou dans le projet IHPST, ce qui aurait permis une formation de cet enseignant. Ce processus, qualifié de symbiotique par Höttecke et al (2010), semble le plus efficace pour permettre aux enseignants de mettre en place un enseignement prenant en compte une dimension épistémologique (Pélissier, 2011).

La conception de la séquence d'enseignement par le chercheur s'est appuyée sur des études préalables complémentaires dont une analyse historique et épistémologique de la dioptrique. Celle-ci a permis de délimiter les objectifs d'apprentissage épistémologiques et d'élaborer les documents servant de support à la situation d'enseignement.

Les études didactiques nous ont permis de définir des activités pour les élèves et l'enseignant dans le cadre d'une démarche d'investigation (démarche d'enseignement recommandée par les programmes) et les outils de suivi de l'expérimentation.

Le contexte n'a pas permis d'expérimenter nous-même la séquence que nous avons élaborée pour que l'innovation soit mise en place au plus près des intentions didactiques sous-jacentes. Il a été nécessaire de former l'enseignant car une simple transmission de la séquence à l'aide d'un

guide écrit n'aurait pas suffi compte tenu des ruptures importantes avec l'enseignement traditionnel tunisien.

Pour former l'enseignant qui a testé la séquence tout en tenant compte des contraintes du système éducatif tunisien, nous avons réalisé une formation dans le cadre officiel de l'innovation pédagogique : tous les enseignants devaient être formés.

Le dispositif de formation des enseignants a d'abord été testé auprès d'un premier groupe d'enseignants. Les résistances manifestées étaient telles relativement aux objectifs d'apprentissage choisis que nous avons décidé de retarder l'expérimentation de la séquence envisagée et d'expérimenter auparavant une séquence légèrement modifiée afin de tenir compte de leurs demandes. C'est cette séquence modifiée qui a été présentée aux autres enseignants en particulier à celui qui a fait la première expérimentation en classe avec ses élèves. Deux groupes d'enseignants ont été constitués, l'un a été formé par le chercheur, l'autre par un des enseignants préalablement formés car nous souhaitons analyser la posture des enseignants face à l'innovation pédagogique et que nous faisons l'hypothèse que notre statut d'inspecteur pouvait l'influencer.

La deuxième expérimentation en classe a eu lieu un an plus tard avec le même enseignant avec la séquence initialement élaborée. Il est cependant à noter que la séquence mise en place a tenu compte de difficultés observées chez les élèves lors de la première expérimentation. L'enseignant a reçu une formation complémentaire car celle reçue lors de la session de formation continue n'a pas été suffisante pour lui permettre de s'approprier une pédagogie de type socio-constructiviste.

La première expérimentation en classe a été réalisée en 2010 avec un groupe de 20 élèves (13 filles et 7 garçons). La deuxième expérimentation a été faite auprès d'un groupe de 25 élèves (23 filles, 2 garçons).

4. Élaboration des séquences d'enseignement

4.1. Objectifs d'apprentissage de nature épistémologique

Par notre recherche, nous visons une plus grande authenticité dans la présentation de la nature des sciences et de l'activité scientifique. En continuité avec les travaux menés par le groupe DidaSco en France, nous avons cherché à identifier des caractéristiques pouvant être choisies comme objectif d'apprentissage sur le thème particulier de la dioptrique et de la loi des sinus

pour la réfraction. Il est important de noter que nous avons cherché des caractéristiques qui apparaissent dans les travaux des scientifiques des siècles passés mais qui s'appliquent aussi à l'activité scientifique actuelle. L'analyse historique et épistémologique a permis de constater la durée extrêmement longue qu'il a fallu avant que la loi de la réfraction ne soit dégagée, la diversité des lieux géographiques où les recherches ont été menées, la diversité des savants qui ont participé à l'élaboration de cette loi, la diversité des enjeux poursuivis par les scientifiques, la diversité des méthodes et des démarches utilisées.

Ce résultat ainsi que le constat que les programmes et manuels tunisiens véhiculent une image non adéquate des sciences, en particulier en ce qui concerne les démarches utilisées par les scientifiques, ils continuent à parler de « la » méthode scientifique et de « la » démarche scientifique- nous ont conduit à retenir deux objectifs principaux d'apprentissage :

- la diversité des démarches utilisées par les scientifiques ;
- la diversité des enjeux poursuivis.

D'autres objectifs secondaires en lien avec les premiers ont été choisis : montrer la durée extrêmement longue qu'il a fallu avant que la loi de la réfraction ne soit dégagée, la diversité des lieux géographiques où les recherches ont été menées, la diversité des savants qui ont participé à l'élaboration de la loi des sinus pour la réfraction.

4.2. Des situations d'investigation documentaire et une synthèse collective sous forme de tableau

Les choix didactiques qui fondent l'élaboration des séquences d'enseignement sont similaires à ceux du groupe DidaScO.

Fondés sur une vision socio-constructiviste de l'apprentissage-enseignement, ils nous ont conduit à élaborer des documents à caractère historique pour les élèves afin de les mettre en activité et à les inscrire dans une situation d'investigation.

Les deux situations que nous avons élaborées se distinguent des situations d'investigation rencontrées majoritairement dans l'enseignement des sciences physiques car elles sont fondées uniquement sur des documents. Selon une pratique recommandée dans l'enseignement primaire et en accord avec de Vecchi et Carmona (2007) ainsi que Maurines et Beaufile (2009, 2011), nous pensons qu'investigation n'est pas synonyme d'expérimentation et que des documents

peuvent être introduits à tous les moments d'une situation d'investigation pour réaliser différentes tâches.

Alors que les premières situations d'investigation documentaire élaborées par le groupe DidaScO sont de type « résolution de problèmes », celles que nous avons élaborées comprennent en plus une phase de construction du problème : il s'agit d'une situation-problème centrée sur un obstacle cognitif relatif à l'image de la nature des sciences et non à un savoir scientifique. L'étude des documents historiques conduit à infirmer deux hypothèses émises suite à l'émergence et confrontation des conceptions initiales des élèves : l'existence d'une seule démarche scientifique et d'un seul type d'enjeu, celui de la recherche de loi.

L'entrée par les scientifiques nous semblant la plus facile à mettre en œuvre auprès des élèves, nous avons choisi d'élaborer un corpus de documents relatifs à différents scientifiques. Les contraintes de temps ont conduit à limiter leur nombre à neuf : ce nombre est suffisant pour montrer la diversité des démarches et des enjeux et pas trop élevé pour faciliter le traitement des informations dans un temps limité. Ces documents présentent des informations sous différentes formes (textes, schémas, dessins, etc.). L'originalité de l'approche consiste à répartir l'information historique sur l'ensemble des documents : cela permet de donner suffisamment d'informations pour limiter la réduction inévitable de l'image de la nature des sciences, de ne pas décourager les élèves lors de la lecture, de limiter le temps consacré à l'activité. À notre connaissance, hormis les propositions de DidaScO, il n'existe aucune proposition de ressources historiques de ce type (Höttecke et al., 2010).

Le travail de lecture du corpus de documents a été réparti sur la classe. Chaque groupe de 3 à 4 élèves a été invité à lire son texte et à extraire les informations nécessaires pour la synthèse collective en étant guidé par des questions en relation avec l'objectif épistémologique retenu: Quels savants ? Quelles méthodes ? Quels enjeux ?

L'activité de synthèse faite en classe, sous la direction de l'enseignant, a visé la production d'un tableau (tableau 3) qui permet la visualisation synoptique des informations recueillies. C'est là encore un trait original des propositions de DidaScO que nous avons repris: elles se distinguent des activités historiques proposées par ailleurs aux élèves qui consistent majoritairement à répondre à des questions ou en la rédaction de textes écrits.

Le choix de produire un tableau (tableau 3) lors de la synthèse correspond à l'idée que ce type de représentation synoptique est adapté aux objectifs fixés. S'agissant de la caractéristique-

objectif « la diversité des enjeux poursuivis par les scientifiques et la diversité des démarches utilisées », il s'agit de lutter contre l'image des sciences partagées par les élèves et enseignants, celle qui considère que les découvertes sont instantanées et faites par une seule personne, selon une démarche accordant une place prioritaire à l'expérience et occultant la réflexion théorique, en réponse à un seul type d'enjeux, la recherche de lois.

Savants et périodes	Lieux géographiques	Enjeux	Démarches
Ptolémée			
Ibn Sahl			
Ibn Al - Haytham			
Della Porta			
Galilée			
Kepler			
Snellius			
Descartes			
Fermat			

Tableau 3 : tableau de synthèse

La confrontation de ce tableau aux hypothèses initiales, la réfutation de ces hypothèses et la conclusion sont faites par les élèves. L'enseignant est ensuite invité à institutionnaliser le résultat obtenu et à le généraliser en renvoyant aux pratiques scientifiques actuelles.

5. Organisation de la séquence

L'organisation envisagée pour la réalisation de la séquence était de la découper en deux séances :

- Une séance de cours d'une durée d'une heure servant à l'introduction du phénomène de réfraction, à l'énoncé de la loi des sinus pour la réfraction, à la passation du questionnaire devant permettre de créer le problème en s'appuyant sur les réponses des élèves, à la collecte des réponses, à l'émission d'une (des) hypothèses à tester. L'enseignant procède ensuite à la distribution des textes en répartissant la lecture sur les

différents groupes et en donnant les consignes de travail pour chaque groupe. Ceux-ci consistent en la lecture soignée des textes, au soulignage des termes importants et au remplissage du tableau 4. Le choix de faire faire la lecture en classe ou à la maison était laissé à l'enseignant.

Savant et période	Lieux géographiques	Enjeux	Démarches

Tableau 4 : tableau à remplir par chaque groupe d'élèves
(Séquence initiale)

- Une séance de travaux pratiques de durée une heure et demie servant au rappel des hypothèses à tester, à la mise en commun des résultats de la lecture et à l'élaboration d'un tableau synthétique, à la confrontation des hypothèses et des résultats, à la réfutation des hypothèses initiales et à la conclusion.

Le tableau 5 ci-dessous présente les différentes étapes de la séquence d'enseignement selon cette organisation en distinguant ce qui relève de la séquence elle-même des moments consacrés au recueil de données

Séances	Organisation initiale de la séquence	
	Enseignement	Suivi recherche
Séance 1 : 1heure Construction du problème	- Introduction du phénomène de réfraction - Enoncé de la loi des sinus - Réponses des élèves aux questions du questionnaire1 - Position du problème et émission d'hypothèses	Passation du questionnaire1 et collecte des réponses
Séance 2 : 1h30min	- Rappel du problème - Test des hypothèses par étude	Passation du questionnaire2 et collecte des réponses

Résolution du problème par les élèves et institutionnalisation par l'enseignant	documentaire - Mise en commun et tableau de synthèse - Réfutation des hypothèses - Institutionnalisation et Conclusion	après la conclusion
Évaluation finale (un mois après)		Passation du questionnaire ³ et collecte des réponses

Tableau 5 : Organisation de la séquence principale

6. La première expérimentation

6.1. Les contraintes et les solutions trouvées

Pour réaliser l'expérimentation en salle de classe, nous avons été confronté à trois problèmes :

- d'un côté, le contenu de la séquence n'est pas conforme au programme officiel : il s'agit d'objectifs épistémologiques et non de connaissances scientifiques, il était donc formellement interdit de les traiter en classe. Les contraintes sur l'enseignement en Tunisie sont en effet très fortes, elles portent non seulement sur les objectifs d'apprentissage mais aussi sur le contenu même de l'enseignement et les démarches pédagogiques à suivre. Il est à préciser qu'il n'existe qu'un seul manuel qui présente un caractère officiel ;
- de l'autre côté, le chercheur ne pouvait pas faire l'expérimentation lui-même puisqu'il n'est pas enseignant, et que même en tant qu'inspecteur, il lui faut une reconnaissance institutionnelle pour que le proviseur accepte de le laisser faire la séquence prévue et mettre en place les outils de suivi, autrement dit de faire passer des questionnaires et de filmer l'enseignant et les élèves ; de plus, les enseignants tunisiens ont encore un enseignement transmissif même si les programmes d'enseignement leur demandent de mettre en œuvre les principes constructivistes et des situations d'investigation : ils ne sont pas formés à la pratique d'une nouvelle pédagogie s'appuyant sur des situations d'investigation fondées sur des activités documentaires ; ils ne sont pas habitués à

articuler une perspective historique aux démarches d'investigation. Il fallait donc former un enseignant pour guider la séquence d'enseignement.

Un moyen légal de contourner les problèmes, autrement dit de faire une recherche dans ce cadre contraint, a été de la présenter dans le cadre de l'innovation pédagogique réclamée par l'institution. Cela a eu pour conséquence de devoir former 50 enseignants, tous ceux qui interviennent en seconde.

Nous avons cherché une organisation qui permette de les former tous et de sélectionner par la suite l'enseignant(e) qui ferait la séquence. Pour ce faire, nous avons fait le choix de placer les enseignants dans la même situation que les élèves. Cela permettait de leur donner une idée de la façon de travailler avec les élèves, en particulier cela permettait à l'enseignant(e) qui guiderait les séances d'enseignement de bien comprendre les textes historiques, de s'approprier les étapes de la démarche d'investigation et de saisir les objectifs épistémologiques choisis comme objectifs d'enseignement.

Cette formation a été réalisée en trois temps : une séance de formation test puis une séance de formation que nous avons toutes deux réalisées, et enfin, une séance de formation réalisée par un des enseignants formés. Nous souhaitions en effet analyser la posture des enseignants face à l'innovation pédagogique et nous faisons l'hypothèse que notre statut d'inspecteur pouvait l'influencer. Des questionnaires ont été élaborés à cette fin.

6.2. La séance de formation-test et la modification de la séquence envisagée

Cette séance test devait nous permettre de préparer au mieux les deux autres séances de formation, séances au cours desquelles nous souhaitions mettre en place des outils de suivi des enseignants. Elle visait à explorer les difficultés susceptibles d'être rencontrées et de tenir compte de l'avis des enseignants sur la formation à leur apporter et sur la faisabilité de la séquence innovante proposée (durée, difficulté des textes, etc.).

15 enseignants et enseignantes ont participé à cette première séance de formation.

Ces enseignants ont résisté fortement à l'idée de consacrer une séance d'enseignement toute entière à traiter uniquement d'objectifs à caractère épistémologique et ont émis des réserves quant à la possibilité de la réussite de la séquence d'enseignement-apprentissage et ce, pour différentes raisons : ils jugeaient les textes difficiles à comprendre par les élèves, ils

soulignaient leur manque de formation en épistémologie et en histoire des sciences et de pratique d'une nouvelle pédagogie s'appuyant sur les situations d'investigation ainsi que les contraintes de temps.

Les résistances manifestées par les enseignants quant aux objectifs d'apprentissage visés étaient si fortes que nous avons été contraint de modifier la séquence innovante envisagée pour introduire une activité supplémentaire en lien avec un objectif d'apprentissage notionnel : la loi des sinus. Il était demandé aux élèves de remplir un tableau (tableau 6) contenant une colonne de plus qu'initialement prévu relative à cet objectif notionnel, la colonne « résultats ».

Savants et périodes	Lieux géographiques	Enjeux	Démarches	Résultats

Tableau 6 : : tableau à remplir par chaque groupe d'élèves (expérimentation1)

C'est cette séance modifiée qui a constitué le support des deux autres séances de formation des enseignants et qui a été expérimentée une première fois en classe. La seconde expérimentation en classe s'appuie sur la séquence initiale qui ne poursuit que des objectifs d'apprentissage épistémologiques.

7. La deuxième expérimentation

7.1. Introduction

Nous avons constaté lors de l'analyse du film réalisé lors de la première expérimentation que la signification du terme « enjeu » n'avait pas été totalement saisi, ni par l'enseignant ni par les élèves, ce qui a engendré des difficultés au niveau du remplissage du tableau collectif et lors de la phase d'institutionnalisation.

Par ailleurs, ce film révèle un décalage entre ce qui était demandé et ce qui a été fait. En effet, le déroulement de la séquence ne s'est pas produit comme prévu. Lors de la passation du questionnaire 1, seule la partie 1 servant à la mise en route de la séquence et à la position du problème a été correctement présentée tandis que la partie 2 qui devait servir à l'élaboration de l'hypothèse a été administrée après son émission.

L'enseignant a éprouvé de grandes difficultés à mettre en œuvre la séquence d'enseignement - apprentissage innovante : il prend toute la séquence en charge, c'est lui qui émet l'hypothèse à réfuter, c'est encore lui qui induit ou anticipe les réponses à la place des élèves. La séquence mise en place est en fait une séquence d'apprentissage-enseignement transmissive.

Ces résultats nous ont conduit à donner à l'enseignant une formation supplémentaire sur la pratique d'une pédagogie mettant les élèves dans des situations d'investigation, à retravailler les textes et les questionnaires, à réorganiser le déroulement et le contenu de la séquence d'enseignement.

7.2. La formation de l'enseignant

Pour remédier aux difficultés rencontrées par l'enseignant, nous avons dû réaliser une formation supplémentaire sur la méthode pédagogique. Celle-ci a eu lieu par le biais d'un entretien individuel. Il a s'agi pour nous d'explicitier avant tout à l'enseignant comment mettre en œuvre les différentes étapes de la démarche d'investigation en lui fournissant des documents supplémentaires qui présentaient des exemples d'utilisation réelle de cette pratique pédagogique. Nous lui avons également donné un canevas précisant les différentes étapes de la séquence et des consignes sur ce qui devait être fait et dit pour assurer son bon déroulement (tableau 8).

Canevas de la séquence d'enseignement

1- Une séance d'une heure :

1.1. Le professeur introduit le phénomène de réfraction et énonce la loi des sinus pour la réfraction : $\sin i / \sin r = \text{constante}$

1.2. Le professeur pose la question « *selon vous, comment la loi des sinus pour la réfraction a été élaborée autrefois ?* » et recueille les conceptions des élèves (distribution du questionnaire1).

2- Une séance de 1h30min (TP)

1. Reprise du questionnaire1 et ramassage des réponses,

2. Rappel du problème

2.1. Le professeur reprend la question : « *selon vous, comment la loi des sinus pour la réfraction a été élaborée autrefois ?* ».

2.2. Mise en commun des informations à partir des réponses données au questionnaire¹, analyse des réponses et émission d'une ou des hypothèse(s) à tester : un seul scientifique qui a eu une intuition (aspect instantané et solitaire de la découverte), il voulait trouver une loi pour le trajet de la lumière, il a suivi une démarche inductive (passage de l'observation à la loi).

3. Résolution du problème

3.1. Distribution des textes aux élèves en répartissant la lecture sur les différents groupes.

3.2. Demander aux élèves de lire soigneusement les textes, de souligner les termes importants et de remplir le petit tableau (tableau 7).

Savants	Lieux géographiques	Périodes	Problème exploré (extraits du texte)	La nature du problème exploré	Démarche (extraits du texte)	Nature de la démarche

Tableau 7 : tableau à remplir par chaque groupe d'élèves (expérimentation²)

3.3. S'assurer que tous les éléments du groupe sont d'accord entre eux sur les réponses (petit tableau), sinon l'enseignant doit intervenir pour rapprocher les idées.

3.4. Mise en commun au tableau des réponses : faire passer un élève de chaque groupe pour reproduire le contenu du petit tableau dans le tableau récapitulatif (tableau 2).

4. Confrontation des hypothèses et des résultats.

4.1. Réfutation de l'hypothèse initiale par les élèves (faire une lecture de chaque colonne du tableau récapitulatif).

4.2. Les élèves dégagent la conclusion : la loi de la réfraction est le résultat de travaux s'étendant de l'antiquité au XVII^e siècle. Les scientifiques ne cherchaient pas à établir une loi mais à résoudre des problèmes de nature théorique, ou technique, ou épistémologique, etc., et ce faisant, ils ont été amenés à étudier la réfraction et à établir une loi. Ils n'ont pas tous suivi la même démarche, certains ont fait des expériences, d'autres que des calculs...

Les expériences étaient construites en réponse à une question. Les observations étaient faites en réponse à une question...

5. Institutionnalisation par l'enseignant : La conclusion des élèves est exacte et peut-être généralisée à d'autres lois.

Consignes en vue d'un bon déroulement de la séquence

1. Poser les questions et attendre les réponses, éviter d'anticiper ou de souffler les réponses.
2. Intervenir seulement pour organiser la discussion, pour faire progresser la séquence, pour rapprocher les idées, pour débloquer les situations d'impasse et pour aider les élèves à conclure.
3. Éviter de dire Descartes pour nommer la loi des sinus pour la réfraction, parler seulement de la nature du problème exploré et n'évoquer le terme « enjeu » qu'en fin de la séance,

Tableau 8: aides données à l'enseignant lors de la formation complémentaire

7.3. Modification de la séquence

Les modifications de la séquence expérimenté une première fois ont porté sur :

1) **le contenu** : nous avons délaissé l'objectif d'apprentissage notionnel relatif à la loi des sinus pour la réfraction introduit lors de la première expérimentation et nous nous sommes limités aux objectifs d'apprentissage épistémologiques initialement choisis, à savoir la diversité des enjeux et la diversité des méthodes et démarches.

La colonne « résultats » du tableau (6) relative à l'objectif d'apprentissage notionnel a été supprimée et le terme « enjeu » a été remplacé par l'expression « la nature du problème exploré ». Enfin, pour aider les élèves dans leur recherche, nous leur avons demandé de transcrire à partir des textes les extraits qui expriment le problème exploré et la démarche utilisée par le physicien. Le tableau 7 ci-dessus est celui que chaque groupe a eu à remplir.

2) **le déroulement** : si lors de la première expérimentation certaines activités ont été réalisées à la maison, toutes les activités se sont déroulées en salle de classe.

3) **les textes** : les contraintes de temps et les difficultés éprouvées par les élèves, tant au niveau de la compréhension du contenu scientifique qu'au niveau de la compréhension linguistique,

nous ont conduit à retravailler les textes, à les alléger et les simplifier, afin de les rendre plus intelligibles.

4) **les questionnaires** : nous avons modifié le questionnaire destiné à déterminer l'impact de la séquence d'enseignement sur l'image des sciences des élèves car le premier questionnaire que nous avons élaboré et expérimenté ne nous avait pas permis de fournir une évaluation permettant de tirer des conclusions pertinentes. En effet, il nous semblait que certaines questions pouvaient induire les réponses des élèves. Aussi, pour éviter l'induction et la disparité des réponses, nous avons fait le choix de remplacer le questionnaire ouvert par un questionnaire fermé et de procéder à une nouvelle formulation des questions. Ainsi, le questionnaire 3 a été remplacé par le questionnaire 3bis.

8. Comparaison des deux séquences mises en place

Le tableau 9 ci-dessous présente les différentes étapes des deux séquences d'enseignement en distinguant ce qui relève de la séquence elle-même des moments consacrés au recueil de données.

	Première séquence		Deuxième séquence	
	Enseignement	Suivi recherche	Enseignement	Suivi recherche
Séance 1 1h	<ul style="list-style-type: none"> - introduction du phénomène de la réfraction - la loi des sinus n'est pas donnée - les élèves répondent aux questions : <i>quelle loi ? et comment les scientifiques ont pu élaborer la loi de la réfraction autrefois ?</i> - position du problème 	Questionnaire1	<ul style="list-style-type: none"> - introduction du phénomène de la réfraction - la loi des sinus est donnée - les élèves répondent à la question : <i>comment les scientifiques ont pu élaborer la loi de la réfraction autrefois ?</i> - position du problème 	Questionnaire1

Séance 2 1h30	<ul style="list-style-type: none"> - Rappel du problème - Emission des hypothèses - Test des hypothèses par étude documentaire - réfutation de(s) l'hypothèse(s) - conclusion 	Questionnaire2	<ul style="list-style-type: none"> - Rappel du problème - Emission des hypothèses - Test des hypothèses par étude documentaire - réfutation de(s) l'hypothèse(s) - conclusion 	Questionnaire2
Evaluation finale		Questionnaire3		Questionnaire3

Tableau 9: comparaison des deux séquences mises en place

Nous notons que lors de la première expérimentation, la réponse au questionnaire 1, la lecture des textes et le remplissage du tableau 6 ont été réalisés par les élèves à la maison et ce pour dépasser les contraintes de temps.

Chapitre 2

Méthodologie 2 : le suivi des ingénieries didactiques

1. Introduction

Le suivi de ces ingénieries a été réalisé essentiellement à l'aide de questionnaires ouverts ou/et fermés et d'une vidéo.

1.1. Le suivi des élèves

Lors des deux expérimentations, les élèves ont eu à renseigner des questionnaires.

Le premier (**Questionnaire1**) qu'ils ont eu à remplir a une double fonction puisqu'il fait partie intégrante de la situation d'investigation et permet l'émission des hypothèses relatives à la nature des sciences.

Le deuxième (**Questionnaire2**) a été renseigné juste en fin de séance et permet d'analyser l'impact de l'expérimentation tant sur le plan de l'apprentissage à court terme que du rapport à l'innovation.

Le troisième (**Questionnaire3** : première expérimentation et **Questionnaire3bis** : deuxième expérimentation) a été renseigné un mois après et permet de connaître l'impact à plus long terme sur l'image de la nature des sciences. Notons que des modifications ont été apportées à certains questionnaires à la suite de la première expérimentation. (Voir annexe questionnaires élèves expérimentations 1 et 2)

1.2. Le suivi des enseignants

Lors des séances de formation, les enseignants ont eu à renseigner deux questionnaires.

Le premier (**Questionnaire 1P**) qu'ils ont eu à remplir au début de la séance vise à déterminer leurs conceptions de la nature des sciences et leur rapport à l'enseignement des sciences.

Le deuxième (**Questionnaire 2P**) a été renseigné juste à la fin de la séance de formation. Il vise à examiner leur accueil de la séance de formation et de la séquence d'enseignement.

2. Elaboration des questionnaires

Les questionnaires constitués de questions ouvertes ont été élaborés en s'appuyant :

- d'une part sur l'instrument conçu par Lederman et al. (2002) « Views of Nature of Science Questionnaire : VNOS » en vue d'évaluer de façon significative les représentations des élèves et des enseignants sur certains aspects de la nature des sciences et de les aider à développer des conceptions plus informées de la nature des sciences (VNOS - formes B et C) ;
- d'autre part sur celui élaboré par Robardet (1995) en vue d'étudier les opinions des professeurs concernant les sciences, leur enseignement et la façon dont les élèves apprennent.

Les questionnaires constitués de questions à choix multiples ont été élaborés en s'appuyant sur l'instrument d'évaluation développé par Chen (2006) « Views On Science and Education questionnaire : VOSE » pour déterminer les conceptions et les attitudes des étudiants et des enseignants envers les sciences ainsi que pour créer des profils détaillés de leurs opinions sur la nature des sciences et de leur enseignement.

Les questionnaires fermés ont été élaborés pour évaluer l'impact de la séquence d'enseignement chez les élèves à plus long terme alors que les questionnaires ouverts l'ont été pour la débiter et suivre l'expérimentation.

Les points du questionnaire VNOS qui ont inspiré les questions servant à créer le problème à résoudre concernent essentiellement les conceptions des élèves et des professeurs sur la façon dont travaillent les scientifiques :

- les enjeux poursuivis par les chercheurs ;
- les démarches et méthodes utilisées par les scientifiques (l'existence ou non d'une méthode scientifique universelle, le rôle de l'imagination, de la créativité, des mathématiques dans le processus de production du savoir...) ;

- les activités du scientifique (stature du savant : solitaire, interaction avec d'autres ; nature d'une découverte : accidentelle et fruit du hasard et de la chance ou conséquence d'enquête soigneusement planifiée et systématique et de théorisation préalable).

Les points retenus du questionnaire de Chen pour évaluer l'impact de la séquence sont en lien avec les objectifs d'apprentissage épistémologique choisis pour la séquence innovante et concernent essentiellement la diversité des enjeux poursuivis, des démarches utilisées, la stature du savant.

Les aspects du questionnaire de Robardet qui ont inspiré nos questions concernent essentiellement le rapport à l'innovation des élèves, le rapport à l'enseignement des sciences des enseignants et leur posture face à l'innovation pédagogique.

Le rapport à l'innovation des élèves a été caractérisé par les réponses à trois questions portant sur :

- L'importance de la séquence innovante (importance de ce qui est appris, importance de la réflexion historique et de l'apprentissage par investigation) ;
- L'intérêt, la difficulté et l'utilité du travail demandé ;
- L'accueil réservé à la séquence.

Le rapport à l'enseignement des sciences des enseignants a été déterminé grâce à des questions portant sur :

- Les objectifs d'enseignements visés, le type de cours envisagé (rapide, clair et simple, place de l'erreur), place de l'histoire des sciences et son apport ;
- L'importance des activités proposées dans l'enseignement (expériences, exercices, débats pour confronter les idées, activités documentaires).

La posture des enseignants face à la séquence d'enseignement innovante a été déterminée par les réponses à des questions portant sur :

- l'intérêt, l'importance de proposer une réflexion aux élèves sur l'élaboration des connaissances scientifiques, les enjeux et les démarches ainsi qu'un travail sur des documents historiques ;

- l'intérêt, l'importance de proposer aux élèves les types d'activités mises en oeuvre dans la séquence : travail sur document, travail collectif, exprimer leurs idées et formuler une question à laquelle chercher une réponse, apporter une réponse à la question posée en confrontant leurs idées à celles apportées par les textes ;
- l'anticipation de l'intérêt des élèves pour la séquence d'enseignement ;
- l'anticipation des difficultés que les élèves ainsi qu'eux-mêmes peuvent rencontrer lors de la mise en oeuvre de l'innovation ;
- l'intérêt des enseignants pour des séquences fondées sur l'histoire des sciences, sur les démarches d'investigation.

En ce qui concerne la séance de formation, les questions ont porté sur les aspects importants, les aspects qui ont paru inutiles, les points qui ont manqué, l'intérêt d'assister à une formation complémentaire.

3. Le film et les questionnaires de retour sur la mise en oeuvre des séquences d'enseignement et de la séance de formation.

3.1. Le film

Afin de pouvoir analyser la pratique de l'enseignant qui a réalisé la première expérimentation en classe et ainsi faire le lien avec l'apprentissage des élèves, nous avons chargé un observateur extérieur de filmer ce qui se passait en classe avec une caméra.

Ni la deuxième expérimentation, ni la séance de formation n'ont été filmées à cause de la difficulté à obtenir les autorisations nécessaires.

3.2. Les questionnaires

Juste à la fin de chaque séquence d'enseignement, l'enseignant a eu à renseigner deux questionnaires (**Questionnaire 1E**, **Questionnaire 2E**). De même, à la fin de la séance de formation du dernier groupe d'enseignants, le formateur a eu à renseigner un questionnaire (**Questionnaire F**). Ces questionnaires ont été élaborés pour avoir un retour sur ce qui a été fait en classe, mais il aurait fallu faire un entretien direct avec chacun d'eux pour avoir plus de détail sur ce qui a été fait et dit, voire filmer la séquence d'enseignement et celle de formation des professeurs.

4. Traitement des questionnaires

4. 1. Analyse des données

Les réponses des élèves et des enseignants ont été analysées en utilisant la technique de l'analyse de contenu (Ghiglione et al., 1980) permettant le passage d'une information descriptive à des interprétations et inférences. La réponse proposée par un sujet (élève ou enseignant) à une question a été codifiée par un chiffre. Le même chiffre représente la réponse du même sujet à n'importe quelle question.

L'analyse a été menée de la façon suivante : le chercheur a lu toutes les réponses à une question donnée. Pour chaque réponse, ont été repérées une ou plusieurs unités de classification, constituées par une phrase ou une portion de phrase possédant un sens complet en elle-même. Les unités de classification au sein de chaque question ont ensuite été réunies en catégories homogènes.

La quantification des informations dégagées est exprimée en pourcentage d'énoncés apparaissant dans chacune des catégories. Les pourcentages indiqués sont calculés sur le nombre d'élèves ou d'enseignants qui répondent à la question posée, certains pourcentages sont partiels surtout lorsqu'il y a un accord sur réponse mais selon une diversité de points de vue. Les pourcentages ne sont pas toujours exclusifs.

Dans cette étude, nous n'avons pas cherché à faire d'étude statistique systématique des réponses obtenues. Compte tenu des effectifs interrogés, les pourcentages peuvent seulement contribuer à indiquer des tendances majoritaires ou minoritaires.

3. 2. Cadre interprétatif

L'interprétation des réponses aux questions posées supposent la précision d'un cadre épistémologique de référence. Ce cadre sera utilisé comme une grille pour la lecture des opinions des élèves et enseignants. Nous adhérons à l'idée de science partagée par plusieurs philosophes, épistémologues et sociologues contemporains (Chalmers, 1976, 1982 ; Kuhn, 1970 ; Latour, 1987) qui ont rejeté l'interprétation empiriste, réaliste au sens étroit et positiviste de la science.

Selon ces savants, la science est une entreprise sociale qui s'est construite sur fond de crises, de débats très vifs entre communautés, et de révolutions. Elle est élaborée dans le cadre du système de valeurs d'une société historiquement déterminée. Le savoir scientifique obtenu est

donc relatif et nullement absolu. La science se fonde sur un processus organisé dont le but est l'établissement de généralisations applicables aux phénomènes qu'il conviendra de ne jamais confondre avec le réel en « soi ».

L'activité du scientifique ne se limite pas à l'observation scrupuleuse et passive car la science n'est pas uniquement un ensemble de faits connus à propos du monde. Au contraire, il s'agit d'un processus qui engage activement le sujet connaissant dans une stratégie de construction de savoirs s'appuyant sur la pensée logique, l'imagination et la créativité. Cette stratégie ne peut pas être identifiée à une procédure canonique ou une série de recettes capables de permettre la production des idées infaillibles. Celles-ci sont produites dans un contexte d'incertitude et d'échecs.

Les savoirs scientifiques ne sont pas tirés de données empiriques obtenues par une observation minutieuse et soigneusement menée en dehors de tout préjugé. Ils ne découlent pas non plus de déduction rigoureuse de notions de base d'intuitions sensibles ou de catégories *a priori* de l'entendement, intangibles et immuables : ainsi, « *La pensée scientifique ne trouve sa source ni uniquement dans l'observation, comme l'affirment les empiristes, ni uniquement dans la raison, comme le soutiennent les rationalistes classiques* » (Roletto, 1998, p.15).

Dans les sciences, les données d'observation ne sont pas séparables des théories. L'observation n'a de sens qu'à travers une théorie préexistante, c'est la théorie qui donne son sens aux faits et non l'inverse. Il est considéré mythique l'idée selon laquelle, les connaissances et les théories scientifiques seraient construites progressivement à la lumière de l'établissement de faits. Le réel, tel qu'il est conçu par les scientifiques, serait lié à un discours, à une interprétation à laquelle on donnerait un statut privilégié. Ce discours est le produit social d'un processus cognitif de l'esprit en interaction avec des objets observables. Dans ce contexte, la science ne cherche pas la description d'une réalité absolue ni l'atteinte d'une vérité ultime de cette réalité. En fait, le réel réside dans les modèles théoriques que les scientifiques construisent pour tenter de comprendre le monde.

Le point de vue de ce courant de pensée nie l'existence de critères ou de normes universels et anhistoriques permettant la distinction entre science et non science car les critères de scientificité sont historiquement et socialement déterminés : les connaissances scientifiques ne sont ni objectives, ni subjectives, mais *inter-subjectives*. Dans un tel contexte, l'idée que la science progresse en accumulant les connaissances correctes et écartant les fausses devient insoutenable.

Partie 4

Les résultats obtenus lors de la séance de formation des enseignants

Chapitre 1 : Le rapport des enseignants à l'enseignement des sciences

Chapitre 2 : Les représentations de la nature des sciences chez les enseignants

Chapitre 3 : La posture des enseignants face à l'innovation pédagogique

Chapitre 4 : La posture des enseignants face à la séance de formation

Introduction

Les enseignants ont eu à renseigner deux questionnaires.

Celui distribué au début de la séance de formation comporte deux parties. La première vise à déterminer le rapport des enseignants à l'enseignement des sciences au travers de 9 questions portant sur les objectifs d'enseignement et les méthodes d'enseignement qu'ils privilégient. La seconde cherche à repérer leur représentation de la nature des sciences et est constituée des mêmes questions que celles proposées aux élèves lors de l'expérimentation de la séquence innovante.

Le questionnaire distribué à la fin de la séance de formation vise à examiner leur posture face à l'innovation pédagogique et à la séance de formation.

N'ayant pas constaté de différences dans les réponses données par les deux groupes d'enseignants, l'un de 16 enseignants formés par le chercheur, l'autre de 19 enseignants formés par un enseignant préalablement formé au sein du premier groupe, nous les avons réunies. L'échantillon concerné par l'enquête est ainsi constitué de 35 professeurs (P). Les pourcentages sont calculés sur le nombre d'enseignants interrogés en général, sont partiels chaque fois que la réponse globale est susceptible de différentes justifications, et ne sont pas exclusifs.

Chapitre 1

Le rapport à l'enseignement des sciences des enseignants

1. Les objectifs d'enseignement

Q_{111P} : Que souhaitez-vous transmettre à vos élèves par votre enseignement ?

Les réponses données à la première question ont permis de classer les points de vue des répondants en quatre catégories relatives à la transmission :

- de connaissances;
- d'attitudes ;
- de méthodes, processus et stratégies ;
- d'une culture scientifique et une éducation à la citoyenneté.

63% des professeurs cherchent à transmettre aux élèves des connaissances: « *Les connaissances scientifiques (explication des expériences, lois scientifiques, les théories)* » (P 6); « *des informations pour expliquer les différents phénomènes observés dans la vie courante* » (P 3).

40% mentionnent des capacités: « *[...] savoir analyser, discuter, argumenter* » (P 18) « *esprit de synthèse et de création* » ainsi que le « *développement des compétences* » (P 8).

34% mettent l'accent sur les démarches : « *apprendre une méthodologie* » (P 25), « *savoir la démarche scientifique* » (P 17) et d'élaborer « *des connaissances scientifiques grâce à des stratégies claires* » (P 11).

23% cherchent à faire acquérir aux élèves des attitudes : « *savoir vivre, et d'être capable de se débarrasser des mauvaises habitudes* » (P 30) et une « *éducation (comportement, dialogue, discussion)* » (P 33).

2. Le type de cours

Q_{112P}: Pensez-vous que l'enseignement de la physique et de la chimie doit être organisé de manière à permettre aux élèves de disposer le plus rapidement possible d'un cours clair et simple ?

*Non, pourquoi ?
Oui, pourquoi ?*

54% des enseignants pensent que l'enseignement des sciences physiques doit être organisé de manière à permettre aux élèves de disposer le plus rapidement d'un cours simple et clair.

- Une majorité parmi ce pourcentage croit qu'il facilite la compréhension, permet un apprentissage efficace et fait gagner du temps : « *gagner plus de temps pour l'application* » (P 4), « *faciliter l'apprentissage* » (P 29) « *[...] permet à l'élève de comprendre et dégager la loi visée* » (P 31) ;
- Un seul professeur a fourni une réponse conforme aux attentes institutionnelles, réaliser l'objectif visé dans le temps imparti : « *parce qu'un cours clair et simple permet de réaliser [d'atteindre] facilement les objectifs visés* » (P 2).

Ces professeurs pratiquent un enseignement traditionnel qui s'appuie principalement sur la transmission des savoirs et permettant selon eux de gagner du temps et de répondre aux attentes institutionnelles.

46% des enseignants pensent qu'il faut prendre son temps. Plus de la moitié parmi eux propose de partir « *[...] de difficultés, de situation problème, de questionnement permettant d'amener les élèves à réfléchir [...]* » (P 11), d' « *aider les élèves à construire ce cours pas à pas* » (P 12), d'acquérir « *une méthode qui leur permette de chercher[...]* » (P 25), de faire « *participer l'élève à la séquence d'apprentissage en exprimant son point de vue même s'il est erroné* » (P 27) et « *pour apprendre ces sciences il faut discuter, donner son point de vue* » (P 6).

Pour ce groupe de professeurs, les stratégies d'enseignement privilégiées semblent de types constructivistes prenant en compte les connaissances initiales des apprenants, favorisant les discussions et s'appuyant sur le questionnement et les situations problèmes.

3. La place de l'erreur dans l'enseignement

Q_{113P} : Pensez-vous que l'enseignement de la physique et de la chimie doit être organisé de manière que les élèves fassent le moins d'erreurs possible ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

Plus de la moitié des enseignants (51 %) estiment que l'erreur est un moyen d'apprentissage qu'il ne faut pas ignorer. Une majorité parmi eux (61%) pensent que l'erreur est un moyen d'apprentissage efficace : elle « *permet de poser la question de réfléchir [...]* » (P 11), de « *guider l'élève à corriger ses mauvaises représentations* » (P 13). En outre, l'erreur « *sensibilise l'enseignant à la démarche suivie par les élèves d'où il peut l'améliorer ou la corriger* » (P 16), elle permet d' « *éliminer les idées fausses et les remplacer par les idées justes* » (P 26). De cette façon, « *on construit finalement l'idée [...]* » (P 28).

Ce résultat recoupe celui avancé par 46% des enseignants qui pensent qu'il faut prendre son temps lors de l'enseignement-apprentissage.

Ces enseignants valorisent l'erreur. Elle est considérée comme un outil privilégié du maître pour recenser les lacunes et les faiblesses, explorer les démarches d'apprentissage, mettre en œuvre des réponses appropriées pour ses élèves. Elle est perçue comme une étape normale de l'apprentissage. Pour eux, l'erreur participe à la construction du sens de la connaissance acquise. Elle alimente sans cesse le savoir scientifique. Bachelard (1934) décrivait l'activité scientifique comme un combat jamais gagné pour la « rectification » des erreurs passées.

Environ la moitié des enseignants (49%) considèrent qu'un enseignement organisé de façon que l'élève fasse le moins d'erreurs est efficace :

- « *pour construire des connaissances claires* » (P 4) ;
- Il permet de gagner du temps « *au cours du déroulement de la séance d'apprentissage nous sommes régis par un horaire qu'il ne faut pas dépasser [...]* commettre beaucoup d'erreurs fait perdre plus de temps » (P 21) ;

- Un certain nombre d'enseignants ne mentionne pas la phase d'apprentissage mais le résultat de l'apprentissage : « *Faire le moins d'erreurs après l'apprentissage signifie que les objectifs sont réalisés* », « *à la fin de chaque chapitre l'élève répond à un exercice sans faire des erreurs* » (P 35).

Cette conception est caractéristique du modèle transmissif de l'apprentissage: conception de la «tête vide» qui considère implicitement que l'apprenant ne sait rien et le maître lui transmet son savoir sans cependant, prendre en considération ses représentations et donc l'origine de ses erreurs. Il en est de même dans le modèle béhavioriste, l'erreur est considérée comme un handicap car elle ne renforce pas les comportements positifs et elle risque de laisser des traces indélébiles. Si ces traces existent malgré tout, elles sont attribuées à la progression jugée trop rapide pour l'élève. Dans ces deux modèles, l'erreur est regrettable et elle a un statut négatif.

4. L'apport de l'histoire des sciences dans l'enseignement

Q_{114P} : Pensez-vous qu'il est intéressant, important, indispensable de faire réfléchir les élèves à la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées autrefois ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

La majorité des enseignants (63%) jugent intéressant de faire réfléchir l'élève à la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées autrefois.

- Seulement un quart des enseignants (27%) justifient leur réponse en mettant l'accent sur l'acquisition de connaissances historiques : « *[...] attirer l'attention des élèves à l'origine de certaines connaissances scientifiques* » (P 23) et « *de bien savoir la différence entre les explications anciennes et contemporaines* » (P 22).
- Environ un tiers des enseignants (36%) considèrent que cette réflexion facilite l'apprentissage des sciences : elle « *aide les élèves à comprendre mieux les lois : comment ils [elles] sont découvert[e]s, dans quelles conditions [...]* » (P 6), « *pour que les élèves soient capables d'analyser et de faire une démarche scientifique* » (P 18).
- Il est à noter que pour un nombre non négligeable d'enseignants (23%), cette réflexion doit être réalisée sans toucher aux objectifs de la séquence ou au temps qui lui est imparti : « *elle est intéressante mais [...] n'est pas importante : car on a un objectif*

principal de la séance et [...] dans certains cas on peut lui donner directement la connaissance pour ne pas dévier l'objectif de la séance » (P 28).

23% des enseignants considèrent cette réflexion comme importante. On retrouve sur les justifications données l'idée qu'elle facilite l'apprentissage car elle permet à l'élève « *de supprimer de sa mémoire les représentations qui sont fausses ou mal acquises* » (P 27). Un autre argument apparaît lié à la motivation pour l'étude des sciences « *nous incite à avancer dans l'apprentissage vu que nos ancêtres, avec des moyens traditionnels ou parfois sans aucun équipement, sont arrivés à réaliser des exploits [...]* » (P 33).

14% des enseignants jugent indispensable cette réflexion. Comme dans le cas précédent, les arguments évoqués montre qu'elle facilite l'apprentissage des sciences : elle permet de « *[...] faire comprendre les phénomènes physiques et leurs natures* » (P 1), de « *faire comprendre à l'élève le but pour lequel il fait une expérience ou telle activité* » (P 2) et d' « *éviter les lacunes précédentes [...], de recorriger les idées* » (P 3).

11% des répondants jugent non nécessaire cette réflexion car « *elle demande beaucoup de temps de faire réfléchir les élèves par cette méthode* » (P 7) et elle ne fait pas partie des objectifs fixés par les programmes : « *n'est pas notre objectif* » (P 5).

La comparaison des arguments accompagnant les différents types de réponses montre que pour la majorité des enseignants la réflexion sur l'histoire des sciences est avant tout un moyen pour apprendre les sciences. Il est à noter qu'un nombre non négligeable d'entre eux la perçoivent comme une perte de temps.

5. La place de l'histoire des sciences dans l'enseignement

Q_{115P} : Si vous pensez que cette réflexion doit être proposée aux élèves, est-ce dans les cours de physique et chimie ?

Non, pourquoi ? Où doit-elle avoir lieu ?
Oui, pourquoi ?

60% des enseignants pensent que cette réflexion doit avoir lieu en cours de physique et de chimie.

- Pour certains d'entre eux, elle sert à mieux comprendre les leçons et à motiver davantage les élèves à participer : « *ça va les encourager à bien avancer dans leur apprentissage* » (P 33), leur permettre d'« [...] *avoir un esprit critique* » ;
- D'autres enseignants envisagent de réaliser cette réflexion lorsqu'il n'y a pas d'expérience à faire : « *pour attirer l'attention de l'élève surtout dans le cas où il n'y a pas une expérience à faire pour élaborer une connaissance* ». Cette réflexion est considérée dans ce cas plus comme un moyen d'apprentissage que son but.

Les 40% d'enseignants restant ne restreignent pas cette réflexion aux cours de chimie et de physique. Ils l'étendent à d'autres disciplines et à des cadres différents de l'enseignement traditionnel, ainsi :

- 29% d'entre eux l'étendent à un « *ensemble de disciplines : les mathématiques, éducation technique, sciences naturelle* » (P 1) ;
- 21% l'attribuent aux disciplines littéraires uniquement: « [...] *cours de français ou histoire* » (P 16) ;
- 29% la proposent dans des cadres différents de l'enseignement traditionnel: elle « *peut être proposée sous forme de dossier* » (P 21) ou « [...] *peut être dans des séances spécifiques (clubs de sciences) [...]* » (P 30) ;
- 43% précisent qu'elle demande du temps et doit être faite à la maison : « *Le temps n'est pas suffisant et cette réflexion peut être faite comme un travail complémentaire* » (P 32).

6. Les activités à proposer dans l'enseignement de physique-chimie

Q_{116P} : *Indiquez s'il est intéressant, important, indispensable de faire faire les activités ci-dessous aux élèves en classe de physique et chimie.*

Dans chaque cas, entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi ?

Q_{1161P} : Des expériences

*Intéressant, important, indispensable.
Pourquoi ?*

94% des enseignants jugent qu'il est important et indispensable de faire faire aux élèves des expériences en classe et 21% que c'est intéressant.

- 62% des enseignants considèrent que les expériences sont un moyen d'acquisition de connaissances. En effet, « [...] *une simple expérience peut mettre en évidence un phénomène flou chez l'élève* » (P 14), elle « [...] *est une vérité qu'il ne peut pas nier* » (P 23) et « *L'élève ne comprend que lorsqu'il manipule* » (P 31) ;
- pour 18% des enseignants, l'expérience sert à dégager une loi ou à tirer une conclusion : « *à partir de l'expérience on tire des conclusions et des lois* » (P 25), « [...] *atteindre la loi par l'expérience* » (P 18) ;
- pour 12% des enseignants, elle permet de simuler des phénomènes : « *Pour s'approcher des situations réelles* » (P 30), « *Les expériences illustrent des phénomènes* » (P 33) ;
- 9% des enseignants considèrent que l'expérience donne « *à l'élève le plaisir d'assister à un cours de chimie* » (P 29).

Nous constatons que pour la majorité des enseignants, l'expérience est considérée comme un moyen d'apprentissage, comme un moyen pour avoir des lois et pour simuler des phénomènes naturels.

Pour eux, les savoirs scientifiques se forment et se développent à partir des activités d'observation et d'expérimentation. Ils sont tirés des faits et sont des évidences empiriques.

Il s'agit de points de vue qui renvoient à une épistémologie empiriste.

Q_{1162P} : Des exercices

*Intéressant, important, indispensable
Pourquoi ?*

66% des enseignants pensent qu'il est important et indispensable de faire faire aux élèves des exercices en classe et 35% des enseignants les jugent intéressants.

41% des enseignants les utilisent comme un moyen « *pour évaluer l'atteinte des objectifs et savoir les difficultés des élèves* » (P 18) ;

41% les proposent « *pour mieux assimiler une leçon – être capable d'appliquer correctement une formule* » (P 13) et savoir « *utiliser les lois et les relations physiques et chimiques [...] et de bien les maîtriser* » (P 6) ;

6% « *permet à l'élève d'avoir une méthode de réflexion logique et bien organisée* » (P 2).

Les exercices sont conçus le plus souvent comme un outil de renforcement et d'évaluation de l'atteinte des objectifs pédagogiques.

Q1163P : Des débats pour confronter leurs idées

Intéressant, important, indispensable
Pourquoi ?

Trois enseignants interrogés n'ont pas donné de réponses.

47% des enseignants estiment que les débats sont intéressants pour confronter les idées des apprenants et 53% qu'ils sont importants et indispensables car ils permettent de réguler les idées en vue d'une meilleure compréhension. Ainsi, l'élève « [...] peut ajouter ou corriger une connaissance qui n'est pas bien assimilée » (P 23) ou « pour poser des questions et pour y réfléchir » (P 32).

13% notent qu'ils permettent de « fonder un esprit critique chez les élèves » (P 13), de « comparer et conclure » (P 16) et 6% d'apprendre aux élèves « [...] à écouter les idées des autres et les points de vue des autres même si elles s'opposent à ses idées » (P 6).

Pour 3% des enseignants, ils sont un moyen d'auto-évaluation en vue d'éventuelle régulation de leurs méthodes d'enseignement : « Les débats permettent au professeur de savoir plus sur les inconvénients de sa méthode » (P 2).

Les débats pour confronter les idées sont conçus par les enseignants quasi uniquement comme un moyen d'acquisition de connaissances.

Q1164P. Des activités documentaires (lecture et analyse de textes, recherche documentaire)

Intéressant, important, indispensable
Pourquoi ?

Autres

63% des enseignants trouvent important et indispensable de faire faire aux élèves des activités documentaires alors que 41% les trouvent intéressantes.

- 17% des enseignants pensent que ces activités initient à la lecture et enrichissent le langage scientifique : « [...] enrichir ses connaissances scientifiques et même enrichir ses capacités en langue » (P 28), « initier les élèves à lire, à mieux profiter de quelques documents scientifiques » (P 13) ;
- pour 13% des enseignants, elles servent à « améliorer la recherche documentaire » (P 29) et à « habituer l'élève à la recherche scientifique » (P 3) ;

- pour 13%, cette activité « *peut être un support de travail en l'absence d'une expérience* » (P 11) et « *à défaut d'expérience ou si l'expérience est très compliquée ; on peut avoir recours à ces activités documentaires pour mieux éclaircir le phénomène étudié* » (P 33) ;
- pour 6%, elles développent chez l'élève la capacité d'analyse : « *pour mener l'élève à la lecture d'un document scientifique et d'analyser son contenu* » (P 7).

Les enseignants ne semblent pas conscients de l'importance des activités documentaires pour familiariser l'élève avec les pratiques du chercheur, en particulier pour développer une habitude de lecture et de réflexion, de recherche et collecte d'informations, de tri et d'analyse de données. On retrouve comme dans le cas de la question portant sur l'apport de l'histoire des sciences, l'idée qu'elles peuvent pallier à l'impossibilité de faire des expériences.

7. Conclusion

Par leur enseignement, la majorité des professeurs cherchent à transmettre aux élèves des connaissances et des savoirs, et ce grâce à un cours simple et rapide. Cet enseignement est d'autant plus efficace qu'il est organisé de façon que l'élève fasse le moins d'erreurs possibles. Ils expriment ainsi l'idée d'un enseignement traditionnel transmissif.

D'autres enseignants, moins nombreux, tendent à développer chez l'apprenant l'acquisition de capacités d'analyse, de synthèse, de raisonnement, d'argumentation, l'apprentissage de méthodes, démarches, stratégies de résolution des problèmes, le développement d'attitudes telles que l'esprit critique et la créativité ainsi que celui d'une culture sociétale.

Pour beaucoup, la réflexion sur la façon dont les connaissances sont élaborées est intéressante en cours de physique-chimie, et ce, pour favoriser avant tout l'acquisition des savoirs scientifiques.

Une partie très grande des enseignants considère l'expérience comme un moyen d'apprentissage, comme un moyen pour avoir des lois et pour simuler des phénomènes naturels. Les exercices sont conçus le plus souvent comme un outil de renforcement et d'évaluation de l'atteinte des objectifs pédagogiques tandis que les débats pour confronter les idées sont perçus davantage comme un moyen d'apprentissage et les activités documentaires comme un support didactique en absence d'expériences.

Chapitre 2

Les représentations de la nature des sciences des enseignants

Partie 2 du questionnaire distribué en début de formation : Elle porte sur la façon dont travaillent les physiciens et est identique à celle distribué aux élèves lors des deux expérimentations

1. L'élaboration de la loi de la réfraction

Q₁₁₁: Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?

Un grand nombre d'enseignants (19 sur 35) n'ont pas donné de réponse. Le reste évoque divers arguments.

- pour 44%, la loi est établie en observant le phénomène « *Elle est basée sur l'observation* » (P 6) ;
- pour 25%, elle l'est en faisant des expériences, les savants « *ont fait beaucoup d'expériences* » (P 15) ;
- pour 15%, « *elle a été établie pour la 1^{ère} fois théoriquement [...]* » (P 2) ou par l'application du principe d'économie : « *la lumière prend le chemin le plus rapide* (P 30).

Les réponses révèlent chez les enseignants une image empirico- réaliste très prégnante et occultant la réflexion théorique.

Les réponses sur le nombre de savants qui ont participé à l'élaboration de la loi ne sont pas significatives car 25% des enseignants seulement se sont prononcés.

- 13% précisent que la loi est l'œuvre d'un savant: Descartes ou Ibn Al Haytham : « *[...] les lois de la réfraction ont été établies par Descartes* » (P 26), « *Par un physicien arabe Ibn al Haytham* » (P 30) ;

- 13% parlent de « savants » : « *Elle a été établie par différents moyens selon les besoins des savants [...]* » (P 20).

2. Les enjeux

Q₁₂₁ Que cherchent à faire les physiciens grâce à leurs travaux ?

Deux enseignants sur 35 n'ont pas répondu.

90% évoquent un enjeu relatif aux connaissances :

- 63% considèrent que les physiciens cherchent à comprendre et expliquer les phénomènes naturels : « *trouver des explications à certains phénomènes non encore découverts* » (P 27), « *expliquer les différents phénomènes rencontrés dans la nature...* » (P3) ;
- 47% estiment qu'ils cherchent à établir, découvrir, dégager des lois et faire évoluer les sciences : « *dégager certaines lois scientifiques* » (11P), « *[...] trouver des lois et des relations pour résoudre des problèmes* » (12P), « *de développer les résultats déjà trouvés, de résoudre quelques difficultés sans réponse jusqu'à maintenant* », « *évoluer la physique appliquée* » (P28) ;

21% des enseignants indiquent plusieurs aspects à la fois : « *[...] Ils essaient d'améliorer le mode de vie, d'explorer d'autres galaxies, d'utiliser le nucléaire pour l'agriculture* ».

3. Le rôle des expériences

Q₁₂₂ : Est-ce que le développement des connaissances en physique nécessite de faire des expériences ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

91% des répondants trouvent nécessaire de faire des expériences pour développer les connaissances en physique.

- Pour certains (41%) l'expérience est vue comme un moyen d'élaboration de savoirs : « *L'expérience est le début du chemin de la recherche et du savoir* » (P 6), elle permet ainsi

d' « accéder à une loi » (P 13); elle sert aussi « pour confirmer les hypothèses et les observations » (P 10) et « pour juger les résultats obtenus » (P 11) ;

- 9% des enseignants véhiculent une vision empirico-réaliste : « L'expérience est un fait réel pour l'élève qui attire son intention » (P 14) et lui « permet l'observation du phénomène » (P 31) ;

- Seuls 9% n'estiment pas que le développement des connaissances en physique nécessite de faire des expériences « par exemple Einstein a établi la loi $E = mc^2$ sans faire des expériences » (P 20).

La vision empiriste est très prégnante chez les enseignants.

4. Le rôle des mathématiques

Q₁₂₃ : Est-ce que le développement des connaissances en physique nécessite de faire appel aux mathématiques ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

La majorité des enseignants (9%) jugent qu'il est nécessaire de faire appel aux mathématiques pour développer les connaissances en physique.

- 55% d'entre eux les considèrent comme un outil utilisé en physique pour exprimer des résultats : « pour dégager une loi à partir d'une étude expérimentale » (P 29) , « pour développer une loi physique ; on a besoin d'une équation mathématique, d'un outil mathématique [...] » (P 6) ou pour formuler une loi : « utiliser les mathématiques est très nécessaire car un ensemble de lois ont des formulations mathématiques [...], pour la chimie toute réaction chimique est représentée par une équation [...] » (P 1) ;

- 16% considèrent les mathématiques comme un outil de démonstration : « il y a des cas où les outils mathématiques sont indispensables dans la démonstration » (P 32) ;

-16% les envisagent comme un moyen de modélisation : « oui créer des modèles mathématiques » (P 34), « on cherche toujours à modéliser les connaissances en physique par les mathématiques » (P 3).

Les mathématiques sont plutôt conçues comme un moyen pour la formulation des résultats que comme un outil de modélisation.

5. Les méthodes

Q₁₂₄ : Les physiciens doivent-ils suivre une méthode précise dans leur travail ?

Oui, quelle est cette méthode ? Pourquoi les physiciens doivent-ils suivre cette méthode ?

Non, pourquoi ?

69% estiment que les physiciens doivent utiliser une méthode précise dans leur travail, elle s'identifie à la méthode inductive. Le savant doit commencer par l' « *expérience, observation, interprétation, conclusion* » (P 35). Un seul affirme la primauté de la théorie sur les faits : « *poser une question, imaginer la réponse théoriquement, réaliser l'expérience, interpréter cette expérience et tirer la conclusion* » (P 2).

Par contre, 31% pensent que les physiciens ne devraient pas suivre une seule méthode sans, cependant, expliciter clairement les raisons, et un seul pense que les découvertes peuvent se faire au hasard : il « *[...] n'est pas nécessaire qu'ils suivent une méthode précise dans leur travail, ils peuvent découvrir des choses au hasard* » (P 28).

La majorité des enseignants font appel à une démarche ou méthode spécifique comme moyen pour aboutir à des connaissances scientifiques. Cette démarche est la mise en œuvre d'une série d'activités s'appuyant sur l'observation et l'expérimentation qui amènent à la production des lois et théories. Dans cette démarche, est affirmée la primauté des observations et des faits, l'expérimentation n'est guidée par aucune théorie. Ces sujets sont porteurs de points de vue qui renvoient le plus souvent à une épistémologie empiriste.

6. Le rôle de l'imagination et de la créativité

Q₁₂₅ : Les physiciens font-ils appel à leur imagination et créativité dans leur travail ?

Oui, quand ? Comment ?

Non, pourquoi ?

83% des enseignants pensent que les physiciens font appel à leur imagination et à leur créativité dans leur travail. Elles sont mobilisées :

- lorsque le phénomène n'est pas accessible par les sens (26%) : « *lorsque le phénomène n'est pas visible ou microscopique* » (P 12), « *quand ils veulent expliquer une réalité apparente* » (P 14) ou « *lorsque le phénomène n'est pas facile à saisir* » (P 16)

- lors de l'émission des hypothèses ou la conception des expériences (21%) : pour « *émettre des hypothèses - concevoir des expériences* » (P 13) et pour « *améliorer d'autres expériences* » (P 5).

17% pensent le contraire car les physiciens « *partent de la réalité et des choses qu'on peut toucher* » (P 9), « *l'imagination peut fausser les résultats* » (P 4), « *La physique et la chimie sont des sciences et non des arts* » (18P). Une vision réaliste naïve de la science est très prégnante chez ces enseignants. En effet, ils soutiennent que la physique et la chimie concernent l'étude des phénomènes, de la nature, du réel. La réalité est toujours exacte et l'imagination peut donc fausser les résultats.

7. Conclusion

La majorité des enseignants considèrent le plus souvent que les découvertes sont réalisées selon une démarche accordant une place prioritaire à l'expérience et occultant la réflexion théorique en réponse à un seul type d'enjeu, la recherche de lois. Cette conception est cohérente avec une vision empiriste et réaliste naïve de la science.

Le processus d'élaboration des connaissances envisagé est imprégné d'inductivisme et reflète ainsi les pratiques courantes des enseignants en classe. En effet, les cours « *consistent généralement en des activités centrées sur la découverte de lois que l'on prétend induire à partir des faits de l'expérience et des phénomènes observés... La démarche utilisée est pratiquement toujours fortement imprégnée d'inductivisme : le milieu, le matériel, les manipulations effectuées sont choisis et organisés avec comme fonction la mise en évidence de la loi* » (Robardet, 1994).

Les résultats concernant le rapport à l'enseignement des sciences et ceux obtenus à propos des représentations sur la nature des sciences montrent l'existence de similitudes. En particulier, ces professeurs pratiquent un enseignement traditionnel s'appuyant principalement sur la transmission des savoirs. Ceux-ci sont produits à partir des activités d'observation et d'expérimentation conformément à la conception inductiviste, résultat en conformité avec les conceptions des enseignants sur l'élaboration des connaissances scientifiques. Il se pourrait que ces similitudes traduisent l'existence d'une relation entre les conceptions des enseignants sur la nature des sciences et leurs conceptions sur l'enseignement et l'apprentissage et *vice versa* (Tsai, 2002).

Ils assignent un rôle important aux mathématiques et à l'imagination dans le travail du scientifique. La première est le plus souvent perçue comme un outil pour la formulation des résultats ou de démonstrations, quant à la seconde, elle est perçue comme un moyen pour accéder au phénomène lorsqu'il n'est pas accessible par les sens, pour émettre des hypothèses ou pour concevoir des expériences.

Chapitre 3

La posture des enseignants face à l'innovation pédagogique

Ce questionnaire comporte deux parties, la première porte sur la séquence d'enseignement, la seconde sur la formation reçue.

Questionnaire 2

Pour nous permettre d'améliorer la séquence d'enseignement innovante et cette séance de formation, merci de bien vouloir répondre aux questions suivantes.

Partie 1 : elle porte sur la séquence d'enseignement (les pourcentages ne sont pas exclusifs), les résultats sont regroupés dans le tableau 10.

Question 1 : faire réfléchir les élèves sur l'élaboration des connaissances scientifiques	Question 2 : la diversité des enjeux et des démarches	Question 3 : le travail sur documents
<p>63% : réflexion importante et indispensable 37% : intéressant</p> <p>34% : aide à l'acquisition des connaissances</p> <p>29% démarches et méthodes utilisées</p> <p>9% : l'histoire de l'élaboration d'une loi</p>	<p>54% cette prise de conscience importante et indispensable 46% intéressant</p> <p>34% : à des conséquences en termes d'apprentissage</p> <p>17% : à des conséquences sur la modification de la vision des élèves de la science</p>	<p>66% documents sont adaptés</p> <p>35% : ils servent à identifier les objectifs visés et à cerner les idées clés</p> <p>26% les textes sont clairs,</p>
		<p>34% : documents non adaptés</p> <p>29% : difficulté de compréhension (langue et contenu scientifique)</p> <p>6% : la physique est une activité expérimentale</p>
(35/35) 0 sans réponses	(35/35) 0 sans réponses	(35/35) 0 sans réponses

Tableau 10 : Tableau synthétique de la posture des enseignants sur la séquence d'enseignement innovante.

1. Question 1 : faire réfléchir les élèves sur l'élaboration des connaissances scientifiques

Q_{211P} : Le choix de faire réfléchir les élèves sur la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées vous semble-t-il intéressant, important, indispensable ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

63% des enseignants estiment important et indispensable de faire réfléchir les élèves sur la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées et 37% jugent cette réflexion intéressante.

- Cette réflexion aide à l'acquisition des connaissances scientifiques (34%) : pour « *mieux comprendre les faits et les explications* » (P 30) et « *pour amener les élèves à dégager les résultats ou les lois [...]* » (31P) ;

- elle sensibilise les élèves aux méthodes et aux démarches poursuivies par les savants (29%) : « *l'élève connaît les méthodes, les démarches avec lesquelles les connaissances scientifiques ont été élaborées* » (25P)

- pour 9% des enseignants, elle permet à l'élève de « *[...] Savoir l'historique d'une loi* » (P 6) ou d'un concept.

Cette réflexion porte le plus souvent sur l'acquisition des connaissances du contenu scientifique.

2. Question 2 : la diversité des enjeux et des démarches

Q_{212P} Le choix de faire prendre conscience aux élèves que les enjeux poursuivis par les scientifiques et les démarches suivies sont multiples vous semble-t-il intéressant, important, indispensable ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

Environ la moitié (54%) des enseignants soutiennent qu'il est important et indispensable de faire prendre conscience aux élèves de la multiplicité des enjeux poursuivis et des démarches adoptées par les scientifiques. 46% jugent intéressante cette réflexion.

Pour 34% des enseignants, cette prise de conscience a des conséquences en termes d'apprentissage : elle permet d'aider l'élève à chercher une démarche et à apprendre à résoudre des problèmes : « *pour que l'élève sache comment on doit faire pour répondre à un problème* » (P 34) , « *pour dire aux élèves que les chemins du savoir sont multiples* » (P 4) et

que si « [...] l'expérience ne marche pas, on passe à une étude mathématique » (P 3), à comprendre les enjeux poursuivis, pour « pouvoir expliquer les objectifs visés ».

Pour 17%, cette prise de conscience a des conséquences sur la modification de la vision des élèves de la science : « Car les élèves pensent que les démarches sont toujours expérimentales » (P 20) et « pour que l'élève comprenne que la loi n'est pas élaborée par un seul scientifique mais que c'est un résultat de multiples travaux » (P 28).

3. Question 3 : le travail sur documents

Q_{213P} Les documents vous semblent-ils bien adaptés pour le travail à faire faire aux élèves ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ? Quelles modifications leur apporteriez-vous ?

66% des enseignants considèrent que les documents sont adaptés pour le travail à faire faire aux élèves.

- pour 35%, ils servent à identifier les objectifs visés et à cerner les idées clés « parce qu'ils montrent les améliorations progressives des méthodes » (P 2), « [...] éclairer l'origine et la manière dont une loi a été construite » (P 1), « ils montrent aux élèves les questions (les problèmes à résoudre) » (P 11) ;

- pour 26%, les documents sont clairs et ont un contenu compréhensible et permettent d'« aider les élèves à exploiter les données plus facilement » (P 16).

34% estiment que les documents ne sont pas adaptés.

- 29% des enseignants indiquent qu'ils présentent des difficultés de compréhension (langue, contenus) sans cependant les spécifier « Les documents semblent un peu longs et difficiles (pour l'élève) » (P 30) ;

- 5% des enseignants signalent que « la physique est basée sur les activités expérimentales » (P 25).

4. Question 4 : les activités proposées aux élèves

Q_{214P} Les activités ci-dessous sont proposées aux élèves dans la séquence d'enseignement. Vous semblent-elles originales, intéressantes, importantes, difficiles à mettre en œuvre ?

Pour chaque cas, entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

Le tableau 11 récapitule les résultats relatifs aux activités des élèves, les pourcentages ne sont pas exclusifs.

Travail sur document	Travail collectif	Exprimer leurs idées et formuler une question à laquelle chercher une réponse	Apporter une réponse à la question posée en confrontant leurs idées aux apportées par les textes
<p>49% : une activité originale et importante 31% : activité intéressante</p> <p>20% : aide à l'apprentissage des contenus scientifiques</p> <p>14% activité originale 9% : motiver les élèves et crée un débat 9% : apprendre à lire un texte 9% : améliorer la culture 6% : un support à l'enseignement</p>	<p>60% : une activité originale et importante 37% : activité intéressante</p> <p>69% conséquence en termes d'apprentissage</p> <p>11% : un apport sur les attitudes et comportements</p>	<p>66% : une activité originale et importante. 31% : une activité intéressante. Dans la plupart des cas, les réponses traduisent des conséquences en termes d'apprentissage</p>	<p>53% : une activité originale et importante, 38% : activité intéressante</p> <p>44% : cette activité aide l'acquisition des connaissances 29% : permet de fonder un esprit critique 6% : permet d'améliorer la culture de l'élève</p>
<p>34% : difficile à mettre en œuvre (problème de langue, de la compréhension du contenu et de la gestion du temps et habitude de faire des expériences)</p>	<p>11% : une activité difficile à mettre en œuvre (organisation, gestion du groupe et du temps)</p>	<p>9% : une activité difficile à mettre en œuvre</p>	<p>12% : difficile à mettre en œuvre</p>
35/35 : 0 sans réponse	35/35 : 0 sans réponse	35/35 : 0 sans réponse	34/35 : 1 sans réponse

Tableau 11 : Tableau synthétique des résultats relatifs aux activités proposées aux élèves

Q_{2141P}: Travail sur documents

*Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre ?
 Pourquoi ?*

49% des enseignants considèrent que le travail sur documents est une activité originale et importante et 31% estiment qu'elle est intéressante. Les justifications sont très variées :

- pour 20%, cette activité aide à l'apprentissage des contenus scientifiques « elle aide l'élève à comprendre certains phénomènes physiques et améliorer ses connaissances » (P 28) ;

- pour 14%, cette activité est originale car « *les élèves sont habitués à réaliser des expériences* » (P 2) ;
- pour 9%, c'est une « *bonne méthode de motivation des élèves* » (P 7) ;
- pour 9%, elle permet à l'élève d'apprendre « *à lire un texte* » (P 1) ;
- pour 9%, elle permet d'« *améliorer sa culture* » (P 1) ;
- pour 6%, elle sert comme un « *support à l'enseignement* » (P 18).

Pour 34% des enseignants, le travail sur document est difficile à mettre en œuvre et ce, pour des problèmes de langue, de compréhension du contenu, de gestion du temps et de l'habitude de faire des expériences.

Q_{2142P}: Travail collectif

*Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre ?
Pourquoi ?*

60% des enseignants estiment que le travail collectif est une activité originale et importante et 37% supposent qu'elle est intéressante. Parmi eux :

- 69% indiquent des conséquences en termes d'apprentissage : « *Le travail collectif permet de discuter différentes idées et de les juger* » (P 25) ;
- 11% évoquent un apport sur les attitudes et comportements: il permet d'« *initier les élèves à un travail de groupe* » (P 13), à la « *complémentarité et l'entraide* » (P 27), d'« *apprendre à accepter les points de vue contraires* » (P 6), « *à discuter, à écouter les uns les autres* » (P 6).

Pour 11%, il s'agit d'une activité difficile à mettre en œuvre et ce pour l'organisation, la gestion du groupe et du temps.

Q_{2143P}: Exprimer leurs idées et formuler une question à laquelle chercher une réponse

*Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre ?
Pourquoi ?*

66% des enseignants pensent qu'il est original et important de permettre aux élèves d'exprimer leurs idées et de formuler une question à laquelle ils cherchent une réponse et 31% pensent que c'est intéressant.

Dans la plupart des cas, les réponses sont toutes différentes les unes des autres et traduisent des conséquences en termes d'apprentissage : « *[...] pour obtenir des réponses bien claires et satisfaisantes* » (P 1), « *pour les élèves, la recherche d'une réponse claire reste toujours très importante pour améliorer leurs connaissances* » (P 29), il s'agit d'une « *méthode*

interactive » (P 14) qui « *aide l'apprenant à construire d'une façon autonome son savoir* » (P 33) ou lui « *donne ... une confiance...* » (P 28).

Seuls 9% estiment que cette activité est difficile à mettre en œuvre.

Q_{2144P}: Apporter une réponse à la question posée en confrontant leurs idées à celles apportées par les textes

*Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre ?
Pourquoi ?*

53% des enseignants estiment qu'en permettant aux élèves d'apporter une réponse à la question posée en confrontant leurs idées à celles apportées par les textes est une activité originale et importante et 38% la trouvent intéressante.

- Pour certains (44%), cette activité aide l'acquisition des connaissances : elle « *[...] permet de tester les prés requis des élèves...* » (P 25) et de « *supprimer les représentations fausses des élèves* » (P 27), de « *bien construire les connaissances scientifiques* » (P 24) ;
- pour d'autres (29%), elle permet de « *fonder un esprit critique chez l'élève* » (P 13), de « *changer la façon de voir les choses* » (P 14) et qu'il « *se valorise* » (P 16) ;
- pour 6%, elle permet d'améliorer la culture de l'élève : « *[...] une méthode d'instruction et de culture* » (P 32).

Pour 12% cette activité est difficile à mettre en œuvre.

Q_{2145P} : La séquence d'enseignement propose que l'enseignant ne fasse qu'aider les élèves à avancer dans leur réflexion et élargisse les conclusions auxquelles ils sont arrivés. Cette méthode vous semble t- elle originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

56% des enseignants considèrent la méthode qui propose que l'enseignant ne fasse qu'aider les élèves à avancer dans leur réflexion et élargisse les conclusions auxquelles ils sont arrivés est originale et importante et 44% la trouve intéressante. 59% d'entre eux signalent qu'elle favorise l'acquisition des connaissances : elle « *aide l'apprenant à construire lui seul son savoir* » (P 33), lui permet de « *réfléchir aux questions et proposer des réponses* » (P 11), il « *est difficile d'oublier un savoir construit par soi- même* » (P 32).

12% estiment qu'elle est difficile à mettre en œuvre à cause de la pratique de la méthode transmissive et du manque de formation dans cette nouvelle pratique : « *L'élève est toujours en lien avec la méthode transmissive (il est passif)* » (P 26).

5. Question 5 : l'intérêt des élèves

Q_{2146P}: Pensez-vous que vos élèves seront intéressés par cette séquence d'enseignement ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

77% des enseignants supposent que les élèves seront intéressés par cette méthode.

- pour 44%, il s'agit d'une « *nouvelle méthode* » (P 5), « *active* » (P 7) qui peut selon 19% « *aider les élèves à la recherche* » (P 29) et « *améliorer la réflexion* » (P 31) ;
- pour 11%, « *elle donne aux élèves le goût de chercher et de connaître* » (P 21) et « *le plaisir et la confiance* » (P 18).

29% des enseignants indiquent que les élèves ne seront pas intéressés par cette séquence car d'un côté ils « *préfèrent les activités expérimentales* » (P 25) et de l'autre ils éprouvent des « *difficultés d'expression et de langue* » (P 23).

6. Question 6 : les difficultés prévisibles des élèves

Q_{2147P}: Pensez-vous que vos élèves rencontreront des difficultés lors de cette séquence d'enseignement ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Lesquelles ?

91% des enseignants pensent que les élèves rencontreront des difficultés lors de cette séquence d'enseignement. Les difficultés évoquées sont liées :

- à l'activité de lecture : « *difficultés linguistiques* » (63%), de « *compréhension* » (P 34) du contenu des textes (25%) ;
- à la mise en œuvre de la séquence (19%) : « *C'est la première fois qu'on réalise ce travail* » (P 29).

9% pensent que les élèves n'éprouveront pas de difficultés car ils seront intéressés et « *vont avancer leurs idées* » (P 22), ce qui favorise le conflit cognitif « *parce qu'ils ont des questions et des idées différentes* » (P 18).

7. Question 7 : les difficultés prévisibles de mise en œuvre de l'innovation

Q_{2148P} : Pensez-vous que vous rencontrerez des difficultés pour réaliser cette séquence d'enseignement avec vos élèves ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Lesquelles ?

Si vous avez répondu oui à la question précédente, qu'est-ce qui pourrait vous aider à surmonter les difficultés que vous envisagez ?

86% des enseignants pensent rencontrer des difficultés lors de cette séquence d'enseignement.

- 40% évoquent la contrainte de temps : elle « *nécessite beaucoup de temps* » (P 26) ;
- 27% soulignent le manque de formation initiale en histoire et en épistémologie des sciences, de ressources et de stratégies pour sa mise en œuvre « *il me faut un grand bagage historique..., bibliographie* » (P 3) ;
- 27% précisent qu'ils ne sont pas formés à ce type de pédagogie : « *cette séquence d'enseignement semble nouvelle* » (P 20), « *on doit avoir du temps pour les [élèves] habituer à cette méthode* » (P 28).

17% des enseignants pensent qu'ils ne rencontreront pas de difficultés. En effet, pour eux, il suffit que l'enseignant joue le rôle du médiateur et laisse les élèves travailler en petits groupes et s'exprimer.

La majorité des enseignants pensent rencontrer des difficultés lors de la réalisation de cette séquence. Ces difficultés sont dues à la gestion du temps, au manque de formation initiale en épistémologie et histoire des sciences, au manque de ressources et stratégies pour implémenter de telles activités, à la gestion de l'objectif d'apprentissage qui est de nature épistémologique et à la pédagogie mise en œuvre qui est nouvelle pour eux.

8. Question 8 : une banque de séquences d'enseignement fondées sur l'histoire des sciences

Q_{2149P} : Souhaiteriez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement portant sur l'histoire des sciences ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Sur quels thèmes ?

89% des enseignants souhaitent assister à d'autres séquences portant sur l'histoire des sciences.

- 32% souhaitent enrichir leur culture scientifique (méthodes, démarches, connaissances historiques [...]) : ces séquences permettent de connaître « *les méthodes, les démarches avec lesquelles les lois sont établies* » (P 25) ;

- 10% répondent que c'est « *pour mieux maîtriser cette méthode* » (P 14) pédagogique.

11% ne souhaitent pas assister à une deuxième séance de formation car elle ne propose pas d'activités d'expérimentation « *pour moi, c'est l'expérience qui va rester à l'esprit* » (P 6) et qu'elle « *demande beaucoup de temps et d'efforts [...]* » (P 21).

9. Une banque de situations d'enseignement fondées sur des démarches d'investigation

Q_{21410P} : Souhaiteriez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement fondées sur la même méthode pédagogique ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

88% des enseignants souhaitent avoir une autre séquence.

- 53% soulignent l'apport sur le plan de l'enseignement: « *pour mieux s'adapter à cette méthode* » (P 34), « *d'améliorer nos méthodes d'enseignement [...]* » (P 2) ;

- 7%, mettent en avant la formation de l'esprit et à la recherche : « *elle augmente le côté critique* » et « *améliore l'initiation à la recherche* » (P 10).

14% des enseignants ne souhaitent pas avoir une autre séquence car « *c'est une méthode compliquée* » et difficile à mettre en œuvre et qui ne comporte pas de support expérimental : « *difficile à l'appliquer* » (P 6), de plus « *les méthodes pédagogiques reposent sur des supports tels que les expériences* » (P 1).

Conclusion

Les résultats obtenus aux questions portant sur l'importance, l'intérêt et la mise en œuvre de la séquence d'enseignement révèlent que la majorité des enseignants lui réservent un accueil favorable tant au niveau de l'acquisition des connaissances et l'apprentissage des concepts scientifiques, de l'apport (autonomie, confiance, esprit critique, motivation, goût pour l'apprentissage,...), de l'organisation (l'initiation au travail de groupe, à la complémentarité et à l'entraide) et de l'objectif (diversité des enjeux et des démarches, ...).

Mais, il est à noter que la majorité des enseignants anticipent des difficultés pour la mise en œuvre de cette séquence d'enseignement innovante fondée sur la démarche d'investigation. Ces difficultés sont liées à la nouveauté de cette méthode pédagogique, au manque de formation en histoire des sciences et aux contraintes de temps.

Les résultats montrent aussi qu'une grande partie des enseignants privilégient un enseignement transmissif à caractère expérimental dû à une conception empiriste très prégnante chez eux.

Chapitre4

Les enseignants face à la séance de formation

1. Question 1 : Ce qui est important

Q221P : Y a-t-il des aspects de cette séance de formation qui vous ont paru plus importants que d'autres ?

Oui, lesquels ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Pour 77% des professeurs, les aspects qui paraissent importants portent sur :

- l'organisation (59%) : « *la discussion entre les collègues* » (P 28) et « *le travail collectif en groupe* » (P 31) ;
- la méthode d'enseignement (26%) : qui « *porte de nouveautés sur le côté pédagogiques et scientifiques [...]* » (P 29); « *l'aspect historique* » (P 13) des documents ;
- les objectifs d'apprentissage (15%) « *Je ne connaissais pas avant (les savants, les enjeux...) [...]* » (P 23), « *Les démarches et les résultats [...]* » (P 24).

2. Question 2 : Ce qui est inutile

Q222P : Y a-t-il des aspects de cette séance de formation qui vous ont paru inutiles ?

Oui, lesquels ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

83% des enseignants indiquent que tous les aspects de la séance de formation sont positifs sans cependant, avancer de justifications pertinentes. La réponse aux questionnaires lors de la séance de formation constitue pour 17% le seul aspect négatif !

3. Question 3 : Ce qui a manqué

Q223P : Y a-t-il des points qui vous ont manqué dans cette séance de formation ?

Oui, lesquels ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

46% des enseignants énumèrent certains points qui ont manqué dans cette séance de formation tels que l'absence d'activités « *expérimentales* » (P 21), un descriptif plus détaillé des différentes étapes de la méthode pédagogique « *plus d'explication pour la méthode utilisée* » (P 24).

Les 54% des enseignants restant n'ont pas d'objection.

4. Question 4 : Suivre des formations complémentaires

Q224P : Souhaiteriez-vous participer à d'autres séances de formation de ce type ?

Oui, pourquoi ? Quels points particuliers souhaiteriez-vous voir abordés ?

Non, pourquoi ?

83% des enseignants souhaitent participer à une autre séance de formation.

31% « *pour mieux comprendre et maîtriser cette pédagogie* » (P 30) et pour pouvoir l'« *appliquer dans les séances d'enseignements* » (P 6) ;

10% pour saisir « *les démarches poursuivies par les savants* » (P 1) et les enjeux.

Conclusion

Une majorité significative des enseignants considèrent importants les aspects de la séance de formation qui portent sur l'organisation (la discussion entre pairs, le travail en groupe), la nouveauté de la méthode pédagogique qui utilise la démarche d'investigation et s'appuie sur des documents historiques et les objectifs d'apprentissage qui sont de nature épistémologique. Environ la moitié des enseignants soulignent l'absence d'activités expérimentales et l'explicitation d'un canevas de la démarche d'investigation.

Beaucoup d'enseignants souhaitent participer à une autre séance de formation pour bien comprendre la démarche d'investigation en vue de son implémentation en classe et pour acquérir une culture sur l'élaboration du savoir scientifique

Dans leur rapport à l'enseignement des sciences, la majorité des enseignants privilégient un enseignement transmissif se fondant principalement sur l'observation et l'expérimentation selon la démarche inductive. L'expérience est considérée comme la clé de voûte dans l'apprentissage conceptuel, l'élaboration des lois et la simulation des phénomènes naturels. D'autres activités comme les exercices sont surtout perçus comme outils de renforcement et d'évaluation de l'atteinte des objectifs assignés à un cours, les débats comme permettant de confronter les idées et les documents comme un support didactique en absence d'expérience.

Le plus souvent, ces enseignants considèrent que les scientifiques cherchent à réaliser des découvertes selon une démarche accordant une place prioritaire à l'expérience et occultant la réflexion théorique en réponse à un seul type d'enjeu, la recherche de lois. La démarche envisagée est pratiquement toujours fortement imprégnée d'inductivisme, elle renvoie à une conception cohérente avec une vision empiriste et réaliste naïve de la science.

La posture des enseignants face à l'innovation pédagogique est ambivalente. Une majorité d'enseignants réservent un accueil favorable à la séquence d'enseignement, surtout en ce qui concerne l'acquisition des connaissances et l'apprentissage des concepts scientifiques, l'apport personnel (autonomie, confiance, esprit critique, motivation, goût pour l'apprentissage,...), l'organisation (l'initiation au travail de groupe, à la complémentarité et à l'entraide) et l'objectif (diversité des enjeux et des démarches, ...). Mais, il est à noter que la majorité des enseignants anticipent des difficultés pour la mise en œuvre de cette séquence d'enseignement

innovante. Ces difficultés sont liées à la nouveauté de cette méthode pédagogique, au manque de formation en histoire des sciences et aux contraintes de temps.

En ce qui concerne la séance de formation, une majorité significative des enseignants valorise les aspects de cette séance qui portent sur l'organisation (la discussion entre pairs, le travail en groupe), la nouveauté de la méthode pédagogique qui utilise la démarche d'investigation et s'appuie sur des documents historiques et les objectifs d'apprentissage qui sont de nature épistémologique. Ils souhaitent participer à une autre séance de formation pour bien comprendre la démarche d'investigation en vue de son implémentation en salle de classe et pour acquérir une culture sur l'élaboration du savoir scientifique.

Partie 5

Les résultats obtenus lors des deux expérimentations

Chapitre 1 : La première expérimentation avec les élèves

- **Du côté des élèves : Les questionnaires**
- **Du côté de l'enseignant : Le film/ l'entretien**

Chapitre 2 : La deuxième expérimentation avec les élèves

- **Du côté des élèves : les questionnaires**
- **Du côté de l'enseignant : le questionnaire**

Chapitre 3 : La comparaison des deux expérimentations avec les élèves

Chapitre 4 : La comparaison des conceptions des enseignants et des élèves

Chapitre 1

La première expérimentation avec les élèves

1. Du côté des élèves : Les questionnaires

La première expérimentation en classe a été réalisée en 2010 avec un groupe de 20 élèves (13 filles et 7 garçons). Un observateur extérieur a filmé cette expérimentation avec une caméra afin de pouvoir analyser la pratique de l'enseignant et ainsi faire le lien avec l'apprentissage des élèves.

Nous désignons par E_1 : expérimentation 1, par E_2 : expérimentation 2. Ainsi, l'expression ($9 E_1$) signifie l'élève numéro 9 de l'expérimentation 1 ; et ($7 E_2$) signifie l'élève numéro 7 de l'expérimentation 2.

1.1. Questionnaire 1 : les conceptions des élèves au début de la séquence d'enseignement

Ce questionnaire a une double fonction :

- permettre aux élèves d'émettre des hypothèses à tester;
- contribuer au suivi de l'expérimentation.

Les questions sont en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence et visent à connaître les représentations que se font les élèves de la façon dont la loi de la réfraction a été établie, des enjeux poursuivis par les scientifiques dans leur travail, des démarches suivies. Le questionnaire a été conçu de façon à induire une démarche de réflexion à partir d'une question très générale : « *Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?* ». On passe ensuite à des questions plus ciblées qui amènent les élèves à réfléchir sur le processus d'élaboration des savoirs en physique et à apporter une réponse plus précise.

1.1.1. Question 1 : l'élaboration de la loi de la réfraction

Q₁₁₁ : Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?

Les réponses données à cette question ont permis de classer les points de vue des répondants en deux catégories :

- le nombre de savants qui ont participé à l'élaboration de la loi ;
- la démarche utilisée.

Un nombre important d'élèves ne répondent pas : 5 sur 20. Beaucoup parmi les 15 élèves qui répondent n'évoquent pas clairement le nombre de savants qui ont participé à l'élaboration de la loi des sinus pour la réfraction. Le résultat concernant le nombre de savants reste donc peu significatif.

Seulement 3 élèves sur les 15 élèves qui ont répondu parmi les 20 interrogés, soit 20%, ne citent qu'un savant. Deux spécifient Descartes par le nom : « *Descartes a établi la loi des sinus pour la réfraction* » (9 E₁), « *[...] le premier qui l'a annoncée était Descartes* » (5 E₁)

5 élèves sur les 15 élèves qui ont répondu, soit 33%, citent plusieurs savants : « *Je ne sais pas la façon dont la loi des sinus a été établie mais je sais qu'elle était le résultat de plusieurs efforts de plusieurs savants* » (5 E₁)

Plus de la moitié des élèves rappellent dans leurs réponses que les scientifiques font appel à :

- l'observation (53%) : « *[...] un phénomène est souvent basé sur l'observation d'un fait que l'on cherche à démontrer [...]* » (7 E₁) ;
- aux expériences (73%) : « *[...] [la loi des sinus] a été établie autrefois par les expériences et les recherches et les mesures* » (8 E₁).

Deux élèves pensent que la loi a été établie par hasard : « *[...] ce dernier a été établie autrefois par hasard* » (15 E₁).

Notons enfin, qu'environ 53% des 15 élèves qui répondent parmi les 20 interrogés pensent que les savants utilisent le plus souvent une démarche précise fondée sur la mise en œuvre d'une succession d'activités (observations, hypothèses, expérimentations, etc.). Le savoir scientifique est envisagé comme une divulgation sensorielle ou empirique sous forme de mesures, calculs, formules et lois.

« *[...] Je pense que la base de l'établissement de cette loi est un ensemble de calculs géométriques après bien sûr des observations et des hypothèses et des expériences* » (14 E₁) ;

« *La loi des sinus a été établie par simple observation [...] cette observation a incité les savants à se poser des questions autour des causes de ce phénomène. En pensant que chaque phénomène dans la nature a une loi qui le contrôle, les savants ont essayé de trouver une loi pour ce qu'ils ont observé. [...] et pour cela, ils ont fait des expériences [...], avec des mesures précises, des interprétations et du calcul ils ont réussi à trouver cette relation* » (11 E₁).

En conclusion, la majorité des élèves pensent que le savant part d'observations, réalise des expériences et effectue des mesures pour établir la loi. L'observation et l'expérimentation constituent des moments fondamentaux dans l'élaboration du savoir scientifique. La démarche spécifique utilisée par les scientifiques est inductive. La connaissance scientifique semble être une réalité ontologique existant indépendamment du sujet connaissant qui peut y avoir accès par le biais de ses sens, exprimant ainsi une vision empiriste associée à un réalisme naïf.

1.1.2. Question 2 : les enjeux poursuivis par les scientifiques

Q₁₂₁ : Que cherchent à faire les physiciens grâce à leurs travaux ?

Trois catégories de réponses se dégagent des réponses des élèves :

- un enjeu relatif à la recherche de connaissances : l'explication et la compréhension de l'environnement, la découverte des lois de la nature et des vérités du monde ;
- un enjeu relatif à un besoin de sécurité tendant à faciliter la vie pratique aux gens ;
- une diversité d'enjeux.

60% des élèves parmi les 20 interrogés estiment que les savants cherchent à expliquer les phénomènes de la nature et à découvrir ses lois et ses secrets « [...] *veulent toujours découvrir plusieurs lois* » (13 E₁), « *les physiciens cherchent à faire grâce à leurs travaux de nouvelles théories pour l'humanité et pour découvrir l'inconnu* » (17 E₁).

45% des élèves parmi les 20 interrogés estiment que les physiciens cherchent, grâce à leurs travaux, à faciliter la vie quotidienne des gens et à développer l'humanité : « [...] *cherchent à développer l'humanité, à faciliter peut être la vie des gens [...]* » (18 E₁), « [...] *peut-être ils disent qu'ils veulent aider l'humanité [...]* » (14 E₁), « *Ils cherchent à faciliter la vie quotidienne de l'humanité* » (9 E₁).

40% des élèves indiquent plusieurs aspects à la fois :

« [...] *cherchent à développer l'humanité, à faciliter peut être la vie des gens, [...] comprendre la nature et son fonctionnement (phénomènes de la lumière, courant électrique...)* » (18 E₁)

« [...] cherchent à expliquer les phénomènes naturels pour pouvoir exploiter la nature comme il faut. Par exemple un physicien fait des recherches pour déterminer les gaz formant la couche d'ozone pour qu'il puisse la protéger » (11 E₁).

Un élève pense que le physicien cherche par son travail la célébrité : « *Imagine ton sentiment si tu es un physicien qui a découvert quelque chose : bien sûr tu vas dire : Oh, je suis célèbre* » (14 E₁).

Le scientifique est vu par les élèves comme quelqu'un qui est doté d'un appareil intellectuel hors du commun. Poussé par sa curiosité, il cherche à comprendre les phénomènes et les secrets de la nature. Il est alors amené à proposer des explications et à découvrir des lois et des théories. Il serait aussi guidé par le désir d'améliorer la qualité de la vie des gens.

Le scientifique ne crée pas ses objets d'étude : ceux-ci seraient préformés, préexistants et renverraient à des phénomènes comme l'éclipse de la lune, du soleil ou la chute d'une pomme. Son rôle est de proposer des explications et de « montrer » les lois correspondantes qui seraient cachées : « [...] [les physiciens] cherchent à faire montrer des lois [...] et à expliquer les phénomènes sur terre comme Newton qui a expliqué le phénomène du champ de pesanteur » (2 E₁).

1.1.3. Question 3 : le rôle des expériences

Q_{1.2.2} : Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas d'expérience ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Deux catégories de points de vue émergent des réponses.

Une forte majorité des élèves (90%) s'accordent à dire que les découvertes ne peuvent se faire sans réaliser d'expériences. Certains parmi eux pensent :

- Qu'elles servent directement à faire des découvertes (55%) : « [...] car ces expériences peuvent nous aider à faire des découvertes » (10 E₁) ;
- Qu'elles confirment ou infirment les découvertes réalisées (25%) : « [...] car on ne peut pas donner une loi ou une réponse d'une question sans expérience » (3 E₁), « parce que si on n'a pas fait des expériences on ne peut pas être sûr de ces découvertes [...] » (19 E₁), « parce que quand on fait des découvertes on fait un raisonnement et on est obligé de faire des expériences pour savoir si ce raisonnement est vrai ou faux » (1E₁) ;

- Qu'elle permet la compréhension des phénomènes découverts : (15%) « [...] *il faut faire des expériences pour découvrir un phénomène et le comprendre, [...] il est difficile d'imaginer tout simplement* » (7 E₁);
- Qu'elle permet la monstration et la reproduction du phénomène observé : (10%) « [...] *car l'expérience nous permet d'observer ce qui se passe...* » (11 E₁); « [...] *parce que l'expérience montre les choses difficiles* » (12 E₁).

Il se dégage ici l'idée que les découvertes sont induites principalement à partir des faits de l'expérience et des phénomènes observés.

Seuls 10% des élèves estiment qu'on peut ne pas recourir aux expériences pour faire des découvertes « [...] *car le savant peut découvrir des choses par hasard ou par simple coïncidence en exerçant sa vie de tous les jours [...]* » (15 E₁)

1.1.4. Question 4 : le rôle des mathématiques

Q_{1.2.3}: Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas appel aux mathématiques ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Deux catégories de conceptions se dégagent des réponses des élèves.

La majorité des élèves (85%) soutiennent qu'on ne peut pas faire de découvertes en physique si l'on ne fait pas de mathématiques.

- Elles sont vues comme un intermédiaire car elles permettent de réaliser des mesures, des calculs (45%) : « [...] *car n'importe quelle expérience demande l'intervention des mathématiques (mesure des angles, repérage)* » (11 E₁), « *les découvertes nécessitent des applications numériques* » (5 E₁).
- Elles sont constitutives de l'explication en physique car elles permettent d'établir des relations, des équations (30%) : « *il faut utiliser des formules précises pour que la découverte soit plus détaillée* » (17 E₁), « *car la physique est toujours liée aux mathématiques* » (9 E₁).
- Ceux qui sont contre (15%) estiment qu'on n'est pas obligé d'avoir des connaissances en mathématiques pour faire des découvertes car « *la physique dépend de la nature* » (16 E₁), « [...] *il y a un certain nombre de découvertes en physique qui ne s'expriment pas avec des lois mathématiques* » (2 E₁).

La grande majorité des sujets pensent que les découvertes scientifiques sont réalisées au moyen d'activités d'observation et d'expérimentation qui utilisent les mathématiques. Celles-ci sont vues comme intermédiaires ou constitutives de l'explication (interprétation) en physique.

1.1.5. Question 5 : les méthodes

Q₁₂₄ : Les physiciens doivent-ils suivre une méthode précise dans leur travail ?

Oui, quelle est cette méthode ? Pourquoi les physiciens doivent-ils suivre cette méthode ?

Non, pourquoi ?

Plus de la moitié des élèves (55%) font appel à une démarche ou méthode pour aboutir à des connaissances scientifiques. Celle-ci peut être basée essentiellement sur :

- l'expérience (35%) qui se résume à : « [...] *Observation, hypothèse, expérience puis interprétation* » (5 E₁), « [...] *Observer, commenter, expérimenter et conclure* » (9 E₁), « *voir le phénomène [...] puis réaliser l'expérience* » (2 E₁) ;
- un calcul ou un raisonnement théorique (15%) : « [...] *la méthode doit commencer par des calculs* » (14 E₁), « [...] *suivre une succession d'hypothèses puis, [...] les démontrer* » (11 E₁).

Certains parmi ceux qui croient à la méthode unique (35%), considèrent que cette méthode permet d'avoir de bons résultats et qu'elle est celle qui est reconnue : « [...] *pour sortir une découverte confirmée* » (14 E₁), « *pour avoir de bons résultats* » (5 E₁).

Par contre, 45% des élèves supposent qu'il existe plusieurs méthodes utilisées par le physicien dans son travail. Ils associent cette diversité de méthodes à :

- la spécificité individuelle du savant : « *car chaque physicien a sa méthode personnelle et veut la suivre* » (15 E₁) ;
- la différence de la nature des objets techniques utilisés à chaque époque : « [...] *parce que chacun d'eux est venu dans une période et ils n'ont pas les mêmes matériaux* » (20 E₁).

La majorité des réponses renvoient à l'existence d'une procédure très finement établie qui s'apparente à la démarche fondée sur l'observation, l'émission d'hypothèses et l'expérimentation. Les étapes sont prédéterminées, résumées par le fameux OHERIC d'André Giordan (1978) que les scientifiques utilisent pour développer leurs recherches et pour les conduire jusqu'aux conclusions logiques, démontrables et vérifiables. Ces réponses n'évacuent pas cependant le raisonnement théorique.

En revanche, une proportion moins élevée des élèves adhèrent à une vision plus éclairée : il existe selon eux une diversité de méthodes ou démarches. Selon le contexte ou la disponibilité des matériaux techniques, le physicien utilise une méthode ou une autre.

1.1.6. Question 6 : le rôle de l'imagination et de la créativité

Q₁₂₅ : Les physiciens font-ils appel à leur imagination et créativité dans leur travail ?

Oui, quand ? Comment ?

Non, pourquoi ?

Des réponses analysées émergent deux visions opposées.

La moitié des répondants (55%) estiment que les physiciens font appel à leur imagination et leur créativité. Pour 45% d'entre eux, les scientifiques en font usage quand la réponse n'est pas immédiate ou quand le phénomène n'est pas accessible par les sens ou pour l'émission d'hypothèses : « *Lorsqu'il ne trouve pas une réponse* » (1 E₁) ; « *[...] lorsque le phénomène est spatial* » (11 E₁) ou quand les physiciens rencontrent des problèmes « *Ils doivent supposer et donner des hypothèses* » (5 E₁).

Environ 45% des sujets considèrent que « *la physique n'est pas l'imaginaire c'est la réalité* » (19 E₁) et « *la réalité est toujours exacte* » (12 E₁), par conséquent il est inutile d'imaginer. Ceux-ci véhiculent une image réaliste des sciences.

L'imagination et la créativité sont mobilisées uniquement lors de l'émission des hypothèses, la conception d'un protocole expérimental, ou lorsque la réponse n'est pas immédiate par l'expérience. Elles semblent absentes lors de la recherche d'une loi à partir des résultats de mesures, de l'élaboration d'une théorie, d'un modèle scientifique ou d'une entité théorique.

Le tableau 12 récapitule les conceptions des élèves relatives au questionnaire passé avant enseignement. Les pourcentages ne sont pas exclusifs.

Question 1 : l'élaboration de la loi de la réfraction	Question 2 : les enjeux	Question 3 : le rôle des expériences	Question 4 : le rôle des mathématiques	Question 5 : les méthodes	Question 6 : le rôle de l'imagination et de la créativité
<p>33% : plusieurs savants ont participé à l'élaboration de la loi.</p> <p>20% : un seul savant</p>	<p>60% : un enjeu relatif aux connaissances</p>	<p>90% : les découvertes ne peuvent se faire sans réaliser d'expériences.</p> <p>55% : permettent la découverte et l'élaboration des lois</p> <p>25% : confirment ou infirment les découvertes réalisées</p> <p>15% : la compréhension des phénomènes découverts</p>	<p>85% les découvertes nécessitent l'usage des mathématiques</p> <p>45% : ce sont des intermédiaires (mesures, calculs,...)</p> <p>30% : constitutives de l'explication (formules, des équations)</p>	<p>55% : une méthode précise</p> <p>35% : la méthode est expérimentale</p> <p>15% : la méthode est théorique</p> <p>35% : la méthode permet d'avoir les bons résultats et est celle qui est reconnue</p>	<p>55% : les physiciens utilisent l'imagination et la créativité</p> <p>45% : quand la réponse n'est pas immédiate-plus d'idées-émission d'hypothèses</p>
<p>73% : en faisant des expériences</p>	<p>45% : un enjeu relatif à la vie pratique</p>				
<p>53% : en observant le phénomène</p>	<p>40% : plusieurs enjeux à la fois</p>	<p>10% : les découvertes se font sans expérience (hasard)</p>	<p>15% contre : la physique dépend de la nature, on n'est pas obligé d'avoir des connaissances en maths</p>	<p>45% : plusieurs méthodes</p>	<p>45% contre : la physique n'est pas l'imaginaire c'est la réalité</p>
<p>(15 /20) : 5 sans réponse</p>	<p>(20 /20) 0 sans réponse</p>	<p>(20 /20) : 0 sans réponse</p>	<p>(20 /20) 0 sans réponse</p>	<p>(20 /20) : 0 sans réponse</p>	<p>(20 /20) : 0 sans réponse</p>

Tableau 12 : Réponses des élèves avant enseignement (expérimentation 1)

1.1.7. Conclusion

En ce qui concerne la question posée au début de la première expérimentation, beaucoup d'élèves ne précisent pas dans leur réponse le nombre de savants qui ont participé à l'élaboration de la loi des sinus pour la réfraction, le résultat reste peu significatif.

La majorité des élèves évoquent un seul enjeu et estiment que les activités des scientifiques sont centrées sur la découverte de lois induites à partir des phénomènes observés et des résultats de l'expérience.

Pour la majorité des élèves, la méthode ou la démarche préconisée pour parvenir à des connaissances scientifiques sûres correspond à la démarche expérimentale connue pour ses étapes bien déterminées (observations, hypothèses, expérimentation,...). Bien que les élèves accordent une place importante à la créativité et à l'imagination dans le processus de construction des savoirs scientifiques, celles-ci sont seulement envisagées dans les situations où il est impossible de trouver une réponse immédiate à une question ou d'élaborer une expérience.

La grande majorité des élèves sont porteurs de conceptions qui renvoient à une épistémologie empiriste (primauté des faits sur la théorie) et réaliste naïve (les objets de la science existent dans le monde où ils sont découverts par les scientifiques).

Ils véhiculent le plus souvent une image dépassée de la démarche des scientifiques.

1.2. Questionnaire 2 : le rapport à l'innovation des élèves

La première question de ce questionnaire vise à évaluer le degré de compréhension des documents historiques utilisés par les élèves en vue d'y apporter les modifications nécessaires pour la seconde expérimentation. La seconde question cherche à déterminer si l'aide apportée pour extraire l'information des textes (le tableau partiel) était adaptée. Ces deux questions ne seront pas proposées lors de la deuxième expérimentation.

Les autres questions du questionnaire portent sur l'importance et l'intérêt de la séquence, sur son organisation et son contenu, sur son apport.

1.2.1. Question 1 : les textes

Q_{2.1.1} : Tous les documents sont-ils faciles à comprendre ?

Oui.

Non, Lesquels ? Pourquoi ?

70% des répondants considèrent que les documents sont faciles à comprendre. Les autres évoquent des difficultés de compréhension. Ils spécifient les textes de Snellius et d'Al Hazen.

1.2.2. Question 2 : le tableau à renseigner

Q_{2.1.2} : Avez-vous eu des difficultés à vous mettre d'accord avec les camarades de votre groupe sur la façon de remplir le tableau ?

La majorité des élèves n'ont pas éprouvé de difficultés à se mettre d'accord avec les camarades sur le remplissage du tableau. Seulement 10% des élèves ont éprouvé des difficultés pour saisir

la signification des termes « enjeu » et « démarche » ainsi que pour exprimer leur idée sur la façon dont la loi des sinus a été établie.

1.2.3. Question 3 : ce que la séquence apprend d'important

Q_{2.2.1}: Qu'est-ce qui vous paraît le plus important dans ce que vous avez appris aujourd'hui et pourquoi ?

Deux catégories de réponses relatives à l'importance de ce qui a été réalisé en classe peuvent être dégagées. Cette importance porte sur *le contenu* de la séquence et *son organisation*.

65% des apprenants évoquent le contenu de la séquence. Parmi eux, certains soulignent :

- la diversité des démarches utilisées par les scientifiques (60%) : « *la chose la plus importante est [...] les démarches du savant* » (14 E₁) ;
- le nombre de savants qui a participé dans cette recherche (40%) : « *c'est de connaître plusieurs savants et de connaître leurs démarches et leurs résultats* » (20 E₁) ; « *[...] j'ai découvert plusieurs savants et leurs méthodes différentes* » (2 E₁) ;
- la diversité des résultats obtenus par les savants (25%) : « *[...] c'est de savoir que les lois de la physique sont les résultats de multiples travaux de plusieurs savants* » (5)
- la diversité des enjeux poursuivis par les savants (15%) : « *c'est savoir que plusieurs savants avec plusieurs enjeux différents peuvent découvrir la même loi* » (9 E₁)

30% indiquent l'organisation de la séquence. Celle-ci a constitué pour eux une nouvelle expérience qui leur a permis de:

- travailler en groupe : « *[...] lire les documents et chercher les informations en petits groupes* » (17 E₁) ;
- favoriser la « *discussion entre le professeur et élèves...* » (18 E₁) ;
- « *confronter les idées avec les résultats de la lecture collective des documents* » (16 E₁).

Notons que la séquence a reçu un accueil favorable tant sur l'organisation (travail en groupes), que sur l'objectif et le contenu historique.

1.2.4. Question 4 : l'importance de la réflexion historique

Q_{2.2.2} : Pensez-vous qu'il est important de faire réfléchir les élèves en cours de physique à la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées?

Oui : pourquoi ?

Non : pourquoi ?

La majorité des répondants (70%) trouvent important de les faire réfléchir sur la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées. Ils avancent différentes raisons. Cette réflexion :

- leur permettrait de connaître le processus d'élaboration des lois et les méthodes ou démarches utilisées pour y aboutir (52%) : « *car il faut que l'élève comprenne bien comment on a obtenu la loi* » (10 E₁), « *pour comprendre la méthode qui est essentielle* » (4 E₁) ;
- ne leur permettrait pas d'accepter les résultats aveuglement (35%) : « [...] *car il ne faut pas prendre les lois et les mettre bêtement sans connaître la méthode avec laquelle on a obtenu cette loi* » (2 E₁), « *Il ne faut pas que l'élève prenne la leçon et l'apprenne sans la comprendre et sans avoir la possibilité d'en discuter avec le professeur* » (18 E₁) ;
- permettrait de développer la confiance en soi et l'envie d'étudier les sciences (1 seul élève) : « [...] *pourquoi pas un jour nous nous inventons une loi comme ces savants* » (19 E₁).

Ceux qui pensent que c'est inutile (15%) se concentrent sur les résultats des sciences en lien avec un rapport d'utilité et de rentabilité : « [...] *l'important c'est de connaître la loi pour l'établir* » (16 E₁), « *l'important c'est d'avoir la formule à la fin* » (17 E₁), « *l'intéressant pour moi c'est juste de connaître la formule* » (20 E₁).

Dans un cas comme dans l'autre, les sujets présentent un rapport strictement utilitaire au savoir en lien direct avec la réussite des études. Ce type de rapport ne conduit pas à transmettre des connaissances sur la nature des sciences aux élèves et à développer chez eux des conceptions en conformité avec l'épistémologie contemporaine. Il se manifeste selon deux perspectives :

- la première estime que la réflexion sur le processus d'élaboration des connaissances permettrait une meilleure connaissance des démarches utilisées et des enjeux poursuivis par les scientifiques, une discussion éclairée des résultats obtenus et le développement de la confiance en soi chez l'apprenant. Tous ces facteurs aideraient à développer des stratégies d'apprentissage permettant une meilleure maîtrise des savoirs scientifiques mais ne fournissant pas une éducation adéquate aux sciences ;
- la seconde voit dans ce type de réflexion une perte de temps qui ne mène pas loin et qu'il faudrait éviter, et ce en cohérence avec des habitudes institutionnelles très enracinées « *dont l'objectif est de pousser les élèves à apprendre des connaissances toutes prêtes plutôt que de développer la production de connaissances, en étouffant ainsi leur créativité* » (Roletto, 1998, p.27).

1.2.5. Question 5 : l'apprentissage par investigation

Q2.2.3 : Souhaitez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement organisées de cette façon ?

Oui : pourquoi ?

Non : pourquoi ?

60% des élèves s'intéressent à la séquence d'apprentissage et désirent assister à une séance analogue. En ce qui concerne les raisons :

- 33% sont attirés par son organisation : « Cette séquences est organisée mieux que la séance normale » (3 E₁) ;
- 17% par son contenu : « [...] c'est mieux de connaître les étapes suivies par celui qui a trouvé la loi utilisée maintenant » (11 E₁), « pour comprendre plusieurs méthodes » (4 E₁) ;
- 40% des élèves ne désirent pas assister à une autre séquence pour diverses raisons qui ne sont pas liées à l'apprentissage. Les raisons invoquées sont relatives à la durée relativement longue de la séquence et à la difficulté de s'exprimer en langue française : « ces séquences sont intéressantes mais elles font perdre du temps,... si on a le temps de faire des expériences et des exercices. Je pense que c'est mieux d'avoir d'autres séquences » (5 E₁) ; « [...] elle est peut être intéressante pour les bons élèves qui comprennent bien le français mais pour les moins bons ou mauvais élèves ils ne s'intéressent pas au cours » (18 E₁).

1.2.6. Question 6 : Intérêt, difficulté et utilité du travail demandé

Q2.2.4 : Précisez dans le tableau ci-dessous en répondant par oui ou non si le travail proposé pendant ces différentes périodes vous a intéressé, paru difficile, utile.

Q241 : Exprimer nos idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois			Q242 : Lire les documents et chercher les informations en petits groupes			Q243: Mettre en commun les informations recueillies par les différents groupes			Q244 : Confronter nos idées avec les résultats de la lecture collective des documents			Q245 : Résumer et généraliser les résultats obtenus		
diff	util	int	diff	util	int	diff	util	int	diff	util	int	diff	util	int

Le tableau 13 récapitule les résultats obtenus.

Q241 : Exprimer nos idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois			Q242 : Lire les documents et chercher les informations en petits groupes			Q243: Mettre en commun les informations recueillies par les différents groupes			Q244 : Confronter nos idées avec les résultats de la lecture collective des documents			Q245 : Résumer et généraliser les résultats obtenus		
diff	util	int	diff	util	int	diff	util	int	diff	util	int	diff	util	int
65	30	35	25	45	55	0	75	50	10	60	70	10	60	70
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Tableau 13 : Intérêt, difficulté et utilité du travail éprouvés par les élèves (expérimentation 1)

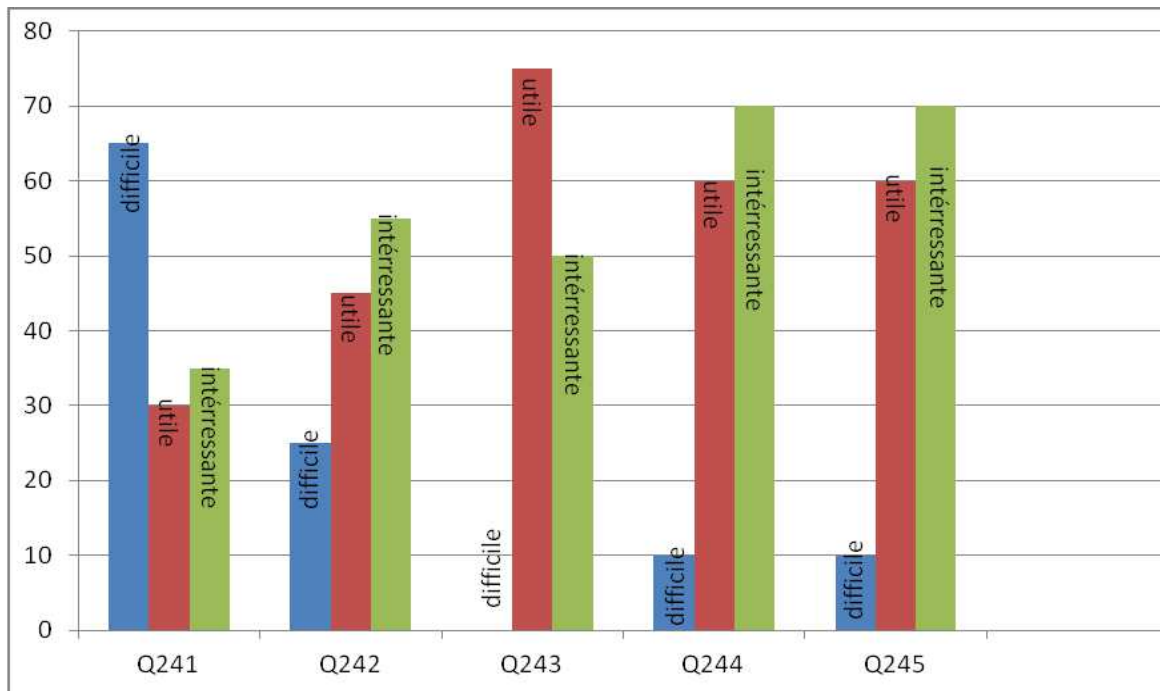


Fig 15 : histogramme traduisant la difficulté, l'utilité et l'intérêt du travail éprouvés par les élèves lors de l'expérimentation 1

65% des élèves éprouvent des difficultés pour exprimer leurs idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie. Par contre, les activités de lecture des documents et de recherche des informations sont assimilées par environ (75%) des répondants.

Les activités de confrontation des idées au sein d'un groupe, de la mise en commun des informations recueillies par les différents groupes d'élèves, de l'élaboration du résumé et de la généralisation des résultats sont bien assimilées (90%)

Ces activités sont perçues comme utiles par un pourcentage d'élèves variant entre 45% et 75% selon la nature de l'activité considérée et intéressantes entre 55% et 70%.

1.2.7. Question 7 : Accueil de la séquence

Q_{2.2.5} : conclusion : Comment avez-vous trouvé cette séquence d'enseignement ?

Les élèves réservent un accueil plutôt favorable à la séquence d'enseignement. En effet, 65% l'ont trouvée « *très intéressante et utile* » par contre 30% l'ont trouvée ennuyante et peu utile « *[...] je ne la crois pas très utile..., c'est une méthode un peu longue qui peut être plus courte si on étudie un seul savant qui a pu déterminer la loi utilisée maintenant* ».

Les réticences éprouvées par un certain nombre d'élèves sur l'importance et l'intérêt de la séquence peuvent être expliquées par le fait que ces élèves sont habitués à un enseignement transmissif au cours duquel l'enseignant prend tout en charge. Ils se sont trouvés un peu bousculés lorsqu'ils ont été mis dans une situation d'investigation les engageant directement à effectuer des apprentissages en réalisant des tâches qui ne sont pas d'ordre expérimental et en poursuivant des objectifs cognitifs relatifs à l'image de la nature des sciences et non à un savoir scientifique.

1.2.8. Conclusion

La séquence a reçu un accueil favorable de la part de la majorité des apprenants sur le plan :

- du contenu (la diversité des méthodes et des démarches suivies, le nombre des savants qui ont participé à cette recherche, la diversité des résultats obtenus et la diversité des enjeux poursuivis bien que ces derniers ne soient pas totalement perçus par la majorité des étudiants) ;
- de l'organisation (l'importance du travail en groupe, la discussion, la confrontation des idées, etc.) ;
- de l'apport personnel (l'autonomie, la confiance en soi, l'esprit critique et l'envie d'étudier les sciences.).

D'autres sont plutôt réticents : ils se concentrent davantage sur les résultats des sciences et présentent un rapport strictement utilitaire au savoir.

1.3. Questionnaire 3 : les conceptions des élèves un mois après la séance innovante

Ce questionnaire vise à évaluer l'impact de la séance d'enseignement-apprentissage sur les conceptions des élèves. Sa passation a été effectuée un mois après la réalisation de la séance.

1.3.1. Question 1 : un ou plusieurs savants

Q₃₁₁ : Selon vous, est-il correct d'appeler la loi de la réfraction « loi de Descartes » ?
Oui, pourquoi ?
Non, pourquoi ?

Les réponses révèlent que 55% des élèves se réfèrent toujours à un seul savant en citant le plus souvent Descartes : « *Parce que Descartes est arrivé à découvrir cette loi-là* » (2 E₁), « *puisque c'est Descartes qui a trouvé cette loi et a trouvé des explications pour ce phénomène* » (18 E₁).

Plusieurs explications peuvent être avancées : la leçon qui précède celle sur la réfraction porte sur la réflexion, phénomène régi par une loi aussi dite de Descartes, et l'enseignant a utilisé l'expression loi de Descartes ; les manuels scolaires à la disposition des élèves nomment la loi de la réfraction « loi de Descartes » ; la question d'évaluation met l'accent sur Descartes ; Descartes peut être perçu comme le dernier en date et donc celui dont l'apport est décisif.

Une évolution relative à la diversité des savants qui ont participé à l'élaboration de la loi des sinus pour la réfraction est observée chez 45% des élèves. Ils affirment qu'il ne s'agit pas de la loi de Descartes car il n'est pas le seul à l'avoir trouvée, d'autres scientifiques ont participé à sa découverte. Deux élèves citent des noms (Snell, Ibn Al Haytham) : « *Descartes n'est pas le seul qui a fait cette loi* » (3 E₁), « *car il y a plein d'autres savant qui ont découvert la même loi (exp : Snellius)* » (7 E₁), « *car il y a plusieurs scientifiques qui ont découvert ce phénomène comme Ibn al Haytham* » (20 E₁).

1.3.2. Question 2 : les enjeux

Q₃₂₁ : On entend souvent dire que les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels. Selon vous, est-ce que cela concerne tous les scientifiques ?

La majorité des répondants (80%) pensent que tous les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels : « *les lois sont dans la nature et les scientifiques ont juste à les trouver* » (17 E₁), « *la nature entre dans tous les domaines* » (13 E₁), « *la science c'est quelque chose de naturelle* » (7 E₁), « *[...] les scientifiques ont un problème naturel pour le résoudre* » (19 E₁). Parmi ceux qui pensent le contraire (20%), certains considèrent que les scientifiques sont préoccupés par « *d'autres buts et d'autres enjeux* » (5 E₁). Pour un autre, ils « *s'intéressent aux choses virtuelles* » (9 E₁).

Les élèves considèrent majoritairement que tous les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels et évoquent donc toujours un seul enjeu. De plus, une vision réaliste-empiriste persiste.

Notons que les élèves signalent des difficultés pour saisir la signification du mot enjeu. Le même constat ressort de l'analyse de la vidéo : l'enseignant n'emploie quasiment pas le terme et utilise différentes expressions telles que but, question, problème, ce qui pousse le savant à chercher, etc.

1.3.3. Question 3 : les méthodes

Q₃₃₁ : Selon vous, les scientifiques travaillent-ils tous de la même façon ?

95% des répondants pensent que les scientifiques ne travaillent pas de la même façon, ils utilisent des méthodes différentes. Cette diversité est expliquée par:

- la différence d'idées, de la façon de travailler, des styles de pensée chez les savants (65%) : « *chaque personne a son propre style de travail car chacun a son but et son idée* » (13 E₁), « *chacun d'eux à une méthode et une façon de travailler [...]* » (2 E₁), « *il y a des scientifiques qui utilisent d'autres méthodes* » (6 E₁) ;
- la méthode repose sur l'expérience ou/et l'observation (30%) : « *[...] des scientifiques qui font des observations, des expériences ...* » (18 E₁), « *[...] certains font des expériences, d'autres des observations...* » (7 E₁), « *car les scientifiques travaillent avec différents matériaux* » (1 E₁) ;
- un seul (5%) évoque la méthode théorique : « *chacun a sa manière [...] théorique* » (5E₁).

Un seul sujet (5%) précise que les savants utilisent tous la même méthode « *Il y a des étapes pour travailler et qui sont connues chez la majorité des savants* » (9 E₁).

1.3.4. Conclusion

Le tableau 14 récapitule les résultats sur le nombre de savants, les enjeux et les démarches avant et après l'expérimentation 1.

Résultats avant la première expérimentation N=20		
Nombre de savants	Enjeux	Méthodes
20 % : 1 savant	60% : 1 enjeu	55% : une méthode
33% plusieurs savants	40% : plusieurs enjeux	45% : plus d'une méthode
5/20 : 25% sans réponses	0/20 : 0% sans réponses	0% : sans réponses
Résultats après la première expérimentation N=20		
Nombre de savant	Enjeux	Méthodes
55%: 1 savant	80% : 1 enjeu	5%: une méthode
45%: plusieurs savants	20% : plusieurs enjeux	95% : plus d'une méthode
0% : sans réponses	0% : sans réponses	0% : sans réponses

Tableau 14 : Résultats avant-après sur le nombre de savants, les enjeux et méthodes (expérimentation 1)

Les résultats obtenus au questionnaire final montrent que les objectifs d'apprentissage épistémologique n'ont pas été atteints de la même façon. Ils indiquent une évolution très significative dans la vision des élèves sur la façon dont travaillent les scientifiques : la diversité des méthodes et démarches a été nettement perçue.

Par contre, les élèves considèrent majoritairement que tous les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels et évoquent donc toujours un seul enjeu. Ce résultat pourrait être expliqué par des difficultés éprouvées tant par l'enseignant que par les élèves pour saisir la signification du mot enjeu.

Par ailleurs, environ la moitié des élèves se réfèrent à un seul savant en citant le plus souvent Descartes. Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer la persistance de cette conception : la présentation de la loi de réfraction dans les manuels scolaires à la disposition des élèves l'associe toujours à Descartes, la formulation de la question d'évaluation met l'accent sur Descartes, Descartes peut être perçu comme le dernier en date et donc celui dont l'apport est décisif.

2. Du côté de l'enseignant

2.1. Analyse du film

- Sur le plan pédagogique :

Organisation temporelle

Phase 1 : distribution de la partie 1 du questionnaire 2 et réponse des élèves aux questions (3min)

Phase 2 : position du problème et émission d'une hypothèse, rappel de la question posée à la fin de la séance servant à l'introduction du phénomène de la réfraction et à laquelle les élèves ont cherché une réponse écrite à la maison: *Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?*

L'enseignant recense les points de vue des élèves sur la (les) méthode(s) utilisée(s) pour émettre une hypothèse : le(s) savant(s) utilise(nt) une méthode qui s'appuie sur l'expérience, l'observation, et l'émission d'hypothèses pour élaborer une loi. (6 min)

Phase 3 : résolution du problème par exploitation des textes (mise en commun des informations et l'élaboration du tableau de synthèse) (1h10min)

Phase 4 : institutionnalisation par le professeur (6 min)

Phase 5 : distribution du questionnaire 2 et réponse aux questions (15min)

Organisation spatiale

Les élèves sont assis par deux selon la répartition classique en deux rangées. Le professeur est figé pratiquement à côté du tableau.

Répartition des documents

Chaque élève dispose de 4 documents (1 texte + 3 documents questionnaires), la lecture est individuelle et 1 document à remplir (petit tableau) par un binôme ou un groupe de trois élèves.

Interaction professeur-élèves

L'enseignant pose des questions et explique les textes, les élèves tentent de répondre en restant à leur place. Tout au long de la séance, les élèves ne sont pas impliqués dans des activités d'investigation. Le professeur prend en charge la séance et recourt à un *cours dialogué*, ce faisant, il pose des questions, donne souvent des indices (des questions orientées, injection de mots, de bribes de phrases, ou en indiquant la phrase signifiante du texte) que les élèves développent par la suite pour trouver la réponse cherchée, les interactions entre pairs sont quasiment absentes.

Des exemples de phrases où le professeur ne finit pas la phrase, ou le mot, et que les élèves reprennent :

- Ptolémée : L'enseignant lit l'extrait du texte qui précise le problème posé « *quand au phénomène Baptisir* », il ajoute qu'« *il y a un problème de vision* », « *son problème de vision...* », à la fin du texte « *Ptolémée a réalisé un dispositif expérimental* », « *il a fait une expérience* », il souffle la méthode « *la méthode est expérimentale* » ;
- Ibn Sahl : « *c'est mathématicien* », « *Xème siècle* », « *fait concentrer quoi ? la lumière* », « *en un seul point* », il indique l'extrait du texte qui précise le problème posé « *4^{ème} ligne* », « *Ibn Sahl n'échappe pas à cette tradition, mais soulève une nouvelle interrogation celle de l'embrassement...* », « *il pose une nouvelle question* », « *il voulait chercher la forme ...* », « *son enjeu c'est quoi... son enjeu est théorique* », « *il fabrique un gabarit... c'est le côté technique* » ; « *il y a deux enjeux pratiquement, c'est l'enjeu théorique, ...et l'enjeu technique* », pour la méthode suivie « *c'est basé sur les*

- mathématiques, n'a pas fait d'expériences, il a répondu mathématiquement ...c'est un mathématicien » ;*
- Ibn al haytham : *« s'est intéressé ...à la vision, ... l'enjeu est... théorique », « détermine géométriquement, c'est quoi géométriquement ?...C'est la démarche », « vision et image », « enjeu théorique,... », « une démarche mathématique et expérimentale » ;*
 - Della Porta : *« son enjeu c'est quoi ? », « fait de la magie », « distraire, amuser, et ... faire un bon spectacle... », « ça, c'est son enjeu », « Quelle est sa démarche ? », « Est-ce qu'il a fait du calcul mathématique, des mesures ? » « si tu appliquais quoi ..., une lentille de verre à l'ouverture d'une chambre obscure... », « ...Ça, c'est sa démarche », « c'est expérimental » ;*
 - Galilée : *« veut justifier quoi ? La théorie héliocentrique de Copernic », ... il veut justifier quoi ? », « son enjeu c'est théorique », « La démarche utilisée ? », « ...il va faire des expériences », « il a essayé avec un seul verre, ...ça est un essai, ...il se trouve que ça n'a pas marché, ...il fait l'essai si ça marche, c'est bon, si ce n'est pas bon, il faut ressayer... », « C'est la méthode d'essais et erreurs... qui nécessitent de faire des expériences » ;*
 - Kepler : *« cherche à conforter quoi ? l'hypothèse ou bien la théorie héliocentrique de Copernic... son enjeu comment ? son enjeu théorique », « enjeux théorique », « sa démarche est..., mathématique et expérimentale » ;*
 - Snell : *« comprendre le phénomène de la vision, c'est théorique pratiquement », « pour certains il a fait des expériences, c'est démarche expérimentale », « pour d'autres...il l'aurait trouvé à parti de quoi ? d'un raisonnement... son démarche à la fois expérimentale et mathématique » ;*
 - Descartes : *« il a contesté la méthode suivie par les artisans et Galilée », « il veut chercher théoriquement la forme de ce verre » « son enjeu est théorique, chercher la forme du verre », « il a utilisé une démarche mathématique », « il n'y a pas d'autre problème, il n'y a pas une autre question..., conteste la méthode de fabrication ... », « c'est un enjeu technique », « deux problèmes... théorique et technique » ;*

- Fermat: « il a examiné la loi de Descartes », « la méthode du Descartes est un parallogisme », « son problème se trouve chez Descartes, ... c'est un enjeu épistémologique », « démarche est mathématique maximis, minimis ».

Déroulement du cours

L'introduction consiste en un rappel de questions sur le nombre de savants, la nature de la démarche utilisée pour établir une loi. Uniquement ces traces figurent au tableau, les enjeux ne sont pas évoqués.

Lors de la mise en commun des informations et de l'élaboration du tableau de synthèse, le travail est fait texte par texte (la mise en commun de la lecture individuelle entre petits groupes, en binômes ou en groupes de trois). Le professeur pose des questions au binôme qui a lu le texte, ensuite un élève passe au tableau pour le remplissage. Les élèves rencontrent des difficultés pour remplir le petit tableau. Il n'est pas utilisé pour la mise en commun des informations dans le tableau de synthèse.

Lors de la conclusion, le tableau de synthèse obtenu (tableau 15) est fait par le professeur, celui-ci au tableau examine les colonnes pour dégager pour chaque savant, la période et le lieu géographique où il a vécu, la démarche utilisée. Son examen montre que les enjeux ne sont pas définis, ni clairement identifiés.

Savants et périodes	Lieux géographiques	Enjeux	Démarches	Résultats
Ptolémée (2 ^{ème} Siècle)	Alexandrie	vision	Expérimentale	Relations entre les angles
Ibn Sahl (10 ^{ème} Siècle)	Bagdad	Théorique	Mathématique	CH /CE = cte
Ibn Al Haytham (11 ^{ème} Siècle)	Bassoura - Caire	Théorique (vision)	Mathématique – Expérimentale-	Relations entre les angles
Della Porta (16 ^{ème} Siècle)	Naples - Murano	Magique (distraction,...)	Expérimentale	Rien
Galilée (17 ^{ème} S)	Florence-Venise	Théorique (vision) – technique –construction de la lunette)	Expérimentale essais et erreurs	Rien

Kepler (17 ^{ème} S)	Allemand	Théorique	Expérimentale- mathématique -	$i/r = cte$
Snellius (16 ^{ème} - 17 ^{ème})	Hollande	Théorique (vision)	Expérimentale- Mathématique	$CE/CF = cte$
Descartes (16- 17Siècle)	Pays-Bas	Théorique – Technique	Mathématique	$Sini/sinr = cte$
Fermat (17 Siècle)	France	Epistémologique	Mathématique	Principe Fermat

Tableau 15: tableau de synthèse obtenu (expérimentation1)

La comparaison des résultats obtenus dans le tableau de synthèse avec ce qui est attendu des élèves nous permet de constater la difficulté de l'identification des enjeux poursuivis par les savants, surtout ceux qui sont emboîtés. Ainsi, ne sont pas identifiés l'enjeu épistémologique de Galilée relatif à sa contestation de la théorie géocentrique et associé à la vision des astres, l'enjeu épistémologique qui consiste à conforter l'hypothèse héliocentrique et associé à la vision des objets de Kepler, l'enjeu épistémologique de Descartes relative à la façon dont fut construit la lunette batave par Galilée et les verriers.

Sur le plan du contenu

Les difficultés rencontrées par l'enseignant

Lors de l'introduction de la séance, l'enseignant met l'accent sur les démarches au détriment des enjeux.

En ce qui concerne la mise en commun, plus précisément ce qui concerne les résultats, le professeur se centre uniquement sur l'optique et les savoirs. Il ne note pas au tableau la découverte des satellites de Jupiter relevé par un élève, ni la construction de la lunette par Galilée, ni la chambre noire par Della Porta, ni la fabrication de gabarits de lentilles par Ibn Sahl, ni celle des sphères ardentes pour embraser par Al Haytham. L'idée pour lui semble que les découvertes ne concernent que la formulation des relations mathématiques ou la recherche de lois.

En ce qui concerne la mise en commun des enjeux, l'enseignant ne donne pas la définition d'un enjeu : pour en donner une idée, il part de l'exemple de Ptolémée et reste implicite. Il ne se rend pas compte de l'existence d'enjeux emboîtés. C'est le cas de Descartes dont l'enjeu

principal est épistémologique et relatif à la contestation de la manière dont la lunette fut élaborée et perfectionnée par les verriers et Galilé. Pour l'enseignant, l'enjeu est théorique lorsqu'il ne fait pas appel aux expériences. Comme nous l'avons montré lors de la comparaison entre le tableau de synthèse de la classe et ce qui était attendu, plusieurs enjeux n'ont pas été identifiés ou précisés. Par exemple, pour :

Galilée : l'enjeu épistémologique associé à la vision des astres (conforter l'hypothèse héliocentrique) ;

Descartes : l'enjeu épistémologique associé à la contestation de la méthode suivie par Galilée ;

En ce qui concerne la mise en commun des démarches, l'enseignant n'en identifie pas certaines, comme celles utilisées par :

Kepler : la démarche par analogie (l'analogie entre l'œil et la chambre noire) ;

Descartes : la démarche par analogie (l'analogie mécanique du mouvement de la balle pour expliquer le phénomène de la réfraction).

Par ailleurs, pour l'enseignant, l'expérience est synonyme de manipulation, celle ci précède souvent la théorie et parfois l'ordre est inversé.

Les difficultés rencontrées par les élèves :

Les élèves sont centrés sur le texte, ils reproduisent souvent des extraits mais ne reformulent pas toujours les idées. Ils rencontrent des difficultés dans la compréhension du contenu des textes. Ces difficultés se répercutent sur le remplissage du petit tableau qui n'a pas été rigoureusement fait.

2.2. Analyse des questionnaires du formateur et de l'enseignant

Pour la séance de formation, on peut noter que le formateur indique dans ses réponses au **Questionnaire F**, que les enseignants ont eu des difficultés à analyser les textes (en particulier ils citent des difficultés avec « enjeux ») et à reformuler ce qu'ils disent. De son côté, il se rend compte qu'il anticipe (autrement dit qu'il guide trop, qu'il n'est pas dans une pédagogie socio-constructiviste) et que les professeurs devraient participer davantage en les envoyant au tableau.

Le formateur rapporte avoir présenté la séquence aux enseignants comme ayant l'objectif de faire comprendre aux élèves la façon d'établir une loi : il se pourrait que cette formulation focalise sur un seul enjeu, la recherche de loi.

Conclusion

Ce qu'on peut dégager de cette analyse rejoint les résultats des questionnaires des professeurs et élèves.

Nous observons des difficultés similaires chez le formateur et l'enseignant non seulement pour la mise en œuvre d'une pédagogie socio-constructiviste que seul le formateur explicite mais aussi pour l'identification des enjeux poursuivis par les scientifiques.

Chapitre 2

La deuxième expérimentation avec les élèves

1. Du côté des élèves : Les questionnaires

La deuxième expérimentation a été faite auprès d'un groupe de 25 élèves (23 filles, 2 garçons). La séquence d'enseignement-apprentissage n'a pas été filmée et le questionnaire renseigné par les élèves après la séquence a été modifié et remplacé par un questionnaire constitué de questions à choix multiples.

1.1. Questionnaire 1 : les conceptions des élèves au début de la séquence innovante

1.1.1 Question 1 : l'élaboration de la loi de la réfraction

Q₁₁₁ : Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?

Parmi les 25 élèves qui ont été interrogés, 20 seulement ont répondu à la question. Tous les élèves ne citent qu'un « savant » qui a participé à la recherche de cette loi. Aucun savant n'a été spécifié par le nom.

La majorité des élèves qui ont répondu (80%, N= 20) pense que le « savant », dans sa quête, part d'observations, réalise des expériences et effectue des mesures pour établir la loi : « [...] lorsqu'il a mis le caillou dans l'eau, il devient cassé et à cause de ça, il fait plusieurs expériences et il sort cette loi » (10 E₂), « [...], la personne qui a arrivé à faire cette loi des sinus pour la réfraction a fait premièrement plusieurs expériences et il a observé les mêmes résultats, que la lumière change de direction au cours de sa propagation d'un milieu à un autre, donc il a fait des mesures et des démonstrations qui lui permettent d'arriver à établir cette loi » (6 E₂). Un autre élève avance l'idée que le savant opère par expérimentation pour chercher la loi, guidé en cela par l'idée qu'il existe une relation pour la réfraction comme c'est

le cas pour la réflexion : « *Je pense que la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie par expérience. C'est-à-dire il a remarqué que la réflexion, il y a une relation entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion, ... il a conclu qu'il y a une relation entre l'angle d'incidence et de la réfraction. Il commence à faire des expériences jusqu'à il avait remarqué la loi des sinus* » (8 E₂). Pour d'autres, les lois sont dans la nature, il suffit de dévoiler le réel pour les trouver: « *[...] il regarde le phénomène réellement après il fait la loi des sinus de la réfraction* » (15 E₂).

15% des élèves qui répondent (N=20) pensent que « le savant » fait un raisonnement mathématique pour établir la loi : « *[...] ce phénomène a attiré son attention alors il décide de chercher pourquoi la canne a été cassée dans l'eau ? alors il a demandé l'aide d'un mathématicien ; après les recherches et les calculs ils ont conclu que $\sin i/\sin r = \text{constante}$* » (25 E₂), « *[...] ce savant a observé une réfraction de la lumière, ... il observe qu'il y a un changement de direction du rayon réfracté dans le 2^{ème} milieu et il trouve aussi que l'angle d'incidence n'égale pas l'angle de réfraction, il déduit la loi de sinus* » (16 E₂).

La majorité des sujets répondants considèrent que les lois existent dans la nature, elles sont tirées de l'étude du monde qui nous entoure, issues d'une démarche expérimentale, fondée principalement sur l'observation et l'expérimentation. Une vision empiriste et réaliste est très prégnante chez la majorité des élèves.

1.1.2. Question 2 : les enjeux

Q₁₂₁ : Que cherchent à faire les physiciens grâce à leurs travaux ?

80% des élèves (N=25) pensent que les savants cherchent à expliquer les phénomènes de la nature et à découvrir ses secrets et ses lois : « *Les physiciens cherchent [...] à expliquer tous les phénomènes naturels inconnus et à comprendre toutes les choses* » (2 E₂), « *[...] chercher des lois* » (24 E₂), « *ils cherchent, pour expliquer des phénomènes naturels ou d'autres et pour trouver des solutions à des problèmes* » (18 E₂).

41% estiment que les physiciens cherchent, grâce à leurs travaux, à faciliter la vie des gens et à développer l'humanité : « *... pour fabriquer plusieurs choses, aident les gens à survivre, plus de confort* » (1 E₂), « *ils cherchent à trouver des médicaments aux graves maladies (comme le cancer, le sida)* » (17 E₂).

12% indiquent plusieurs aspects à la fois : « *[...] les physiciens veulent savoir tout pour l'expliquer aux autres, savoir les causes des phénomènes, ... pour fabriquer plusieurs choses,*

aident les gens à survivre, plus confort» (1 E₂), «les physiciens cherchent à améliorer notre vie grâce à leurs travaux car ils trouvent des solutions à des problèmes et ils expliquent les différents phénomènes » (6 E₂), « ils cherchent à expliquer les phénomènes naturels, pour faciliter la vie (chercher des lois, fabriquer l'avion pour être rapide à aller aux pays ...» (24 E₂).

Bien que les élèves soulignent une diversité d'enjeux poursuivis par les savants, l'enjeu principal reste la découverte de connaissances et de lois. Les élèves véhiculent une image positive des scientifiques : ceux-ci sont décrits comme des bienfaiteurs.

1.1.3. Question 3 : le rôle des expériences

Q_{1.2.2} : Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas d'expérience ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

La majorité des élèves (76%) s'accordent à dire qu'on ne peut pas faire des découvertes sans recourir à des expériences. 42% des élèves (parmi cette majorité) estiment qu'elles servent comme moyen de preuve et de compréhension : *«Nous ne pouvons pas faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas d'expérience car grâce à laquelle nous pouvons prouver, sûre et certain que notre découverte est vraie » (6 E₂) ; « parce que l'expérience rend les découvertes plus précises et plus générales. En plus ces physiciens doivent être sûrs de ces découvertes» (4 E₂) et « [...] parce que l'expérience aide le savant pour comprendre plus...» (2 E₂).*

24% des élèves de la population totale estiment qu'on peut ne pas recourir aux expériences pour faire des découvertes. Certains parmi eux pensent que celles-ci peuvent se faire soit par l'imagination soit par la démonstration : *« On peut faire des découvertes en physique sans utiliser des expériences parce que l'homme grâce à son intelligence, il peut imaginer », « [...] mais il pense faire cette loi en démonstration mentale » (12 E₂).*

Pour la majorité des répondants, l'expérience reste le support privilégié pour faire une découverte, un moyen de preuve et de compréhension de la nature. Elle permet aussi de s'assurer que cette découverte est vraie.

Environ le quart des répondants estiment qu'il y a d'autres voies possibles pour faire des découvertes : l'imagination ou le raisonnement.

1.1.4. Question 4 : le rôle des mathématiques

Q_{1,2,3} : Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas appel aux mathématiques ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

La majorité des élèves (72%) soutiennent qu'on ne peut pas faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas de mathématiques.

- Certains d'entre eux l'expliquent par le fait que les découvertes en physique (par exemple les lois) nécessitent des démonstrations théoriques qui font intervenir des formules, des équations compliquées, des calculs, des règles mathématiques : « [...] pour connaître la loi d'un phénomène naturel, il faut faire des calculs pour trouver en fin des équations. » (2 E₂), « On ne peut pas faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas appel aux mathématiques, car elles sont très bien liées entre eux, les mathématiques nous aident à prouver théoriquement avec les calculs notre résultat. » (6 E₂), « Car parfois on n'a pas besoin et des fois on a besoin des mathématiques comme en chimie lorsqu'on a découvert les équations [...] » (9 E₂) ;
- 33% de cet échantillon évoquent un lien de nature entre la physique et les mathématiques sans l'explicitier clairement : « parce que les physiques et les mathématiques sont deux matières liées entre elles... » (12 E₂), « [...] il y a des relations entre les mathématiques et la physique » (14 E₂).

Pour ceux qui sont contre (28%), leurs réponses sont diverses.

Elles vont de la non nécessité pour un physicien d'être un mathématicien à l'absence de lien entre les mathématiques et la physique : « Ils peuvent faire des découvertes en physique s'ils ne font pas appel aux mathématiques car, ce n'est pas nécessaire d'être doué en mathématiques... » (13 E₂); « parce que la physique et les mathématiques ne sont pas liées » (15 E₂)

Ou encore elles font apparaître une vision plutôt simpliste (méthode artisanale) de l'élaboration des connaissances scientifiques : « parfois on peut arriver à une solution sans faire appel aux mathématiques par exemple la fabrication des médicaments ! » (1 E₂).

Les mathématiques sont vues par la majorité des apprenants comme un moyen pour faire des découvertes surtout d'ordre théorique, et peu d'élèves évoquent la découverte de nouveaux phénomènes, de nouvelles techniques.

Elles sont le plus souvent perçues comme intermédiaire (un moyen de calculs, de mesures...) ou constitutive de l'explication (interprétation : formules, relations équations,...) en physique. Elles ne sont pas intégrées réellement dans « une démarche cohérente de production de savoirs » (Venturini et Albe, 2002), autrement dit, comme un moyen de modélisation permettant, par exemple, de prédire les contraintes particulières d'une situation, de tester les solutions etc. Désautels et Larochelle (1989) expriment cette idée en parlant de la théorie atomique moderne : *« La théorie atomique moderne est devenue un ensemble d'équations mathématiques à l'aide desquelles il est possible de prédire les valeurs probables à l'intérieur de certaines contraintes fournies par le principe d'incertitude et de la théorie de la relativité »*. Ils poursuivent en évoquant l'évolution de son statut épistémologique *« la théorie atomique actuelle est un modèle mathématique complexe qui ne fournit pas d'énoncés sur la réalité en soi, mais qui permet de prédire des phénomènes observables... »* (pp. 28-29).

1.1.5. Question 5 : les méthodes

Q₁₂₄ : Les physiciens doivent-ils suivre une méthode précise dans leur travail ?

Oui, quelle est cette méthode ? Pourquoi les physiciens doivent-ils suivre cette méthode ?

Non, pourquoi ?

Beaucoup d'élèves (84%) pensent qu'il y a différentes méthodes : les expériences, le raisonnement mathématique, l'imagination, l'intuition, le hasard. Celles-ci dépendent du savant, celui-ci semble suivre toujours la même méthode et ne pas en avoir plusieurs : *« chaque physicien a le choix de suivre sa méthode personnelle car chacun voit la chose différemment des autres, certains savants...utilisent toujours des expériences et d'autres appel aux mathématiques »* (1 E₂), *« car il y a des méthodes par hasard et imaginaire [...] »* (23 E₂), *« ce n'est pas obligé, car chaque physicien suit sa propre méthode comme Newton a remarqué que la pomme a tombé puis découvre qu'il y a une force d'attraction exercée par la terre »* (9 E₂).

Cependant, certains parmi eux soulignent l'existence de méthodologie scientifique appropriée, celle qui conduit à la meilleure solution : *« ils ne doivent pas suivre une méthode précise dans leur travail car chacun a sa façon de réfléchir et sa méthode [...] il peut la suivre pour trouver la meilleure solution »*. (13 E₂)

Seulement 16% des étudiants pensent que les physiciens doivent suivre *« [...] une méthode précise... qui dépend de l'expérience, observation, démonstration, conclusion. »* (6 E₂). Un seul évoque la méthode théorique qui se base sur les démonstrations.

La démarche expérimentale reste la plus envisagée comme un moyen d'élaboration de connaissances et de découvertes scientifiques. La plupart du temps, les élèves véhiculent une vision empiriste.

1.1.6. Question 6 : le rôle de l'imagination et de la créativité

Q₁₂₅ : Les physiciens font-ils appel à leur imagination et créativité dans leur travail ?

Oui, quand ? Comment ?

Non, pourquoi ?

La majorité des élèves de la population interrogée (84%) estiment que les physiciens font appel à leur imagination et leur créativité. Pour 57% de cette majorité, celles-ci sont mobilisées quand :

- la réponse n'est pas donnée par l'expérience : « *Quand ne trouve pas des solutions par les expériences* » (23 E₂) ;
- le phénomène n'est pas accessible par le sens : « *[...] quand il n'y a pas de choses concrètes...* » (12 E₂) ;
- « *Quand il y a une idée partielle et il n'est pas certain de cette idée* » (1 E₂).

Seulement 16% des élèves estiment que la physique n'est pas l'imaginaire car le physicien travaille sur le réel : « *parce que leur travail tous réel et certain phénomène regarde la vie quotidienne* » (2 E₂) et « *l'imagination n'entre pas dans le travail* » (17 E₂). Il faut donc rester au plus près du réel et il faut regarder, par conséquent, il est inutile d'imaginer.

Le tableau 16 récapitule les résultats du questionnaire 1 élève avant l'expérimentation 2. Les pourcentages ne sont pas exclusifs

Question 1 : l'élaboration de la loi de la réfraction	Question 2 : les enjeux	Question 3 : le rôle des expériences	Question 4 : le rôle des mathématiques	Question 5 : les méthodes	Question 6 : le rôle de l'imagination et de la créativité
100% un seul savant à élaboré la loi	80% enjeu relatif à la découverte des connaissances	76% l'expérience sert à la découverte.	72% nécessité des maths pour les découvertes	16% une seule méthode	84% font appel à l'imagination et la créativité
80% en faisant des observations, des expériences	41% enjeu relatif à la vie pratique	42% l'expérience est un moyen de preuve, d'induction, de compréhension	33% existence d'un lien entre physiques et maths		57% : quand la réponse n'est pas immédiate - pour plus d'idées - pour concevoir des expériences

15% en utilisant un raisonnement mathématique	12% plusieurs aspects à la fois (plusieurs enjeux)	24% autres (par imagination et démonstration)	28% ne voient pas de nécessité de faire appel aux maths pour réaliser des découvertes	84% plusieurs méthodes	16% contre : la physique n'est pas l'imaginaire car le physicien travaille sur le réel
(20/25) 5 sans réponse	(22/25) 3 sans réponse	(25/25) 0 sans réponse	(25/25) 0 sans réponse	(25/25) 0 sans réponse	(25/25) 0 sans réponse

Tableau 16: les conceptions des élèves avant expérimentation 2

1.1.7. Conclusion

Les résultats obtenus au questionnaire renseigné en début de séquence par les élèves montrent que pour la majorité d'entre eux, les découvertes sont faites par une seule personne, selon une démarche accordant une place prioritaire à l'expérience et en réponse à un enjeu principal, la découverte des lois et des connaissances : ils véhiculent une vision empiriste et réaliste. Ils considèrent que les découvertes en physique nécessitent de faire appel à l'imagination, à la créativité et aux mathématiques.

Notons enfin, que beaucoup d'élèves pensent que les scientifiques suivent des méthodes différentes. Sont cités : expériences, raisonnement, imagination, intuition, hasard. Cette conception éclairée provient sans doute de la discussion que l'enseignant dit avoir eu avec les élèves avant la passation du questionnaire, discussion anticipant la séquence car évoquant la diversité des méthodes.

1.2. Questionnaire2 : le rapport à l'innovation des élèves

Les deux premières questions du questionnaire 2 ont été proposées lors de la première expérimentation afin d'améliorer la rédaction des textes et la formulation de la consigne donnée aux élèves pour en extraire les informations pertinentes. Elles n'ont pas reprises lors de cette deuxième expérimentation. Nous nous intéressons uniquement aux questions suivantes qui portent sur l'importance et l'intérêt de la séquence, sur son organisation et son contenu, sur son apport.

1.2.1. Question 1 : ce que la séquence apprend d'important

Q_{2.2.1}: Qu'est-ce qui vous paraît le plus important dans ce que vous avez appris aujourd'hui et pourquoi ?

52% des apprenants sont attirés par le contenu : le nombre de savants qui ont participé dans cette recherche « [...] j'ai connu plusieurs savants différents » (2 E₂), « la nature des démarches » (10 E₂) utilisées, « la nature des problèmes » (10 E₂) et « la façon dont la loi des sinus a été établie » (4 E₂) par les scientifiques ;

44% par la nouveauté de l'approche pédagogique et de l'organisation qui ont permis : « le travail de groupe » (23 E₂), la discussion et la recherche de « nouvelles informations » (10 E₂) ;

24% par l'apport sur le plan personnel de la séquence : la confiance en soi et l'envie de faire des études scientifiques : « le plus important est de travailler et de ne pas négliger les tâches et avoir confiance en soi même car personne n'est génie de naissance » (9 E₂). Il apparaît ici une image positive des sciences.

1.2.2. Question 2 : importance de la réflexion historique

Q_{2.2.2} : Pensez-vous qu'il est important de faire réfléchir les élèves en cours de physique à la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées autrefois ?

Oui : pourquoi ?

Non : pourquoi ?

88% des élèves trouvent important de les faire réfléchir sur la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées car cette réflexion favorise chez eux l'apprentissage du contenu scientifique et du savoir faire expérimental. Elle leur donne en effet une idée des méthodes suivies lors des recherches : « Qu'est ce qui nous intéresse dans notre éducation, c'est de savoir la loi et l'appliquer, mais c'est mieux d'avoir comment c'est établie cette loi pour mieux comprendre » (1 E₂) et il est plus judicieux de « [...] réfléchir et arriver à l'information en essayant, c'est mieux de la prendre comme elle est donnée » (9 E₂) ; « [cette réflexion] nous aide à faire nos expériences d'une façon correcte, aussi cette méthode nous aide au futur pour devenir de plus en plus connaissant » (13 E₂).

12% des élèves pensent que c'est inutile. Ils sont centrés sur les résultats des sciences: « Il ne m'intéresse pas d'avoir les savants et les physiciens, la chose qui m'intéresse le plus est de faire la démonstration de la loi puis faire des exercices. » (6 E₂), « [...] pour moi c'est mieux de connaître la loi seulement » (18 E₂).

La réflexion sur les sciences ne semble pas être une dimension importante de l'apprentissage. Pour la majorité, ce qui est important, ce sont les savoirs (les lois) ; pour quelques-uns, ce sont aussi les démarches car cela semble aider la compréhension des savoirs.

1.2.3. Question 3 : l'apprentissage par investigation

Q_{2.2.3} : Souhaitez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement organisées de cette façon ?

Oui : pourquoi ?

Non : pourquoi ?

Un peu plus de la moitié (54%) des élèves souhaitent avoir d'autres séquences d'enseignement organisées de cette façon car elles permettent une meilleure acquisition des connaissances par la mise en œuvre d'un apprentissage s'appuyant sur une méthode pédagogique nouvelle: « [...] je comprends mieux que dans les autres séances car on participe tous [...] » (10 E₂), « cette méthode d'éducation est mieux que celle classique qu'on est habitué de faire » (9 E₂).

Pour ceux qui sont contre (46%), le travail demandé ne contribue pas à la réussite et la durée impartie à la séquence est trop grande. Ils révèlent un rapport de rentabilité et d'utilité à l'enseignement : « j'aimerais plus faire des exercices qui m'aident dans mes études » (6 E₂) et elles font « perdre beaucoup de temps et fatigue les élèves » (2 E₂).

1.2.4. Question 4 : Intérêt, difficulté et utilité du travail demandé

Q_{2.2.4} : Précisez dans le tableau ci-dessous en répondant par oui ou non si le travail proposé pendant ces différentes périodes vous a intéressé, paru difficile, utile.

2.4.1 : Exprimer nos idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois	2.4.2 : Lire les documents et chercher les informations en petits groupes	2.4.3: Mettre en commun les informations recueillies par les différents groupes	2.4.4 : Confronter nos idées avec les résultats de la lecture collective des documents	2.4.5 : Résumer et généraliser les résultats obtenus
---	---	---	--	--

L'analyse des résultats obtenus aux questions portant sur la façon dont les élèves expriment leurs idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois, sur la lecture des documents et la recherche des informations en petits groupes, sur la mise en commun des informations recueillies par les différents groupes et sur la confrontation de leurs idées avec les résultats de la lecture collective des documents consignés dans le tableau ci-dessous montre que ces

activités sont favorablement reçues. Cependant certaines parmi elles présentent quelques difficultés, ainsi :

Q241 : Exprimer nos idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois			Q242 : Lire les documents et chercher les informations en petits groupes			Q243: Mettre en commun les informations recueillies par les différents groupes			Q244 : Confronter nos idées avec les résultats de la lecture collective des documents			Q245 : Résumer et généraliser les résultats obtenus		
diff	util	inte	diff	util	inte	diff	util	inte	diff	util	inte	diff	util	inte
48	16	88	24	60	32	16	68	36	24	56	28	32	24	84
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Tableau 17 : Intérêt, difficulté et utilité du travail éprouvés par les élèves (expérimentation 2)

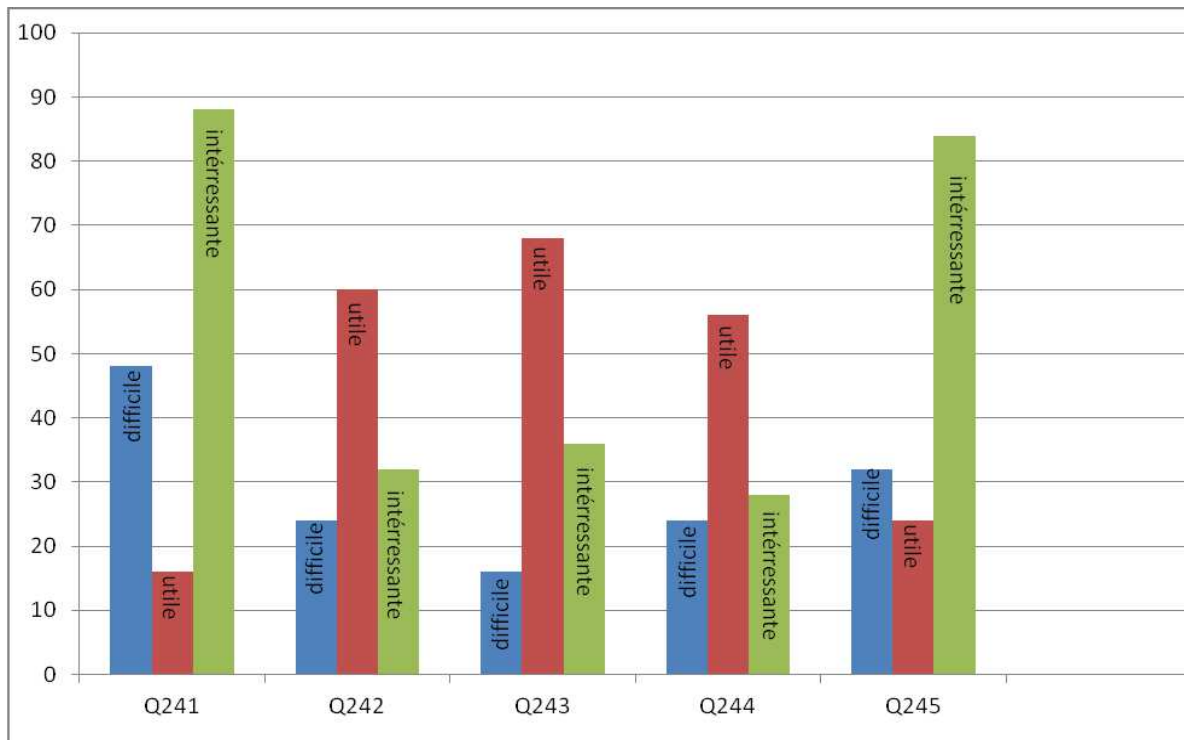


Fig. 16 : histogramme traduisant la difficulté, l'utilité et l'intérêt du travail éprouvés par les élèves (expérimentation 2)

88% des élèves estiment intéressant d'exprimer leurs idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois mais environ la moitié juge cela difficile.

Environ le quart des étudiants considèrent que la lecture des documents et la recherche des informations en petits groupes sont difficiles, plus de la moitié (60%) trouve ces activités utiles et environ le tiers les estime intéressantes.

Peu d'étudiants (16%) considèrent que la mise en commun des informations recueillies par les différents groupes est difficile, la majorité (68%) la voit plutôt utile et plus du tiers la trouve intéressante.

24% des élèves considèrent que la confrontation de leurs idées avec les résultats de la lecture collective des documents est difficile et plus de la moitié (56%) estime qu'elle est utile.

84% des élèves voient le résumé et la généralisation des résultats obtenus comme intéressants et environ le tiers les considère difficiles.

1.2.5. Question 5 : accueil de la séquence

Q_{2.2.5} : Conclusion : Comment avez-vous trouvé cette séquence d'enseignement ?

La majorité des élèves (80%) estiment que la séquence d'enseignement est intéressante et utile et ce :

- pour l'acquisition des connaissances : « [...] *elle est intéressante et utile et m'a aidé à bien comprendre qu'avant de plus ... elle nous aide à enrichir notre culture* » (9 E₂) ;
- pour son contenu : « (...) *[la séquence est] très importante car j'ai mémorisé beaucoup d'informations sur les savants* » (24 E₂) ;
- pour son organisation : « *il est intéressant de travailler en groupes* » et de « *mettre en commun les informations recueillies par les différents groupes...* » (10 E₂).

Par contre, certains élèves (13%) estiment que la séquence fait perdre du temps : « *j'ai appris beaucoup de choses nouvelles mais il s'agit d'un peu de perte de temps* » et pour d'autres (13%), elle est « *intéressante mais dérange* ».

1.2.6. Conclusion

L'analyse des résultats obtenus aux questions portant sur l'importance et l'intérêt de la séquence, sur son organisation et son contenu, sur son apport révèle que la séquence a reçu un accueil favorable tant sur la nouveauté de la méthode pédagogique, l'organisation (travail en groupes), l'objectif (nombre de savants, les enjeux et les démarches), le contenu historique et

l'apport (l'autonomie, la confiance en soi, l'esprit critique, etc.). Mais il est à noter qu'un nombre non négligeable d'élèves mentionnent avoir rencontré des difficultés lors de la lecture individuelle des textes et lors de la confrontation de leur lecture pour la synthèse générale. Par ailleurs, beaucoup d'élèves se focalisent sur l'acquisition d'un contenu scientifique.

1.3. Questionnaire3 : les conceptions des élèves un mois après la séquence innovante

Ce questionnaire vise à évaluer l'impact de la séance d'enseignement-apprentissage sur l'image des élèves de la nature des sciences relativement aux objectifs d'apprentissage épistémologique visés. Sa passation a été effectuée un mois après la réalisation de la séance.

Il a été reformulé et comporte uniquement des questions fermées (questions à choix multiples) relatives au nombre de savants, à la diversité des enjeux poursuivis et des démarches et méthodes utilisées.

Le tableau 18 ci-dessous rassemble les résultats à la question d'évaluation après l'expérimentation 2

Résultats après la deuxième expérimentation (N= 25)		
Nombre de savants	Diversité des enjeux	Diversité des méthodes
28% : 1 savant	8% : 1 enjeu	12% : une méthode
72% : plusieurs savants	80% : plusieurs enjeux	72% : plus d'une méthode
0% : sans réponse	12% : sans réponse	16% : sans réponse

Tableau 18 : résultats sur le nombre de savants, les enjeux et les méthodes (après expérimentation 2)

1.3.1. Question 1 : le nombre de savant

Q₃₁₂ : la loi des sinus : $\sin i_1 = n \sin i_2$ doit être appelée :

3.1.2.1 : « la loi de Descartes » car Descartes a établi cette loi et l'a fait connaître ;

3.1.2.2 : « la loi de Snell » car Snell est le premier à avoir établi cette loi ;

3.1.2.3 : « la loi de Snell-Descartes » car ces deux savants ont donné la forme la plus générale de la loi de la réfraction ;

3.1.2.4 : « la loi de la réfraction » car de nombreux savants ont contribué à l'établissement de cette loi ;

3.1.2.5 : autrement, précisez comment et pourquoi ?

Les réponses révèlent qu'une majorité (72%) d'élèves ne considère plus qu'un seul savant ait établi la loi des sinus. Pour eux, de nombreux savants ont contribué à son établissement si bien qu'elle doit être appelée « la loi de la réfraction » tout court ou « la loi de Snell-Descartes » car ces deux savants ont donné la forme la plus générale de la loi de la réfraction.

Environ le tiers des élèves (28%) continue à attribuer la loi soit à Snell, soit à Descartes, ou évoque « un savant » au singulier.

1.3.2. Question 2 : les enjeux

Q₃₂₂ : La loi qui permet d'expliquer un phénomène particulier peut être établie

- 3.2.2.1 : uniquement en étudiant ce phénomène et en cherchant cette loi ;
- 3.2.2.2 : en cherchant à élaborer ou améliorer un dispositif technique mettant en jeu ce phénomène ;
- 3.2.2.3 : en cherchant les conséquences grâce à un raisonnement mathématique des idées auxquelles on pense que la nature obéit ;
- 3.2.2.4 : autrement. Précisez comment.

Une majorité d'élèves 80% pensent que les enjeux poursuivis par les savants sont divers. En effet, ils soutiennent que la loi qui permet d'expliquer un phénomène particulier peut être établie en cherchant à élaborer ou améliorer un dispositif technique mettant en jeu ce phénomène, en cherchant les conséquences des idées auxquelles on pense que la nature obéit grâce à un raisonnement mathématique. Ils peuvent aussi exprimer les deux idées à la fois.

Le dixième des élèves seulement estiment que la loi est établie uniquement, soit en étudiant ce phénomène et en cherchant à la dégager, soit en cherchant à réaliser des expériences en vue de l'obtenir.

1.3.3. Question 3 : les démarches

Q₃₃₂ : Les démarches de travail

- 3.3.2.1 : Tous les scientifiques travaillent de la même façon, car il y a des étapes pour travailler qui sont connues par tous les savants ;
- 3.3.2.2 : Tous les scientifiques commencent leurs recherches en faisant des expériences ;
- 3.3.2.3 : Un scientifique commence ses recherches en faisant une expérience ou un raisonnement en fonction du problème qu'il cherche à résoudre ;
- 3.3.2.4 : En cherchant à résoudre le même problème, deux scientifiques aboutissent à des résultats différents car ils utilisent dans leurs travaux deux méthodes différentes.

Beaucoup d'élèves (72%) pensent qu'un scientifique commence ses recherches en faisant une expérience ou un raisonnement en fonction du problème qu'il cherche à résoudre. La démarche expérimentale reste la plus envisagée comme un moyen d'élaboration de connaissances et de découvertes scientifiques.

Seuls (12%) des élèves continuent à supposer que les physiciens doivent suivre des étapes bien connues et bien précises qui commencent souvent par l'expérience pour produire un savoir scientifique.

1.3.4. Conclusion

Le tableau 19 ci-dessous rassemble les résultats des conceptions des élèves sur le nombre des savants, les enjeux poursuivis et les méthodes utilisées avant et après l'expérimentation 2.

Résultats avant la deuxième expérimentation : N= 25		
Nombre de savant	Enjeux	Méthodes
100% : 1savant	88% : 1enjeu	16% : une méthode
0% : plusieurs savants	12% : plusieurs enjeux	84% : plus d'une méthode
25% : sans réponse	0% : sans réponse	0% sans réponse
Résultats après la deuxième expérimentation : N= 25		
Nombre de savants	Diversité des enjeux	Diversité des méthodes
28% : 1savant	10% : 1enjeu	12% : une méthode
72% : plusieurs savants	81% : plusieurs enjeux	72% : plus d'une méthode
0% : sans réponse	10% : sans réponse	16% : sans réponse

Tableau 19 : Résultats avant-après sur le nombre de savants, les enjeux et méthodes (expérimentation2)

Les résultats obtenus lors la deuxième expérimentation montre une nette progression à propos du nombre de scientifiques ayant contribué à l'élaboration de la loi de la réfraction et à la diversité des enjeux poursuivis.

La première peut être due à la reformulation de la question d'évaluation et aux consignes données à l'enseignant de ne pas faire référence à Descartes pour nommer les lois de la réflexion et de la réfraction.

La seconde est sans doute due au remplacement du terme « enjeu » par l'expression « nature du problème exploré » dans le tableau que les élèves devaient compléter et à la reformulation de la question de l'évaluation.

Beaucoup d'élèves pensent, tant avant la séquence qu'après, que les scientifiques peuvent utiliser des méthodes différentes. Sont cités : expériences, raisonnement, imagination, intuition, hasard. Ce résultat provient sans doute de la discussion que l'enseignant dit avoir eu avec les élèves avant la passation du questionnaire, discussion anticipant la séquence car évoquant la diversité des méthodes. Il pourrait provenir aussi d'un changement de démarche pédagogique de l'enseignant suite à la première expérimentation. Celui-ci aurait pu avancer

l'idée de la diversité des démarches et méthodes dans son enseignement. En effet, c'est le même enseignant qui a guidé les deux expérimentations.

2. Du côté de l'enseignant : le Questionnaire E2

L'enseignant signale qu'après la première expérimentation, chaque fois que l'occasion se présentait, il attirait l'attention des élèves sur la diversité des méthodes utilisées par les savants.

Il déclare avoir eu une discussion élargie avec les élèves, avant la passation du questionnaire 1, sur les méthodes et le nombre de savants.

Il précise avoir éprouvé certaines difficultés pour la mise en œuvre de la séquence. Cela ne l'empêche pas de montrer une certaine préférence pour cette séquence qui comporte uniquement des objectifs épistémologiques. Cette préférence pourrait tout simplement résulter du fait que c'est la deuxième fois qu'il fait quelque chose de ce type et qu'il se sent donc plus à l'aise !

A propos de l'accueil réservé par les élèves à la séquence innovante, il dit que certains élèves étaient attirés par les objectifs épistémologiques et la méthode pédagogique, d'autres étaient plutôt préoccupés par la rentabilité et ne voyaient pas la nécessité de ce travail, ils préféreraient les objectifs à contenu scientifique.

Conclusion

Ces remarques donnent sens à ce que disent les élèves dans le questionnaire renseigné au début de la séquence sur la façon dont travaillent les scientifiques : les élèves répondent majoritairement qu'il existe plusieurs méthodes.

Le questionnaire de fin de séance fournit un résultat inattendu sur l'accueil réservé à la séquence innovante : certains élèves privilégient un enseignement traditionnel à objectifs notionnels et non épistémologiques. Ils se trouvent face à un problème de rupture du contrat didactique fondé sur un rendement à court terme,

Chapitre 3

Comparaison des résultats des deux expérimentations

Les réponses aux questionnaires portant sur la façon dont travaillent les physiciens ont fait l'objet de différentes catégorisations : le rôle des expériences, des mathématiques, de la créativité et de l'imagination dans l'élaboration d'une connaissance en physique, ainsi que le nombre de savants qui ont participé à l'élaboration de la loi des sinus, les enjeux poursuivis par les scientifiques et les méthodes utilisées. Pour chaque catégorie, nous comparons les points de vue des élèves lors des deux expérimentations. L'évaluation après chaque expérimentation porte sur les progressions éventuelles des conceptions des apprenants sur la nature des sciences relativement au nombre de savants, aux enjeux et aux démarches.

1. Le rôle de l'expérience et de l'observation

Les idées des deux groupes sur ce sujet ont été explorées par les deux questions (Q₁₁₁ : *Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction a été établie ?* Et Q₁₂₂ : *Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas d'expérience ?*). Les résultats sont rassemblés dans le tableau 20).

Découverte ou élaboration d'un savoir	Q ₁₁₁		Q ₁₂₂	
	en faisant des expériences	en observant le phénomène	par expérience	sans expérience
Séquence 1 (N=20)	75%	53%	90%	10%
Séquence 2 (N=25)	70%	45%	76%	24%

Tableau 20: le rôle de l'expérience et de l'observation dans l'élaboration d'une connaissance scientifique

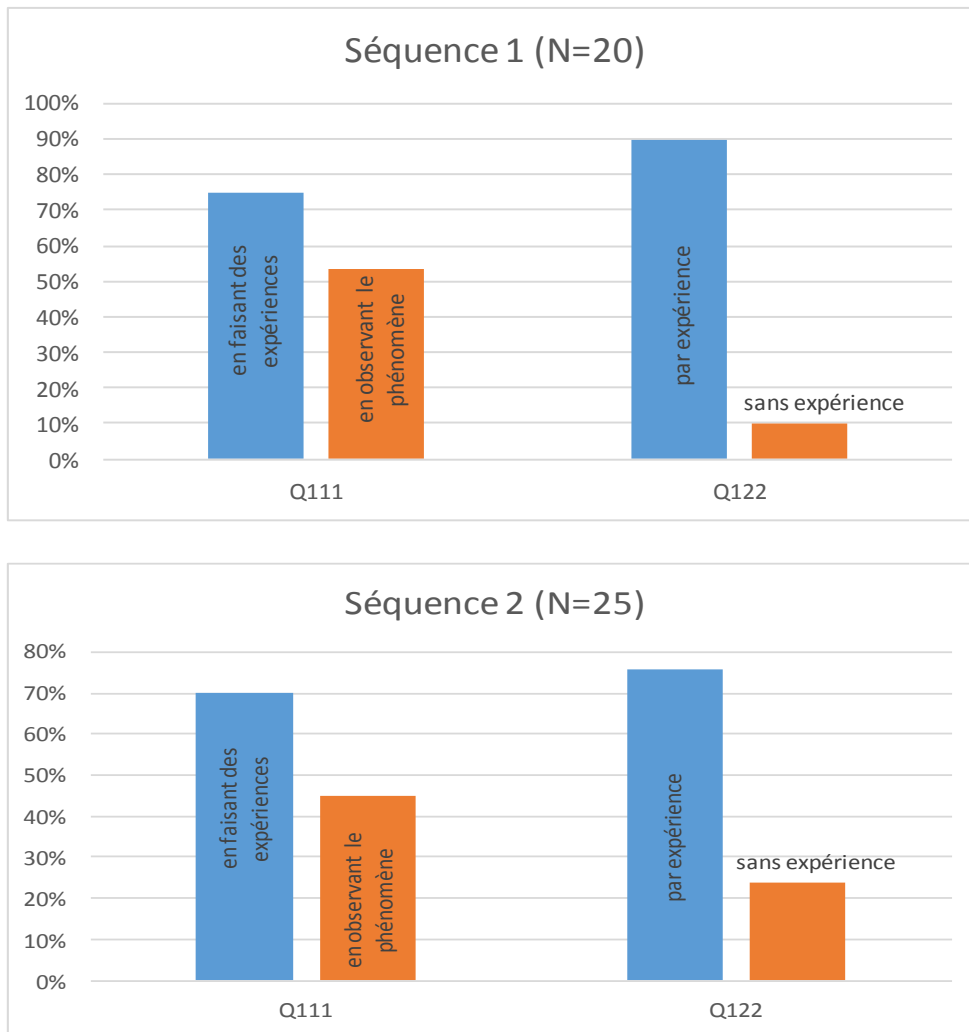


Fig. 17 : Histogrammes des conceptions des élèves sur le rôle de l'expérience et de l'observation dans l'élaboration des connaissances lors des deux expérimentations

Les résultats montrent que les deux groupes d'élèves véhiculent majoritairement des conceptions identiques, à savoir que les expériences occupent une place primordiale dans les découvertes ou l'élaboration de connaissances scientifiques. Les justifications données renvoient à une démarche inductive stricte ou naïve dans laquelle est affirmée la primauté de l'observation ou de l'expérimentation sur la théorie. Les élèves pensent que les connaissances scientifiques sont tirées de faits, elles sont donc des évidences empiriques. Ces derniers véhiculent une vision empiriste et réaliste, un résultat connu.

Pour d'autres moins nombreux, l'expérience est conçue aussi comme un moyen de preuve, de compréhension et de validation des lois.

Une minorité de sujets estiment qu'il est possible de réaliser des découvertes sans recourir aux expériences. D'autres voies sont citées : le hasard, l'imagination ou la démonstration.

2. Le rôle des mathématiques

Les points de vue sur l'apport des mathématiques aux découvertes en physique sont explorés par la question Q_{1.2.3} : *peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas appel aux mathématiques ?* Les résultats sont consignés dans le tableau 21.

Découverte ou élaboration d'un savoir	Q _{1.2.3}	
	en faisant appel aux mathématiques	en ne faisant pas appel aux mathématiques
Séquence 1 (N=20)	85%	15%
Séquence 2 (N=25)	72%	28%

Tableau 21 : le rôle des mathématiques dans les découvertes

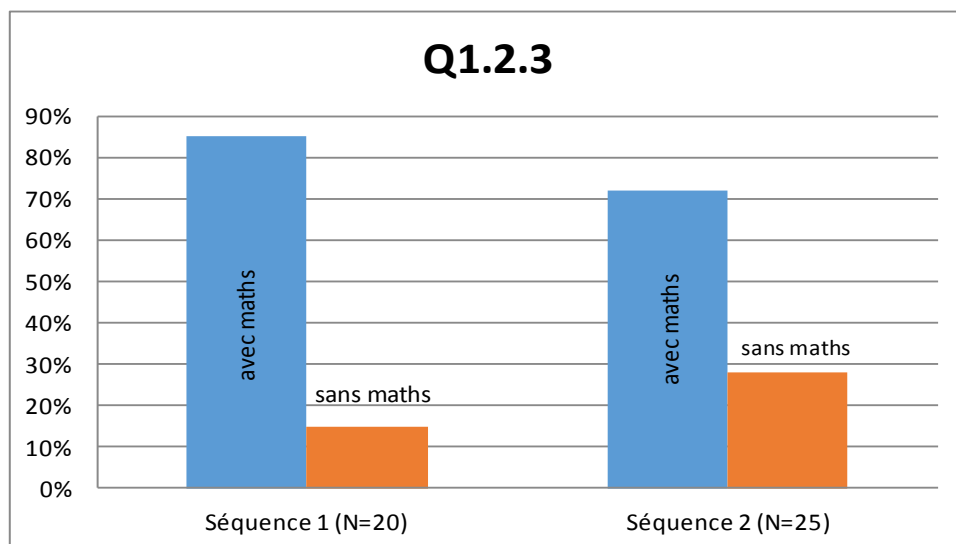


Fig. 18 : Histogramme des conceptions des élèves sur le rôle des mathématiques lors des deux expérimentations

Les résultats montrent que dans chaque groupe d'élèves une majorité assez importante pense que les physiciens ne peuvent pas faire de découvertes s'ils ne font pas appel aux mathématiques.

Ceux qui ne croient pas à la nécessité de faire appel aux mathématiques pour réaliser des découvertes en physiques, avancent des réponses multiples :

Les élèves du premier groupe ont une conception réaliste naïve de la science, ils considèrent que la physique dépend de la nature, on n'est donc pas obligé d'avoir des connaissances en

mathématiques pour faire des découvertes. Il suffit de faire de bonnes observations pour accéder à la réalité qui est cachée quelque part dans les événements du monde.

Les autres du deuxième groupe ne semblent pas se rendre compte de la complexité de l'élaboration des savoirs scientifiques, ils véhiculent une vision simpliste de la construction des sciences, elle est assimilée à la fabrication artisanale des médicaments. Il est donc inutile de faire appel aux mathématiques.

3. L'imagination et la créativité

Les idées des élèves sur le rôle de l'imagination et la créativité dans le travail des physiciens ont été explorées par la question Q_{1.2.5}: *Les physiciens font-ils appel à leur imagination et créativité dans leur travail ?* Les résultats sont regroupés dans le tableau 22.

	Q _{1.2.5}	
Découverte ou élaboration d'un savoir	en faisant appel à l'imagination et à la créativité	en ne faisant pas appel à l'imagination et à la créativité
Séquence 1 (N=20)	55%	45%
Séquence 2 (N=25)	84%	16%

Tableau 22 : le rôle de l'imagination et de la créativité dans le travail des physiciens

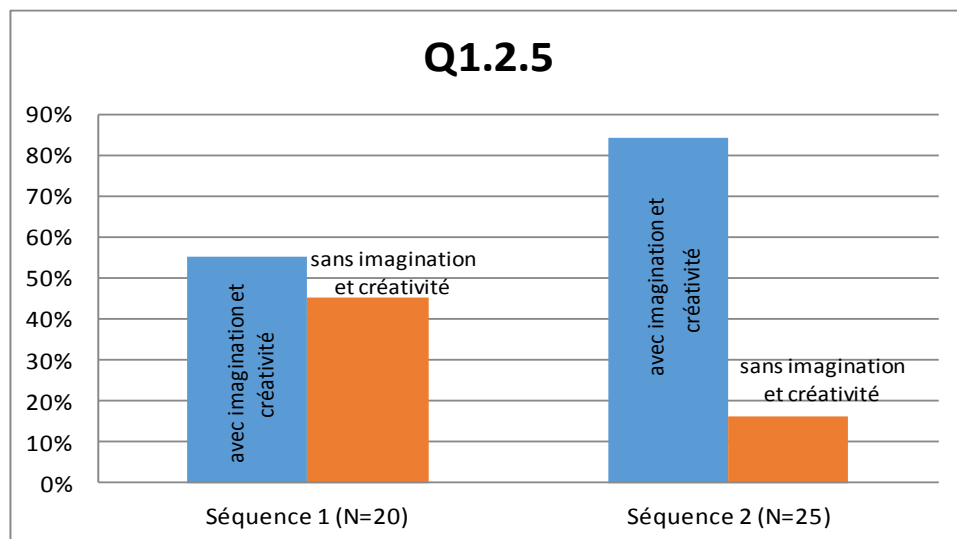


Fig. 19: Histogrammes des conceptions des élèves sur le rôle de l'imagination et la créativité lors des deux expérimentations

Un peu plus de la moitié des répondants lors de la première expérimentation et une grande majorité de ceux-ci lors de la seconde expérimentation pensent que les scientifiques font appel à leur imagination dans leur travail. Celle-ci est mobilisée surtout lorsque la réponse n'est pas donnée par l'expérience, le phénomène n'étant pas accessible par les sens, ou lors de l'émission d'hypothèses. L'imagination est davantage conçue comme un moyen pour débloquer une situation d'incompréhension que comme un outil cohérent de production de connaissances scientifiques. En outre, les sujets semblent ne pas accorder d'importance aux aspects créatifs de l'activité des scientifiques puisqu'aucun sujet dans les deux expérimentations n'a évoqué explicitement l'importance ou le rôle de la créativité dans le travail du scientifique. Il se pourrait que ce résultat soit lié à la façon dont cette question est posée : l'imagination est toujours placée avant la créativité, elle lui fait écran de telle sorte que les élèves mettent plus l'accent sur l'importance de l'imagination et oublient le rôle de la créativité.

Les élèves des deux groupes qui sont contre l'usage de l'imagination et la créativité dans le travail du physicien partagent une conception réaliste naïve et empiriste : la physique n'est pas l'imaginaire, elle touche le réel. Or, la réalité est toujours exacte par conséquent il est inutile d'imaginer.

4. le nombre de scientifiques ayant contribué à l'élaboration de la loi des sinus

Le tableau 23 regroupe les résultats obtenus à la question posée en début de séquence (Q₁₁₁ : *Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?*) et à celle posée trois semaines après (question ouverte pour la première expérimentation : *Selon vous, est-il correct d'appeler la loi de la réfraction « loi de Descartes » ?*) ; Q₃₁₂ : question à choix multiples pour la seconde).

		Avant			Après		
		Sans réponse	1 savant	Plusieurs savants	Sans réponse	1 savant	Plusieurs savants
Séquence 1	(N=20)	25%	20%	33%	0%	55%	45%
Séquence 2	(N=25)	20%	100%	0	0%	28%	72%

Tableau 23 : comparaisons des conceptions des élèves sur le nombre de scientifiques ayant contribué à la loi de la réfraction (avant-après expérimentations 1 et 2)

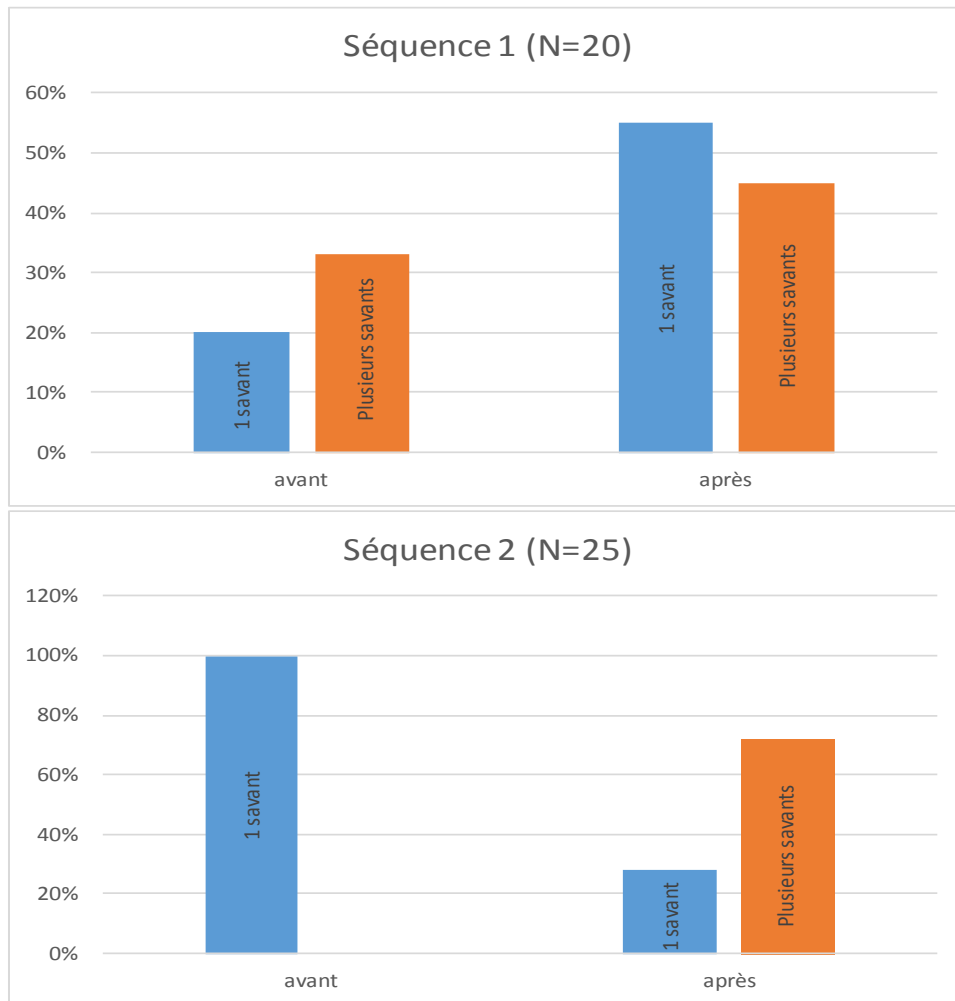


Fig. 20 : Histogrammes comparant les conceptions des élèves sur le nombre de savants avant et après chaque expérimentation

En ce qui concerne la question posée au début de la première expérimentation, beaucoup d'élèves ne répondent pas. Lors de la deuxième expérimentation, tous les élèves ne citent qu'un seul savant sans préciser de nom.

En ce qui concerne la question d'évaluation posée après la première expérimentation (*Q₃₁₁* : *selon vous, est-il correct d'appeler la loi de la réfraction « loi de Descartes » ? Oui, pourquoi ? Non, pourquoi ?*), le nombre d'élèves pour lesquels plusieurs savants ont participé à l'élaboration de la loi de la réfraction a légèrement augmenté. Cependant, les élèves qui n'avaient pas répondu au début de la séquence se positionnent plutôt en faveur d'un seul savant en citant le plus souvent Descartes. Plusieurs explications peuvent être avancées : la leçon qui précède celle sur la réfraction porte sur la réflexion, phénomène régi par une loi aussi dite de Descartes ; les manuels scolaires à la disposition des élèves nomment la loi de la réfraction

« loi de Descartes »; la question d'évaluation met l'accent sur Descartes ; Descartes peut être perçu comme le dernier en date et donc celui dont l'apport est décisif.

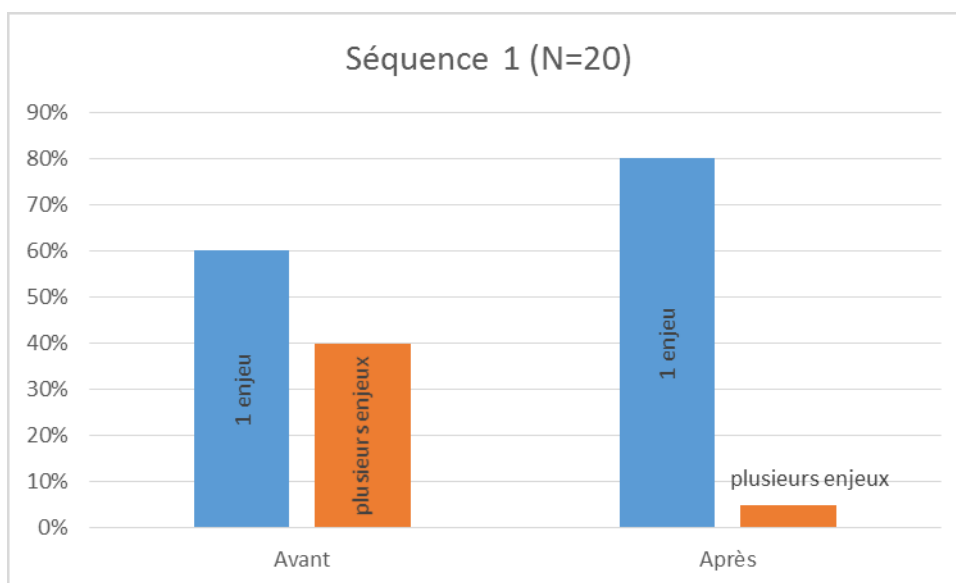
La nette progression obtenue lors de la seconde expérimentation peut être due à la reformulation de la question et aux consignes données à l'enseignant de ne pas faire référence à Descartes pour nommer les lois de la réflexion et de la réfraction.

5. La diversité des enjeux

Le tableau 24 regroupe les résultats à la question posée en début de séquence (Q_{121} : *que cherchent à faire les physiciens grâce à leurs travaux ?*) et à celle posée trois semaines plus tard (question ouverte pour la première expérimentation : (Q_{321} : *on entend souvent dire que les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels. Selon vous, est-ce que cela concerne tous les scientifiques ? Oui, pourquoi ? Non, pourquoi ?*); Q_{322} : question à choix multiples pour la seconde).

	Avant		Après		
	1 enjeu	Plusieurs enjeux	1 enjeu	Plusieurs enjeux	Sans réponse
Séquence 1 (N=20)	60%	40%	80%	5%	15%
Séquence 2 (N=25)	88%	12%	10%	81%	10%

Tableau 24: conceptions des élèves sur les enjeux (avant-après expérimentations 1 et 2)



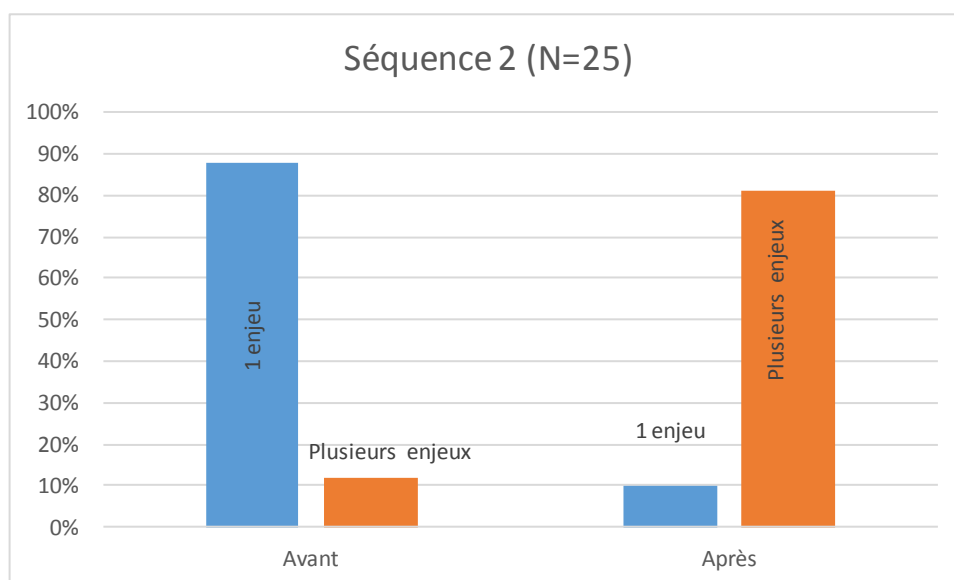


Fig. 21 : Histogrammes comparant les conceptions des élèves sur la diversité des enjeux avant et après chaque expérimentation

Après la première expérimentation, les élèves considèrent majoritairement que tous les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels et évoquent donc toujours un seul enjeu. Notons aussi que les élèves signalent des difficultés pour saisir la signification du mot enjeu. La nette progression lors de la deuxième expérimentation est sans doute due au remplacement du terme « enjeu » par l'expression « nature du problème exploré » dans le tableau qu'il devait compléter et à la reformulation de la question de l'évaluation

6. la diversité des méthodes

Le tableau 25 regroupe les résultats à la question posée en début de séquence (Q_{124} : les *physiciens doivent-ils suivre une méthode précise dans leur travail ? Oui, quelle est cette méthode ? Pourquoi ? Non, pourquoi ?*) et à celle posée trois semaines plus tard (question ouverte pour la première expérimentation Q_{321} : *selon vous, les scientifiques travaillent-ils tous de la même façon ? Oui, comment ? Pourquoi ? Non, pourquoi ?*) ; Q_{332} : question à choix multiples pour la seconde).

	Avant		Après		
	1 méthode	Plusieurs méthodes	1 méthode	Plusieurs méthodes	Sans réponse
Séquence1 (N=20)	55%	40%	5%	95%	0
Séquence 2 (N=25)	16%	84%	12%	72%	16%

Tableau 25: comparaison des conceptions des élèves sur méthodes (avant-après expérimentations 1 et 2)



Fig. 22 : Histogrammes comparant les conceptions des élèves sur la diversité des méthodes avant et après chaque expérimentation

Au début de la première expérimentation, beaucoup d'élèves pensent qu'il n'y a qu'une seule méthode et une majorité d'entre eux qu'elle est fondée principalement sur l'observation et l'expérience. Elle amène selon un parcours spécifique des observations aux lois et théories. Elle s'apparente avec la démarche inductive naïve. Cette méthode permet d'avoir de bons résultats. Après la séquence, la diversité de méthodes est bien perçue.

Lors de la deuxième expérimentation, beaucoup d'élèves pensent tant avant la séquence qu'après, que les scientifiques peuvent changer de méthode en fonction du problème. Sont cités : expériences, raisonnement, imagination, intuition, hasard. Ce résultat provient sans doute de la discussion que l'enseignant dit avoir eu avec les élèves avant la passation du

questionnaire, discussion anticipant la séquence car évoquant la diversité des méthodes. On pourrait avancer aussi une deuxième hypothèse : s'agissant du même enseignant qui a guidé les deux expérimentations, devenant conscient de la diversité des méthodes utilisées par les scientifiques dans leurs recherches après la première expérimentation, il a modifié sa pratique d'enseignement en mettant en avant l'existence de différentes démarches en cours d'année scolaire.

Cependant, certains élèves, parmi ceux qui optent pour la diversité des méthodes (36%), soulignent l'existence de méthodologies scientifiques appropriées : celles qui permettent d'avoir de meilleurs résultats. La démarche expérimentale reste la plus envisagée comme un moyen d'élaboration de connaissances et de découvertes scientifiques.

7. Le rapport à l'innovation des élèves

L'analyse des résultats obtenus aux questions portant sur l'importance et l'intérêt de la séquence, sur son organisation et son contenu, sur son apport montrent que la séquence a globalement reçu un accueil favorable tant sur l'organisation (travail en groupes, la discussion, la confrontation des idées,...), l'objectif (la diversité des méthodes et démarches utilisées, des enjeux poursuivis et le nombre des savants ayant participé à l'élaboration de la loi des sinus) et le contenu historique, l'apport (l'autonomie, la confiance en soi, l'esprit critique ; etc.). Mais il est à noter que, un peu plus d'élèves ont évoqué l'importance de réaliser un travail portant sur les savoirs scientifiques lors de la seconde expérimentation. Deux hypothèses peuvent être avancées quant à cette différence : les objectifs d'apprentissage de la seconde expérimentation sont uniquement d'ordre épistémologique contrairement à ceux de la première expérimentation, ce qui constitue une rupture plus grande dans le contrat didactique, les élèves de la deuxième expérimentation ont un niveau scolaire plus faible que lors de la première expérimentation selon les informations données par l'enseignant.

Le tableau 26 récapitule les résultats des deux expérimentations relatifs au questionnaire 2.

Questionnaire2, le rapport à l'innovation des élèves (Les pourcentages ne sont pas exclusifs)						
	Question 1 : les textes	Question 2 : le travail en groupe	Question 3 : ce que la séquence apprend d'important	Question 5 : importance de la réflexion historique	Question 6 : l'apprentissage par investigation	Question 7 : accueil de la séquence
Séquence1 (N=20)	<p>70% : faciles à comprendre</p> <p>30% difficiles à comprendre surtout de Snell et Al Hazen</p>	<p>90% sans difficulté</p> <p>10% : difficulté pour saisir les termes « enjeu » et « démarche »</p>	<p>65% : importance du contenu</p> <p>30% : importance de l'organisation</p>	<p>70% : importante</p> <p>52% : savoir les démarches</p> <p>35% : ne pas accepter les résultats</p> <p>aveuglement</p> <p>5% : confiance en soi</p> <p>15% : non utile</p>	<p>60% : désirent assister à d'autres séances</p> <p>33% : organisation</p> <p>17% : contenu</p> <p>40% : ne désirent pas assister (durée longue, difficulté de s'exprimer en français)</p>	<p>65% : utile et intéressante</p> <p>30% ennuyeuse et peu utile</p>
NB : la question 6 : Intérêt, difficulté et utilité du travail demandé ont été traités à part (voir tableau et histogrammes)						
	Question 1 : ce que la séquence apprend d'important	Question2 : importance de la réflexion historique	Question 3 : l'apprentissage par investigation	Question 5 : accueil de la séquence		
Séquence2 (N=25)	<p>48% : sur le contenu (nombre des savants, nature des démarches, des enjeux...)</p> <p>44% : la nouveauté de l'approche pédagogique, l'organisation</p> <p>24% : l'apport sur le plan personnel de la séquence (confiance en soi, envie de faire des études scientifiques)</p>	<p>88% : importante car elle favorise l'apprentissage du contenu scientifique</p> <p>12% : inutile (rapport de rentabilité et d'utilité à l'enseignement : connaître seulement la loi et faire des exercices)</p>	<p>54 % : désirent assister à d'autres séances</p> <p>46% : ne désirent pas assister (le travail ne contribue pas à la réussite), rapport de rentabilité et d'utilité à l'enseignement</p>	<p>80% : intéressante et utile car elle permet l'acquisition des connaissances.</p> <p>13% : contre car ils estiment qu'elle fait perdre du temps.</p>		

Tableau 26: le rapport à l'innovation des élèves

8. Conclusion

Les résultats de cette recherche relative aux points de vue des élèves sur la nature des sciences montrent qu'avant enseignement, ils sont porteurs de conceptions qui renvoient à une épistémologie empiriste, réaliste/naïve et positiviste.

Pour la majorité d'entre eux, les connaissances scientifiques sont découvertes par le scientifique en observant les phénomènes autour de lui. Celui-ci est capable de dévoiler la réalité cachée quelque part dans les événements du monde. L'enjeu principal qu'il poursuit est la recherche et la découverte des lois et théories ; d'autres élèves, moins nombreux, estiment qu'il cherche à faciliter la vie des gens et à faire progresser l'humanité.

Dans sa recherche de connaissances, de lois et théories, le savant utilise une méthode ou une démarche constituée d'étapes bien déterminées et devant être respectées de manière rigoureuse. Elles débutent par des observations neutres qui conduisent à travers les activités d'émission d'hypothèses et d'expérimentation à l'élaboration de théories en stricte correspondance avec la réalité. Cette démarche s'identifie le plus souvent avec la méthode OHERIC selon laquelle les théories scientifiques sont obtenues à partir de données grâce à la logique inductive.

Ces élèves admettent que le scientifique fait appel dans son travail aux mathématiques - celle-ci sont conçues comme intermédiaire pour formuler des relations, pour faire des calculs ou des démonstrations - et à l'imagination- ils en font usage surtout quand la réponse n'est pas immédiate ou quand le phénomène n'est pas accessible par les sens ou pour l'émission d'hypothèses. Dans un cas comme dans l'autre, les mathématiques et l'imagination sont plus perçues comme moyens facilitant la compréhension d'une situation courante et non comme des outils qui permettent par exemple d'inférer et de construire des modèles arbitraires pour expliquer ou prédire comment fonctionnent des phénomènes physiques. Cette conception serait en concordance avec la vision réaliste qui considère que le savoir scientifique existe indépendamment du savant et donc n'implique aucune créativité ou imagination.

Par ailleurs, les évaluations effectuées un mois après chaque séquence d'enseignement montrent que les résultats obtenus lors de ces deux expérimentations sont encourageants quant à la possibilité de faire évoluer l'image de la nature des sciences des élèves grâce à l'introduction de l'histoire des sciences relativement aux objectifs épistémologiques considérés. Ils révèlent aussi l'existence de résistance face à une rupture du contrat didactique chez un nombre non négligeable d'élèves.

Chapitre 4

Comparaison des conceptions spontanées des enseignants à celles des élèves

Cette comparaison porte sur les points de vue des élèves et des enseignants sur le rôle des expériences, des mathématiques, de l'imagination et de la créativité dans le travail du savant lors de la production des savoirs scientifiques. Nous explorons aussi les idées des élèves et des enseignants sur le nombre de savants qui ont participé à l'établissement de la loi des sinus pour la réfraction, sur les enjeux poursuivis par les scientifiques et sur les démarches utilisées. Nous nous appuyons sur le questionnaire sur la façon dont travaillent les physiciens administré à la fois aux élèves et aux enseignants, avant l'expérimentation de la séquence pour les premiers, avant la séance de formation pour les seconds.

1. Le rôle de l'expérience

Les points de vue des élèves et des enseignants sur le rôle de l'expérience et de l'observation dans l'élaboration d'une connaissance scientifique ou dans la découverte d'une loi sont explorés par les réponses aux questions Q₁₁₁ et Q₁₂₂. Les résultats à ces questions sont consignés dans le tableau 27.

	Q ₁₁₁		Q ₁₂₂	
	en faisant des expériences	en observant le phénomène	par expérience	sans expérience
Séquence 1 (N=20)	75%	53%	90%	10%
Séquence 2 (N=25)	70%	45%	76%	24%
Séance de formation des enseignants (N=35)	25%	44%	91%	9%

Tableau 27: comparaison des conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le rôle des expériences et des observations

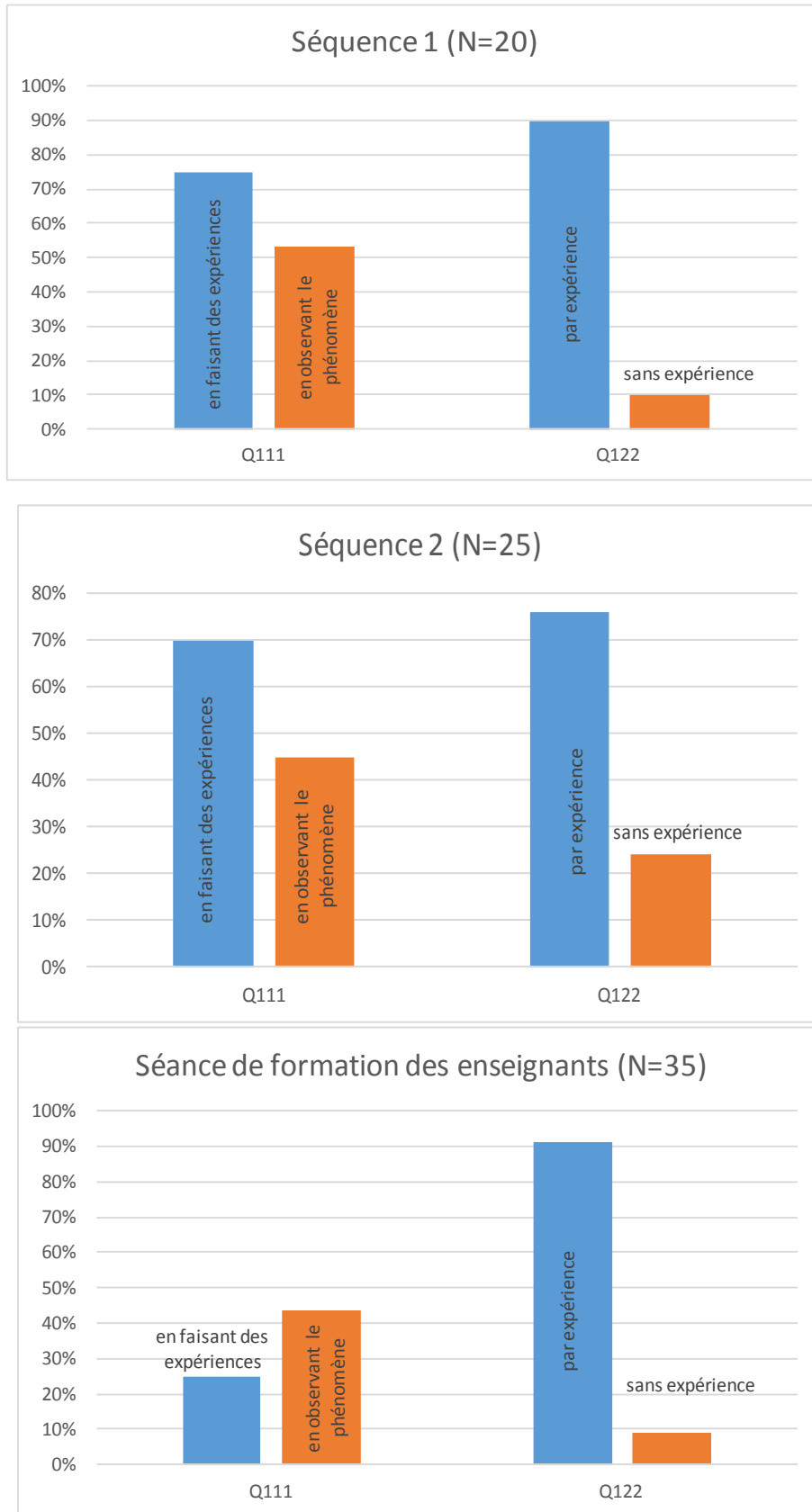


Fig. 23 : Histogrammes comparant les conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le rôle de l'observation et l'expérience

Les élèves lors des deux expérimentations, comme les enseignants lors de la séance de formation, assignent en majorité à l'expérience un rôle considérable dans la production d'un savoir scientifique ou dans la découverte d'une loi ou d'une théorie. Un nombre moins grand, environ 50% de ses sujets, considèrent que l'observation constitue une activité de base dans le travail du scientifique.

2. Le rôle des mathématiques

Les conceptions des élèves et des enseignants sur l'apport des mathématiques aux découvertes en physique sont explorées par la question Q_{1.2.3} sus citée. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 28).

	Q _{1.2.3}	
	en faisant appel aux mathématiques	en ne faisant pas appel aux mathématiques
Séquence 1 (N=20)	85%	15%
Séquence 2 (N=25)	72%	28%
Séance de formation des enseignants (N=35)	89%	11%

Tableau 28 : comparaison des conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le rôle des mathématiques

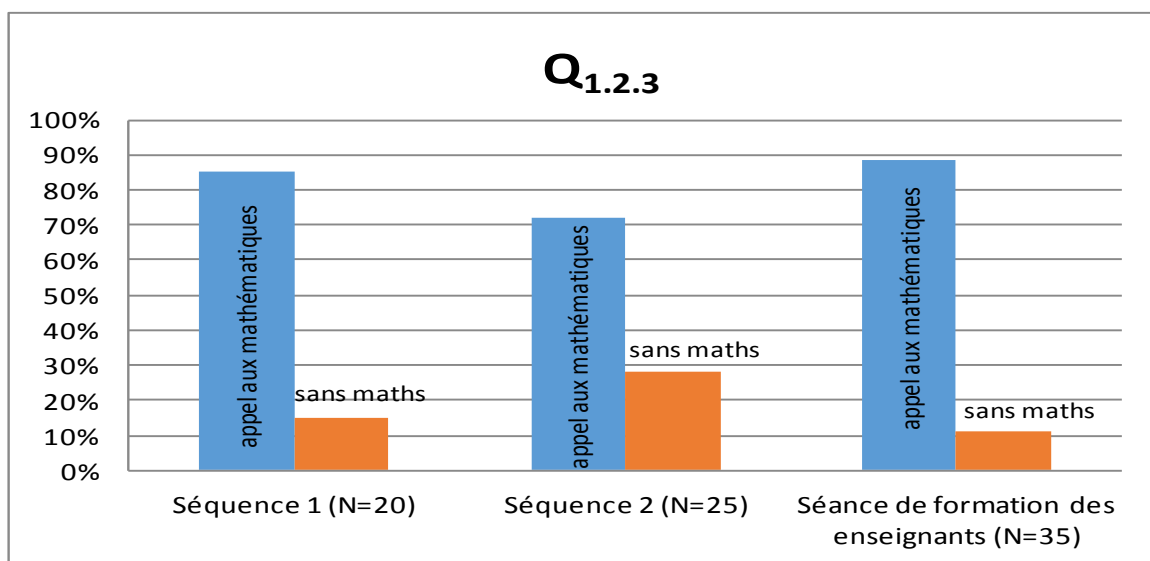


Fig. 24 : Histogrammes comparant les conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le rôle des mathématiques

Un grand nombre d'élèves et d'enseignants s'accordent sur le fait que les physiciens doivent faire appel aux mathématiques pour le développement des connaissances en physique. Pour les uns et les autres, elles sont plus vues comme un intermédiaire ou un lien pour la formulation des résultats, pour la démonstration. Si, pour tous les élèves et une majorité des enseignants, les mathématiques ne sont pas intégrées dans une démarche cohérente d'élaboration de savoirs scientifiques, une minorité d'enseignants considèrent qu'elles sont un moyen de modélisation des connaissances en physique.

3. L'imagination et la créativité

Les idées des élèves et des enseignants sur l'apport de l'imagination et la créativité dans le travail des physiciens ont été explorées par la question Q_{1.2.5} sus citée. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 29.

	Q _{1.2.5}	
Découverte ou élaboration d'un savoir	en faisant appel à l'imagination et à la créativité	en ne faisant pas appel à l'imagination et à la créativité
Séquence 1 (N=20)	55%	45%
Séquence 2 (N=25)	84%	16%
Séance de formation des enseignants (N=35)	83%	17%

Tableau 29: comparaison des conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le rôle de l'imagination et de la créativité

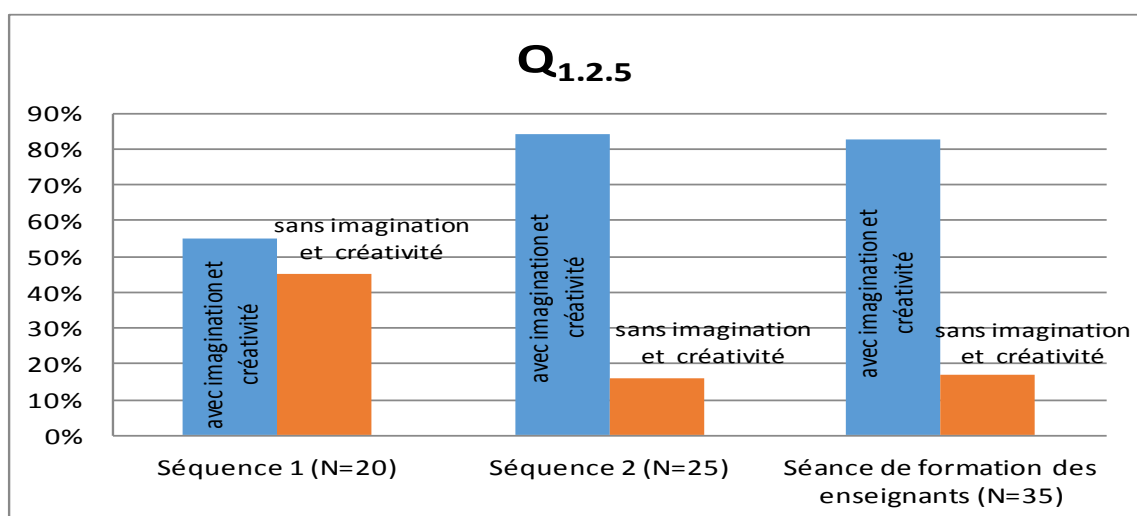


Fig. 25 : histogrammes comparant les conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le rôle de l'imagination et de la créativité

Les résultats montrent qu'une majorité d'élèves et d'enseignants s'accordent à dire que les physiciens doivent faire appel à l'imagination dans leur travail, et ce, pour mieux comprendre les phénomènes naturels, quand la réponse n'est pas donnée immédiatement par l'expérience ou quand le phénomène n'est pas accessible par les sens. Telle qu'elle est assimilée par les élèves et les enseignants, l'imagination serait plutôt un moyen pour avoir plus d'idées pour une meilleure compréhension du monde qu'une alternative permettant l'invention d'objets d'étude abstraits, des outils intellectuels, des concepts, des modèles ou la proposition de mécanismes en vue d'avancer des explications conduisant au développement des idées. Tous ceux qui sont contre, parmi les élèves et les enseignants, sont puissamment imprégnés d'une conception réaliste naïve qui considère que la physique est l'étude de la réalité et non de l'imaginaire, la réalité étant toujours exacte. Pour accéder au réel, il faut observer le monde, réaliser des expériences et non imaginer.

Nous notons qu'aucun des sujets interrogés parmi les élèves ou les enseignants n'a proposé de réponse relatant le rôle de la créativité dans l'élaboration des connaissances. On peut objecter que la formulation de l'item en est à l'origine. En effet, la créativité étant toujours citée après l'imagination dans la question, on pourrait émettre l'hypothèse que l'imagination fait écran à la créativité. Les répondants se hâtent de proposer des réponses relatives à l'imagination et oublient rapidement le reste de la question qui porte sur la créativité.

4. le nombre de scientifiques ayant contribué à l'élaboration de la loi des sinus

Les idées des élèves et des enseignants sur le nombre de scientifiques ayant contribué à l'établissement de la loi des sinus pour la réfraction ont été explorées par la question Q_{1.1.1} sus citée. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 30.

	Q _{1.1.1}		
	Sans réponses	1 savant	Plusieurs savants
Séquence 1 (N=20)	(5) : 25%	20%	33%
Séquence 2 (N=25)	(5) : 20%	100%	0%
Séance de formation des enseignants (N=35)	(19) : 54%	15%	15%

Tableau 30 : comparaison des conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le nombre de savants

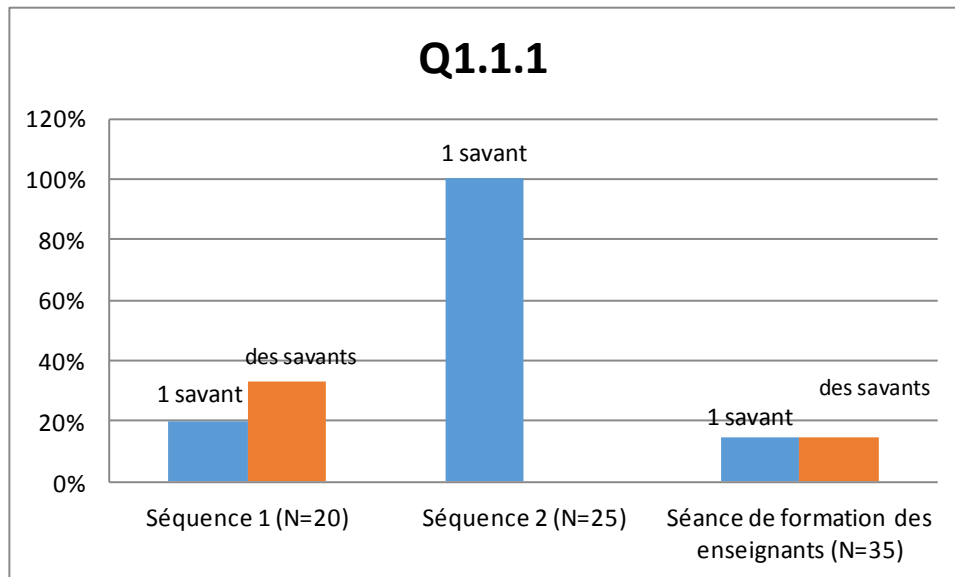


Fig. 26 : histogrammes comparant les conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur le nombre de savants

Étant donné le nombre de sujets qui ne se sont pas exprimés sur cette question, tant du côté des enseignants que du côté des élèves, les conclusions tirées à ce propos ne peuvent pas être considérées comme très significatives. Cependant les élèves qui ont formulé une réponse lors de la seconde expérimentation signalent en totalité un seul savant : ceux-ci véhiculent une image erronée des scientifiques et du fonctionnement de l'entreprise scientifique. Ces élèves ne sont pas conscients que, dans cette entreprise, les scientifiques travaillent en équipe et résolvent des problèmes en collaboration.

5. La diversité des enjeux

Les idées des élèves et des enseignants sur les enjeux poursuivis par les scientifiques dans leurs travaux de recherches sont explorées par la question Q₁₂₁. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 31.

	Q ₁₂₁	
	1 enjeu	Plusieurs enjeux
Séquence 1 (N=20)	60%	40%
Séquence 2 (N=25)	88%	12%
Séance de formation des enseignants (N=35) :	90%	21%

Tableau 31: comparaison des conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur les enjeux

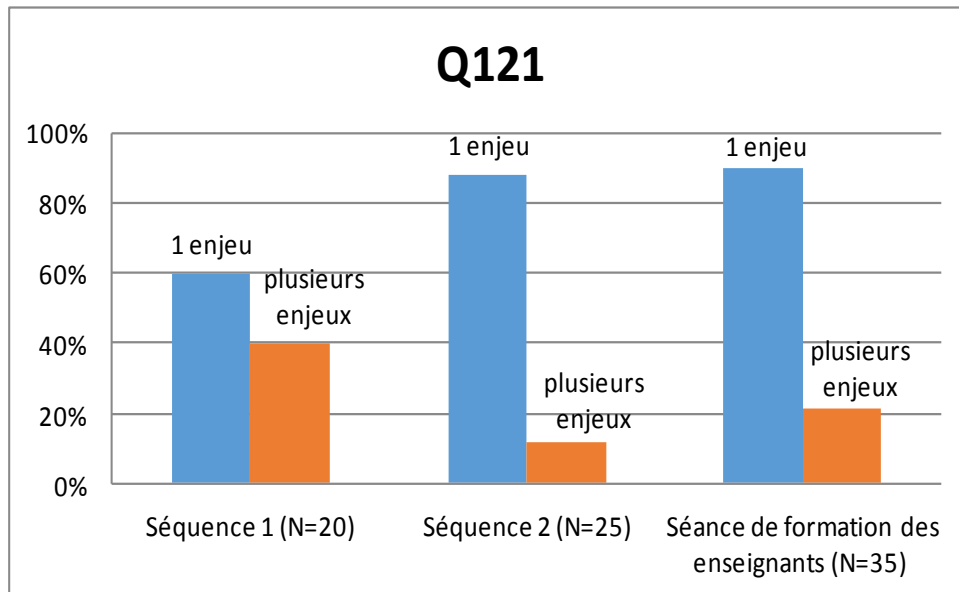


Fig. 27 : histogrammes comparant les conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur la diversité des enjeux

Les réponses à la question montrent qu'une grande majorité des élèves et des enseignants considèrent que le scientifique a pour premier objectif la compréhension des phénomènes de la nature et la découverte des lois qui les gouvernent ainsi que l'atteinte des vérités du monde. Un nombre restreint des élèves et des enseignants avancent l'idée que le savant dans son travail cherche à résoudre différents problèmes inscrits dans des projets humains (énergie, santé,...), liés à une société donnée. Il poursuit donc une diversité d'enjeux.

6. la diversité des méthodes

Les points de vue des élèves et des enseignants sur le(s) démarche(s) ou méthode(s) utilisée(s) par le scientifique dans ses activités de recherche ont été explorés par la question Q₁₂₄ sus citée. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 32.

	Q ₁₂₄	
	1 méthode	Plusieurs méthodes
Séquence 1 (N=20)	55%	40%
Séquence 2 (N=25)	16%	84%
Séance de formation des enseignants (N=35)	69%	31%

Tableau 32 : comparaison des conceptions des élèves (E1-E2) et enseignants sur la diversité des méthodes

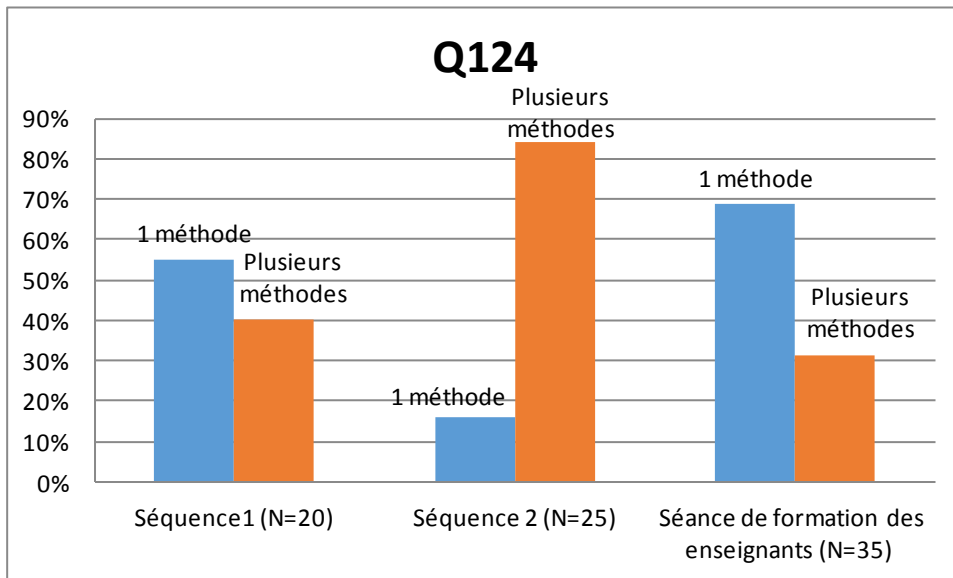


Fig. 28 : histogrammes comparant les conceptions des élèves (E1-E2) et des enseignants sur la diversité des méthodes

À part les élèves de la seconde expérimentation qui ont pu être influencés par la discussion que l'enseignant dit avoir eue avec eux avant la passation du questionnaire, anticipant la séquence en évoquant la diversité des méthodes, un grand nombre d'élèves de la première expérimentation et des enseignants pensent à une méthode unique. Les justifications données montrent qu'elle est conçue comme une procédure linéaire constituée d'étapes bien précises et respectées de manière rigoureuse qui conduiraient à l'élaboration des lois et théories en parfaite correspondance avec la réalité. Elle est généralement schématisée comme la succession d'une observation passive, d'une expérimentation sans théorie préexistante qui amènerait finalement à l'énonciation de principes généraux répondant ainsi à une démarche inductive stricte ou naïve qui est le plus souvent mise en œuvre en salle de classe. Cette méthode, si elle est pratiquée correctement serait universelle, produirait un savoir vrai et « incorruptible » et révèle la fausseté des connaissances non scientifiques.

Cependant certains parmi eux soulignent l'existence de méthodologies scientifiques appropriées : les méthodes correctes qui permettent d'inventer les connaissances correctes et les méthodes erronées qui conduisent à des connaissances erronées. Dans ce cas, la méthode scientifique est tributaire du type de savoir scientifique élaboré : celles qui sont correctes permettent de produire un savoir fixe, absolu et existant en dehors et indépendamment du savant. Cette vision distille la croyance en l'existence d'une méthode miraculeuse qui, si elle est bien utilisée, s'avère infaillible et mène tout droit à la vérité.

7. Conclusion

Ces points de vue renvoient à une épistémologie empiriste, réaliste souvent naïve et positiviste, une épistémologie largement dépassée et influençant de près le contexte scolaire où le savoir scientifique est essentiellement présenté comme un objet d'apprentissage au sens empiriste. Commentant le caractère de ce savoir et son effet sur l'engagement cognitif des apprenants, Larochelle et Désautels (1992) écrivaient : *« il a donc un caractère impersonnel et ne suscite chez les étudiants qu'un engagement cognitif passif : ceux-ci ne formulent ni leurs questions et problèmes de recherche, ni les termes de l'investigation que la résolution de ces problèmes requiert, ni les caractères de sa fiabilité et de sa validité. De plus, s'ils sont invités à justifier rationnellement leurs conclusions, c'est davantage à leurs capacités de réciter les explications des autres que l'on s'adresse (puisque'ils doivent arriver à une réponse déjà trouvée !) qu'à leurs capacités de construire leurs propres explications et ainsi développer une compétence d'apprenant autonome »* (p.17).

La ressemblance dans les points de vue des élèves et des enseignants de chacun des échantillons interrogés sur l'importance de l'expérience dans l'élaboration des connaissances scientifiques pourrait être liée aux pratiques pédagogiques de l'enseignant. Cela conforterait donc la conclusion de Brickhouse (1990) selon laquelle les conceptions épistémologiques des enseignants s'expriment de manière directe dans les cours et structurent aussi plus largement les stratégies de la classe et le sens qui leur est donné (expérimentation, observation, débats, etc.). Cette ressemblance pourrait être aussi liée aux discours des enseignants selon l'idée que leur langage conditionne fortement les conceptions des apprenants (Zeidler et Lederman, 1989). Cependant, il existe des thèses contradictoires indiquant que la relation entre les conceptions de la nature des sciences des enseignants et leur pratique de classe est plus complexe que prévu à l'origine et que plusieurs variables limitent la traduction des conceptions des enseignants en pratique. (Abd-El-Khalick et al., 1998 ; Lederman & Zeidler, 1987).

Conclusion générale

1. À propos des conceptions des élèves et des enseignants sur la nature des sciences.

1.1. Conceptions des élèves

Avant les deux séquences d'enseignement-apprentissage, la majorité des deux groupes d'élèves détiennent des conceptions voisines relatives à l'élaboration des connaissances scientifiques et des activités des scientifiques. Pour la majorité des sujets, les connaissances sont tirées de l'étude du monde qui nous entoure, issues d'une démarche expérimentale logique et rigoureuse qui renvoie à une épistémologie empiriste. Elle s'identifie à une procédure linéaire constituée d'étapes bien précises, commençant généralement par l'observation neutre et passive suivie de la formulation d'une hypothèse qu'on soumet à l'expérimentation, l'analyse des résultats de l'expérimentation permet au scientifique d'induire une loi ou une théorie. Cette procédure s'apparente avec la démarche expérimentale OHERIC très connue.

Pour ces élèves, la perception sensorielle serait la seule base légitime des productions scientifiques : « il suffit de regarder pour comprendre ». La théorie serait l'aboutissement du processus de recherche et non une représentation la guidant et évoluant avec elle.

Selon cette vision, les connaissances sont assimilées à des vérités absolues, découvertes par le scientifique qui explore le « réel ». « La réalité » existe et elle est indépendante du chercheur qui la dévoile, l'enjeu principal de celui-ci consiste seulement à la découverte des lois et théories. Elles sont considérées comme des répliques du monde et en rendent compte, elles ne sont pas perçues comme des constructions humaines, imparfaites et nécessairement teintées d'une forme de subjectivité.

Le scientifique est quelqu'un qui travaille le plus souvent en solitaire, isolé dans son laboratoire du reste du monde, et cherche à faire « jaillir la vérité » cachée du « réel ». Dans ce cadre, le bon scientifique est quelqu'un qui observe d'abord la réalité. Il utilise les faits pour bâtir sa théorie ; la réalité étant toujours exacte, il n'a donc pas besoin de recourir dans son travail à l'imagination, à l'invention et à la créativité.

Cependant, un bon nombre d'élèves s'accordent sur le fait que le scientifique fait appel dans son travail à l'imagination, celle-ci est le plus souvent perçue comme un moyen pour avoir plus

d'idées pour mieux comprendre les phénomènes de la nature, ou pour avoir accès à la réponse quand celle-ci n'est pas immédiate par l'expérience.

Aux sujets des méthodes scientifiques utilisées pour la production des savoirs scientifiques, nous constatons qu'à part le groupe d'élèves qui a évoqué majoritairement la diversité des méthodes dès le départ, sans doute suite à la discussion que l'enseignant dit avoir eue avec eux avant la passation du questionnaire, les autres évoquent majoritairement une seule méthode, celle décrite précédemment et qui renvoie à une forme d'inductivisme dans laquelle l'expérience tient une place première.

Les points de vue des élèves reflètent des conceptions réalistes naïves et empiristes héritées de l'épistémologie traditionnelle. Ces résultats obtenus auprès des élèves tunisiens rejoignent ceux dégagés dans d'autres pays (Lederman, 2007).

1.2. Conceptions des enseignants

Les résultats obtenus aux questions portant sur l'élaboration des savoirs scientifiques et la façon dont travaillent les scientifiques révèlent que la majorité des enseignants détiennent des conceptions voisines de celles des élèves. Il s'agit d'une conception réaliste naïve de la science (la connaissance scientifique existe indépendamment de l'expérience personnelle, elle est vraie et réelle, les objets scientifiques existent dans le monde et sont découverts par les scientifiques), empiriste (l'observation est première et indépendante de la théorie, elle fournit une base sûre et objective à partir de laquelle il est possible d'extraire les connaissances scientifiques par le double processus d'induction et de généralisation) et positiviste (il existe une procédure anhistorique constituée d'étapes stéréotypées que tous les scientifiques suivent quand ils font de la science et qui garantirait le développement de connaissances infaillibles). Les conceptions spontanées des enseignants seraient fondées sur des modèles épistémologiques proches du sens commun (Roletto, 1998 ; Abd-El-Khalick & Lederman, 2000a).

Ces résultats mettent en évidence un manque profond de culture épistémologique chez les enseignants tunisiens comme Roletto l'a montré pour les enseignants français et italiens (1998). Dans les deux cas, les enseignants n'ont pas eu de formation initiale spécifique sur des questions relatives à l'épistémologie des sciences, que ce soit lors de leurs études secondaires ou lors de leurs études universitaires, et n'ont donc jamais eu l'occasion de réfléchir sur des aspects des sciences, comme la façon dont travaillent les scientifiques, les enjeux qu'ils poursuivent, les méthodologies qu'ils utilisent au cours de leurs recherches. La plupart de ces enseignants ont poursuivi leurs études au sein d'institutions dont l'objectif est de pousser les élèves à apprendre des connaissances toutes faites, d'exposer des résultats acquis, des savoirs

vérifiés, prouvés, indiscutables, de donner aux élèves des vérités, en présentant les connaissances comme des évidences empiriques, et en évitant, autant que possible, de donner l'impression qu'on y parvient par des détours, des contradictions et des négociations. On ne doit donc pas s'étonner que de nombreux enseignants partagent une vision dépassée des sciences et ignorent la dimension épistémologique de l'apprentissage des sciences (Robardet & Vérin, 1998).

1.3. Similitude entre les conceptions des élèves et celles des enseignants sur la NoS

La comparaison des résultats obtenus auprès des élèves et enseignants avant les séquences d'enseignement et la séance de formation montrent que ces sujets détiennent une image dépassée et erronée de ce que sont les sciences, des enjeux poursuivis par les scientifiques et des modes d'élaboration des connaissances scientifiques.

La similitude entre les conceptions des élèves et celles des enseignants sur la nature des sciences et sur les activités scientifiques laisse supposer que les enseignants ont un rôle important dans la transmission des conceptions spontanées sur les sciences aux élèves vu le rôle qui leur revient dans la conception et l'exercice de l'acte éducatif.

Des études menées dans des pays anglo-saxons montrent que des connaissances sur la nature des sciences se transmettent à travers l'enseignement des sciences physiques à l'insu de l'enseignant, « à travers ce qui se dit et se fait en classe » à propos des savoirs disciplinaires, ainsi :

Cette transmission peut avoir lieu à travers les stratégies et les activités menées en classe, par exemple la démarche utilisée par les enseignants tunisiens dans les cours est pratiquement toujours fortement imprégnée d'inductivisme et répond au schéma de la méthode scientifique (expérimentale) OHERIC très connu. Ce schéma est celui qui est le plus répandu dans les manuels de chimie et de physique tunisiens, il est généralement présenté tel qu'il est exposé dans ces manuels par les enseignants. Cette démarche apparaît appréhendée par eux comme un outil permettant d'enseigner – avant tout des résultats de la science (Schneeberger & Rodriguez, 1999). La mise en œuvre de cette démarche dans les activités scolaires sous une forme épurée ou réductrice conduit à transmettre aux élèves une image déformée des sciences et du travail des scientifiques.

Cette transmission pourrait aussi avoir lieu à travers le discours ordinaire de l'enseignant : les propos qu'il tient sur la nature des sciences conditionnent puissamment les conceptions des apprenants (Zeidler & Lederman, 1992).

2. À propos du rapport des élèves à l'innovation et des enseignants à la séance de formation et à l'innovation

2.1. Rapport des élèves à l'innovation

La séquence a reçu un accueil favorable tant en ce qui concerne la nouveauté de la méthode pédagogique que l'organisation du travail (en groupes), l'objectif d'apprentissage poursuivi, le contenu historique, l'apport sur le plan personnel (l'autonomie, la confiance en soi, l'esprit critique, etc.).

Mais il est à noter qu'un nombre non négligeable d'élèves ont indiqué que certaines activités sont difficiles à réaliser : sont ainsi précisées, la lecture des documents, la mise en commun des informations recueillies par les différents groupes et la confrontation de leurs idées avec les résultats de la lecture collective. Cela amène ces élèves à émettre des réserves sur l'importance et l'intérêt de cette séquence.

Ces réticences peuvent être liées :

- au caractère transmissif de l'enseignement tunisien encore très dominant où le professeur présente le cours et les élèves écoutent passivement et prennent des notes. Un tel modèle d'enseignement met l'élève hors de l'acte éducatif et le laisse dans une situation ne permettant pas son implication réelle dans la construction de son savoir. Dès lors, il se retrouvera en difficulté chaque fois qu'il se confronte à de nouvelles méthodes pédagogiques du type de la démarche d'investigation. En effet, celle-ci met l'apprenant dans la posture du chercheur en l'amenant à poser des questions, à émettre des hypothèses, à proposer des réponses et à les comparer avec ce que les scientifiques savent déjà sur le monde, etc.
- à la nature des objectifs d'apprentissage. D'ordre épistémologique, ils sont en rupture avec le contrat didactique habituel, ce qui semble avoir déstabilisé davantage les élèves.
- au peu d'intérêt exprimé par les élèves vis à vis de ces objectifs d'apprentissage qui ne constituent pas une connaissance sur laquelle portent les examens. Ils sont donc inutiles.

2.2. Rapport des enseignants à la séance de formation et à l'innovation

En ce qui concerne la séance de formation, une forte majorité des enseignants souhaite participer à une autre séance de formation, identique, avant tout dans le but de mieux s'approprier les étapes de la démarche d'investigation et la façon de la mettre en œuvre, et dans une moindre mesure d'acquérir une culture sur la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées.

Quand à la séquence innovante, la majorité des enseignants l'accueillent favorablement. Cependant ils émettent des réserves quant à la possibilité de la mettre en œuvre à cause de leur manque de compétences professionnelles pour enseigner la nature des sciences en utilisant l'histoire des sciences et de leur manque de formation sur cette nouvelle stratégie pédagogique basée sur l'investigation.

3. Les limites de cette recherche et les perspectives

Le travail effectué comporte plusieurs limites que nous esquissons ci-dessous. Elles amènent à autant de questions qui peuvent donner lieu à des recherches ultérieures.

- Le post-test a été administré un mois après chaque expérimentation. Peut-il traduire la stabilité de l'apprentissage ?
- L'étude des conceptions épistémologiques et du rapport à l'innovation a touché une population de 45 élèves et de 30 enseignants de notre circonscription. Quelle généralisation des résultats est-il possible de faire ? Les résultats seraient-ils identiques auprès d'une autre population d'élèves et d'enseignants tunisiens ?
- L'expérimentation a porté sur deux études de cas ayant touché deux classes différentes. La généralisation des résultats obtenus concernant l'évolution des conceptions des élèves relativement aux objectifs épistémologiques visés et le rapport à l'innovation des élèves est-elle possible ?
- Notre méthodologie d'enquêtes s'appuie uniquement sur des questionnaires. Est-elle suffisante pour explorer les conceptions des élèves et des enseignants sur la nature des sciences ? Des entretiens ne seraient-ils pas nécessaires pour éclairer certaines réponses ?
- Notre méthodologie de suivi d'expérimentation et d'analyse des questionnaires nous a permis de dégager les conceptions partagées par un ensemble d'élèves et de spécifier leur évolution globale. Si nous croisons les réponses des élèves (ou des enseignants) à

un même questionnaire, pouvons-nous déterminer des profils-types avant enseignement (ou formation) ou après ? Pouvons-nous suivre l'évolution individuelle des élèves lors de l'expérimentation ?

- La séquence est centrée sur une thématique scientifique particulière : la dioptrique. Les résultats obtenus seraient-ils les mêmes avec d'autres thèmes scientifiques, en particulier ceux qui ne relèvent pas du domaine de l'optique ? L'accent mis sur l'observation ne pourrait-il être favorisé par ce domaine ?
- La séquence est centrée sur deux objectifs particuliers : les enjeux et les démarches. Quels seraient les résultats avec d'autres objectifs, les présumés par exemple ?

A court terme, nous envisageons de poursuivre le travail d'ingénierie didactique sur cette séquence d'enseignement. Notre étude visait à montrer aux élèves et aux enseignants la diversité des enjeux poursuivis et des démarches utilisées par les scientifiques. Volontairement, nous nous sommes limité à un premier niveau de formulation de ces caractéristiques des sciences : nous n'avons pas cherché, de la part des élèves, la compréhension profonde de leurs significations à partir de la lecture des textes historiques.

L'analyse des résultats montre d'une part que ces aspects ne sont pas clairement compris, ni par les élèves, ni par les enseignants, et que d'autre part, la mise en œuvre de cette séquence, centrée sur des questions épistémologiques, a soulevé des difficultés.

Cela rejoint un constat fait par Höttecke et Silva (2010) ainsi que Monk et Osborne (1997). Le manque de compétence observé chez l'enseignant et le formateur pour enseigner des aspects de la NoS via l'histoire des sciences ne leur est pas spécifique. En effet, la pratique de l'enseignement des sciences chez les professeurs est le plus souvent ni informée par l'épistémologie, ni par l'histoire des sciences (Martins, 2007; Wang & Marsh, 2002). De plus, selon Lederman (1999), même si les enseignants sont informés des aspects de la nature des sciences, ils ne les prennent pas en compte dans leur pratique d'enseignement.

Vu les difficultés rencontrées par les élèves et les enseignants, en particulier en ce qui concerne les enjeux, la question se pose d'examiner s'il est possible d'approfondir le niveau de compréhension. Pour cela, nous envisageons d'élaborer une progression de deux séquences d'enseignement-apprentissage, l'une pour les enjeux, l'autre pour les démarches, et de concevoir des grilles de lecture à partir desquelles les élèves devraient être en mesure

d'identifier les enjeux principaux et les enjeux emboîtés à partir de chaque texte. Un travail similaire pourrait être réalisé à propos des démarches d'autant que, dans certains cas, le savant peut utiliser plus d'une démarche à la fois. Des schémas tels que ceux proposés par Guillon (1996) pourraient être fournis aux élèves pour les aider à identifier la nature d'une démarche.

Dans un cas comme dans l'autre, il est possible de réduire le nombre de textes utilisés et de se contenter, par exemple, de deux textes afin d'alléger le travail demandé et de gagner du temps pour approfondir les significations des contenus épistémologiques, objets d'instruction.

Pour élaborer et mettre en œuvre ces séquences en classe, nous préconisons l'utilisation de l'approche qualifiée de symbiotique (Höttecke & Silva, 2010). Elle consiste à intégrer, dès le départ, les enseignants qui auront la tâche de guider les séquences d'enseignement, au processus d'élaboration de l'innovation. Ces derniers participent ensemble, avec le chercheur, au développement de l'innovation, en partageant leurs points de vue et leurs idées, en identifiant les obstacles et les options, en concevant la stratégie efficace de la mise en œuvre de l'innovation, en l'essayant et en l'évaluant avant son implémentation finale. Cette stratégie garantirait selon les auteurs, un degré élevé d'acceptation des résultats par les enseignants et leur permettrait d'être plus performants dans leur enseignement.

4. Implications pour l'enseignement

Au niveau des programmes

Le rapport différent des élèves à l'innovation ainsi que les fortes réticences manifestées par les enseignants lors de la séance-test de formation continue conduisent à questionner la possibilité d'intégrer ponctuellement des séances à visée épistémologique dans l'enseignement secondaire tunisien actuel et à envisager la nécessité d'un enseignement, donc de programmes, prenant en compte sur le long terme la dimension épistémologique. En conséquence, nous suggérons que, comme dans le projet 2061 de l'AAAS, la NoS soit explicitée comme un enjeu d'enseignement dans le curriculum et déclinée en objectifs pédagogiques associés à des aspects particuliers à chaque niveau d'enseignement.

Au niveau des manuels

Comme les manuels proposent peu de ressources historiques et renvoient une image des sciences éloignée de celle de l'épistémologie contemporaine, il est souhaitable que des

ressources documentaires et des activités pour les élèves soient élaborées. Le travail réalisé pour cette thèse pourrait être mis à profit à cette fin.

Au niveau de la formation des enseignants

Les enseignants soulignent leur manque de formation, aussi bien sur le plan des méthodes pédagogiques que sur le plan de l'épistémologie et de l'histoire des sciences. Il est donc souhaitable qu'ils acquièrent un minimum de connaissances en ces domaines afin que toute proposition d'innovation ait réellement les chances d'être mise en œuvre et de donner les effets escomptés.

Références bibliographiques

- Abd-El-Khalick, F. (1998). The influence of history of science courses on students' - conceptions of the nature of science. Unpublished doctoral dissertation, Oregon State University, Oregon.
- Abd-El-Khalick, F. (2005). Developing deeper understandings of nature of science: the impact of philosophy of science course on preservice teachers' views and instructional planning. *International Journal of Science Education*, 27(1), 15-42.
- Abd-El-Khalick, F. (2004). Over and over and over again: College students' views of nature of science. In L. B. Flick & N. G. Lederman (Eds.), *Scientific inquiry and nature of science* (389–426). Dordrecht: Kluwer.
- Abd-El-Khalick, F., Bell, R.L., & Lederman, N.G. (1998). The nature of science and instructional practice: Making the unnatural natural. *Science Education*, 82(4), 417-436.
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. (2000a). Improving science teachers' conceptions of nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 22 (7), 665-701.
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. (2000b). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37 (10), 1057-1095.
- Aikenhead, G. (1972). The measurement of knowledge about science and scientists: An investigation in to the development of instruments for formative evaluation. *Dissertations Abstracts International*, 33, 6590A. (University Microfilms n° 72-21,423).
- Aikenhead, G. (1973). The measurement of high school students' knowledge about science and scientists. *Science Education*, 57(4), 539-549.
- Aikenhead, G., Ryan, A. (1989). *The development of multiple-choice instrument for monitoring views on science-technology-society topics*. Saskatoon, department of curriculum Studies. College of Education. University of Saskatchewan.
- Akindehin, F. (1988). Effect of an instructional package on preservice science teachers' understanding of the nature of science and acquisition of science-related attitudes. *Science Education*, 72(1), 73-82.
- Albe, V. (2011). Notes de synthèse : Finalités socio-éducatives de la culture scientifique. *Revue française de pédagogie*, n° 174, 119-138.

- Allchin, D. (2003). Scientific myth-conceptions. *Science Education*, 87 (3), 329–351.
- American Association for the Advancement of Science. (1989). *Science for all Americans: A project 2061 report on literacy goals in science, mathematics and technology*, Washington, DC: AAAS.
- American Association for the Advancement of Science. (1990). *Science for all Americans*. New York: Oxford University Press.
- American Association for the Advancement of Science. (1993). *Benchmarks for science literacy*. New York: Oxford University Press.
- Akerson, V.L. & Abd-El-Khalick, F. (2005). “How Should I Know What Scientists Do? I Am Just a Kid”: Fourth-Grade students’ conceptions of Nature of Science. *Journal of Elementary Science Education*, 17(1), 1-11.
- Akerson, V.L., & Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. (2000). Influence of a reflective explicit activity-based approach on elementary teachers’ conceptions of the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 295–317.
- Akerson, V.L., & Morrison J.A. & McDuffie, A.R. (2006). One course is not enough: preservice elementary teachers’ retention of improved views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 43, 194–213.
- Armatte, M. (2005). La notion de modèle dans les sciences sociales: anciennes et nouvelles significations. *Mathématiques et sciences humaines*, 172(4), 91-123.
- Arons, A. B. (1983). Achieving wider scientific literacy. *Daedalus*, 112(2), 91–122.
- Association for Science Education (1981). *Education Through Science: An ASE policy Statement*, Hatfield England.
- Arsac, G., Chevallard, Y., Martinand, J.L. & Tiberghien, A. (1994). *La transposition didactique à l’épreuve*, Grenoble, La pensée sauvage.
- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 9(3), 281-308.
- Artigue, M. (2009). L’ingénierie didactique comme un thème d’étude. Cours1. *XVe école d’été de didactique des mathématiques Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)*.
- Artigue, M. (2009). L’ingénierie didactique : un essai de synthèse, cours2, *XVe école d’été de didactique des mathématiques Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)*.

- Artigue, M. (2009). Didactical Design in Mathematics education, in C.Winslow (Eds.). *Nordic Research in Mathematics Education. Proceeding from NORMA08* in Copenhaguen. April21-April25, pp. 7-16. Sens Publishers.
- Astolfi, J.P. (1993). Placer les élèves en « situations problèmes ». *Probio-revue*, 16(4), 311-321.
- Astolfi, J.P. & Develay, M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris, PUF.
- Astolfi, J-P. (1992). Apprendre par franchissement d'obstacles ?, *Repères N°5*, pp. 103-116.
- Audigier F. & Fillon P. (1991). *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques. Une approche pluridisciplinaire*. Paris : INRP
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bady, R.A. (1979). Students' understanding of the logic of hypothesis testing. *Journal of Research in Science Teaching*, 16(1), 61 -65.
- Baumert, J. (1997). Scientific literacy: A German perspective. In W.Graeber & C. Bolte (Eds.), *Scientific literacy. An international symposium* (p. 167-180). Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN): Kiel, Germany.
- Bencze, J. L. (2001). Subverting corporatism in school science. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 1(3), 349-355.
- Bentley, M. L. & Garrison, J. W. (1991). The role of philosophy of science in science teacher education. *Journal of Science teacher Education*, (2), 67-71.
- Bernard, C. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. (Reed. 1984). Paris : Flammarion.
- Billeh, V. Y. & Hasan, O. E. (1975). Factors influencing teachers' gain in understanding the nature of science. *Journal of Research in Science teaching*, 12 (3), 209-219.
- Blanckaert, C. (2007). Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique, *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 16 | 2007, mis en ligne le 20 mars 2007, consulté le 06 avril 2013. URL:
[<http://histoire-cnrs.revues.org/1526>.]

- Blanco, R. & Niaz, M. (1997). Epistemological beliefs of students and teachers about the nature of science: from 'baconian inductive ascent' to the 'irrelevance' of scientific laws. *Instructional Science*, 25, 203–231.
- Blay, M. (2007). La vue et la lumière : Sur quelques aspects de l'histoire de la lumière. *Revue d'Histoire des sciences*. Tome 60-1, 119-132.
- Bloch, E. (1986). Basic research and economic health — the coming challenge. *Science*, 232(4750), 595–599.
- Bloor, D., & Barnes, B. (1996). *Scientific knowledge: A sociological analysis*. Chicago: University of Chicago Press.
- BouJaoude, S. (1996). *Epistemology and Sociology of Science according Lebanese Educators and students*. (ERIC Document Reproduction Service No ED 394 848).
- Branscomb, A. W. (1981). Knowing how to know. *Science, Technology & Human Values*, 6(36), 5–9.
- Bracco, C. & al. (2004). *Histoire des idées sur la lumière – de l'Antiquité au début du XX^e siècle*, cédérom, CNDP.
- CNDP (2000). Documents d'accompagnement. Physique. Classe de seconde.
- Brickhouse, N. (1990). Teacher's beliefs about the nature of science and their relationship to classroom practice. *Journal of Teacher Education*, 41(3), 53-62.
- Broadhurst, N.A. (1970). A study of selected learning outcomes of graduating high school student in South Australian schools. *Science Education*, 54(1), 17-21.
- Brooks, H. (1991). Scientific literacy and the future labour force. In T. Husen & J. P. Keeves (Eds.), *Issues in science education* (19–32). Oxford: Pergamon Press.
- Brousseau, G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol 7, 2, 33-115.
- Brousseau, G. (1988). Le contrat didactique : le milieu. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 9,3, 309-336.
- Brousseau, G. (1998). Les obstacles épistémologiques, problèmes et ingénierie didactique. In G. Brousseau (dir), *Théorie des situations didactiques* (115-160). Grenoble. La Pensée Sauvage.
- B.O. (2001). Programme de la classe de seconde générale et technologique. Physique-chimie. Hors-série, n°2 du 30 août. France.
- [<http://www.education.gouv.fr/bo/2001/hs2/default.htm>]
- B.O. (2005). Programme des collèges. Physique-chimie. Hors série, n°5 du 25 août. France.

- [<http://www.education.gouv.fr/bo/2005/hs5/default.htm>]
- B.O. (2008). Programme du collège. Physique-chimie. n° 6 du 28 août. France.
[http://media.education.gouv.fr/file/special_6/52/7/Programme_physique_chimie_33527.pdf]
- B.O. (2010). Programme de physique-chimie en classe de seconde générale et technique. Spécial n° 4 du 29 avril. France.
[http://cache.media.education.gouv.fr/file/special_4/72/9/physique_chimie_143729.pdf]
- Bruner, J.S. (1983). *Le développement de l'enfant : savoir faire, savoir dire*. Paris, PUF.
- Butterfield, H. (1965). *Origins of modern science, 1300-1800*. New York: Free Press.
- Bybee, R. (1997). *Achieving scientific literacy: From purposes to practices*. Portsmouth: Heinemann.
- Bybee, R., McCrae, B. & Laurie, R. (2009). « PISA 2006: An assessment of scientific literacy ». *Journal of Research in Science Teaching*, 46(8), 865-883.
- Chalmers, A. (1982, 1987). *Qu'est-ce que la science ?* Paris : Éditions La Découverte. (Première édition anglaise : *What is this thing called science ?* 1976).
- Calmettes Bernard (1996). *Contribution à l'étude des curriculums. Le cas de l'enseignement de l'électrotechnique dans les classes du second degré des lycées d'enseignement général et technologique*. Thèse de doctorat nouveau régime en didactique des sciences. Université de Toulouse 3.
- Calmettes, B. (2008b). Des références pour la démarche d'investigation. Analyse de cas : séances de classe avec des professeurs stagiaires. *Dossiers des Sciences de l'Éducation*, 20. *Analyse de situations didactiques : perspectives comparatistes*. Toulouse : Presses Universitaires du Mirail.
- Caillot, M. (1996) La théorie de la transposition didactique est-elle transposable ?, in Raisky, C. et Caillot, M. (dir.) *Au-delà des didactiques, le didactique. Débats autour de concepts fédérateurs* (pp. 19-35) Bruxelles, De Boeck.
- Calmettes, B. (2009). Démarche d'investigation en physique. Des textes officiels aux pratiques de classe. *Spirale*, 43, 139-149.
- Chambers, R. (1983). *Rural Development: Putting the last first*, Longman Harlow.
- Chen, S. (2006). Development of an Instrument to Assess Views on Nature of Science and Attitudes toward Teaching Science. *Science & Education*, 90:803– 819.

- Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble, La Pensée Sauvage (2e édition revue et augmentée, en coll. avec Marie-Alberte Joshua, 1re édition 1985).
- Chevallay, C. (1980). *Les fondements de l'optique moderne : Kepler J., Paralipomènes à Vitelion*, trad. intro. et notes. Paris : Vrin.
- Clough, M. P. (2006) Learners' responses to the demands of conceptual change: considerations for effective nature of science instruction. *Science & Education*, 15, 463–494.
- Clough, M. P. (2010). The Story Behind the Science: Bringing Science and Scientists to Life in Post-Secondary Science Education. *Science & Education*.
[\[DOI 10.1007/s11191-010-9310-7\]](https://doi.org/10.1007/s11191-010-9310-7)
- Coburn, W. W. & Loving, C. C. (2000). Defining “Science” in a Multicultural World Implication for Science Education. *Science Education* 85:50–67.
- Cohen, I. B. (1960). *Les origines de la physique moderne de Copernic à Newton*. Paris : Payot.
- Coleman, A. D. (1986). La soupe de lentilles : une médiation sur la civilisation de l'optique. *Impact : science et société*, 36 (142), 245-257.
- Collins, A. (1998). National science education standards: A political document. *Journal of Research in Science Teaching*, 35 (7), 711 - 727.
- Collins, H. & Pinch, T. (1993). *The Golem: What everyone should know about science?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Conant, J. B. (1947). *On understanding science: An historical approach*. New Haven: Yale University Press.
- Cooley, W. & Klopfer, L. (1961). The evaluation of specific educational innovations. *Journal of Research in Science Teaching*. 1(1), 73-80.
- Council of Ministers of Education, Canada (1997) *Common framework of science learning outcomes*. Toronto: CMEC Secretariat.
- Cotham, J. & Smith, E. (1981). Development and validation of the conceptions of scientific theories test. *Journal of Research in Science Teaching*, 18(5), 387–396.
- Danjon, A. & Couder, A. (1983). *Lunettes et télescopes : théories, condition d'emploi, description, réglage*. Paris : librairie scientifique et technique, Albert Blanchard.
- Davies, I. (2004). Science and citizenship education. *International Journal of Science Education*, 26 (14), 1751-1763.

- De Boer, G.E. (2000). « Scientific literacy: Another look at historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform ». *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), 582-601.
- De Boer, G. (2004). Historical perspectives on inquiry teaching in schools. In L.B. Flick & N.G. Lederman (Eds.) *Scientific Inquiry and Nature of Science*, (17-35). The Netherlands, Springer Academic Publishers.
- de Hosson, C. & Kaminsky W. (2004). Un support d'enseignement du mécanisme de la vision inspiré de l'histoire des sciences. *Didaskalia*, 28, 101-126.
- Décamp, N. & de Hosson C. (2010). Implementing Eratosthenes' Discovery in the Classroom: Educational Difficulties Needing Attention. *Science & Education*.
[DOI 10.1007/s11191-010-9286-3]
- De Landsheere, G. (1972). Une méthodologie de la construction des programmes scolaires, *Revue Française de pédagogie, recherches en éducation*, 19, 14-21.
- Delambre, J.B.J. (1821). *Histoire de l'astronomie moderne*. Tome second. Paris : Coursier, libraire pour les sciences.
- Derry, N. G. (1999). *What science is and how it works*. Princeton University Press, Princeton, N J.
- Désautels, J., & Larochelle, M. (1989). *Qu'est ce que le savoir scientifique? Points de vue d'adolescents et d'adolescentes*. Les Presses de l'Université de Laval. Québec.
- Désautels, J., Larochelle, M., Gagné, B. & Ruel, F. (1993). La formation à l'enseignement des sciences: le virage épistémologique. *Didaskalia*, 1: 49-67.
- Descartes, R. (1966). *Discours de la méthode. Suivis d'extraits de la dioptrique, des météores, de la vie de Descartes par Baillet, du monde, de l'homme et des lettres*. Paris : Garnier-Flammarion.
- De Vecchi G. & Carmona-Magnaldi N. (2007). *Faire vivre de véritables situations-problèmes*. Paris : Hachette Education.
- Develay, M. (1992). *De l'apprentissage à l'enseignement*. Paris : ESF.
- Dewey, J. (1916). *Democracy and Education*. New york. Macmillan.
- Djebbar, A., (2001). *Une histoire de la science arabe*. Entretiens avec J. Rocmorduc, Points Sciences, Paris : Seuil.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R. & Scott, P. (1996). *Young people's image of science*. Buckingham : Open University Press.

- Dupin J. J. (2006). L'enseignement de l'histoire des sciences et des techniques devrait-il avoir sa place à l'école ? *Tréma*, 26. [<http://trema.revues.org/78>].
- Durant, J. R. (1993). What is scientific literacy? In J. R. Durant & J. Gregory (Eds.), *Science and culture in Europe*, (129–137). London: Science Museum.
- Government of Canada (1991). *Prosperity through competitiveness*. Ottawa: Minister of Supply and Services Canada.
- Duschl, R. A. (1990). *Restructuring science education*. New York: Teachers College Press.
- Emiliani, C., Knight, L.B., & Handwerker, M. (1989). *Earth science*. Chicago: Harcourt Brace Jovanovich.
- Emprin, F. (2007). *Formation initiale et continue pour l'enseignement des mathématiques avec les TICE : cadre d'analyse des formations et ingénierie didactique*. Thèse de doctorat. Université Paris Diderot (Paris7).
- Ennis, R. H. (1979). "Research in Philosophy of Science Bearing on Science Education", in P.D. Asquit & H. E. Kyburg (Eds.). *current Research in Philosophy of Science*. Philosophy of Science Association, East Lansing, Michigan.
- Equipe de recherche Aster. (1985). *Procédures d'apprentissage en sciences expérimentales*. Paris. INRP, collection rapport de recherche n°3.
- Fabre, M. (1999). *Situations problèmes et savoir scolaire*. Paris, PUF.
- Feyerabend, P. (1975). *Contre la méthode – Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*. Paris. Seuil (trad.1979).
- Fish, S. (1996, May 23). Professor Sokal's bad joke. *New York Times*, p. 23.
- Fourez, G. (2002). *La construction des sciences : la logique des inventions scientifiques. Introduction à la philosophie et l'éthique des sciences*. Bruxelles. Editions DeBoeck Université (Coll. Sciences éthiques sociétés).
- Gandit, M., Triquet, E. & Guillaud, J-C. (2010). Démarches scientifiques, démarches d'investigations en sciences expérimentales et en mathématiques : représentations d'enseignants stagiaires de l'IUFM. *Actes du congrès de l'Actualité de la recherche en éducation et en formation (AREF)*, Université de Genève, septembre 2010, 1-11.
- Ghiglione, R., Beauvois, J-L., Chabrol, C. & Trognon, A. (1980). *Manuel d'analyse de contenu*. Paris : A. Colin.

- Giere, R. (1988). *Explaining Science. A Cognitive Approach*. University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Giordan, A. (1978). *Une pédagogie pour les sciences expérimentales*. Paris: Centurion.
- Glasson, G. E. & Bentley, M. L. (2000). Epistemological undercurrents in scientists' reporting of research to teachers. *Science Education*, 84 (4), 469-485.
- Griffiths, A.K. & Barman, C.R. (1995). High school students' views about nature of science: Results from three countries. *School Science and Mathematics*, 95, 248-356.
- Guedj M. (2005). Utiliser des textes historiques dans l'enseignement des sciences physiques en classe de seconde des lycées français : compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, 26, 75-95.
- Guedj, M., Laubé, S. & Savaton, P. (2007). Démarche d'investigation et EHST. Un constat et des pistes de réflexion. *Actes des troisièmes journées ReForEHST, Caen*. Second cahier, 6-10.
- Guillon, A. (1995). Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université de Cergy-Pontoise. *Didaskalia*, 7, 113-127.
- Guillon A. (1996). *Étude épistémologique et didactique de l'activité expérimentale en vue de l'enseignement et de l'apprentissage des démarches du physicien, dans le cadre des travaux pratiques de première et deuxième années d'université*. Thèse de doctorat: UFR Sciences, Paris 11.
[\[http://plates-formes.iufm.fr/ehst/IMG/pdf/Journee_ReForEHST-1juin.pdf\]](http://plates-formes.iufm.fr/ehst/IMG/pdf/Journee_ReForEHST-1juin.pdf)
- Hagège, H. (2007). La démarche scientifique : invariante et spécificités disciplinaires- une approche épistémologique. *LIRDEF – Université Montpellier II. IREM*
[\[www.irem.univ-montp2.fr/IMG/pdf/La_demarche_scientifique.pdf\]](http://www.irem.univ-montp2.fr/IMG/pdf/La_demarche_scientifique.pdf)
- Hamou, P. (1999). *La mutation du visible : essai sur la portée épistémologique des instruments d'optique au XVII^e siècle. Du Sidereus Nuncius de Galilée à la Dioptrique cartésienne*. Villeneuve-d'Ascq : P. U. Septentrion.
- Hammoud, R., Le Maréchal, J.F. & Trouche, L. (2010). Démarches d'investigation : conceptions et usages de ressources, impact du travail collectif des professeurs. In Catherine, L., Jana, T. & Rejane M- A. (Eds.) *Ressources et travail collectif dans la mise en place des démarches d'investigation dans les classe de sciences*, (66-76) Actes des journées scientifiques DIES2010, Lyon 24 et 25 novembre 2010, INRP éditions.
- Haywood, H. (1927). Fundamental laws of chemistry. *School Science Review*, 9, 92.

- Heilbron, J. L. (2002). History in science education, with cautionary tales about the agreement of measurement and theory. *Science & Education*, 11(4), 321–331.
- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*. New York: Free Press.
- High Level Group on Science Education. (2007). *Science Education now: a renewed pedagogy for the future of Europe*. Commission Européenne. Direction de la Recherche.
- Hodge, R. (2006). What Europeans really think (and know) about science and technology. *Science in School*, issue 3, Winter 2006: 71–77, Retrieved April 17, 2007, from [[http://www.scienceinschool.org/2006/issue3/eurobarometer/.](http://www.scienceinschool.org/2006/issue3/eurobarometer/)]
- Hodson, D. (1988). Toward a philosophically more valid science curriculum. *Sci. Educ*, 72, 19–40.
- Hodson, D. (1991). The role of philosophy in science teaching, in M. R Matthews (ed.) *History, Philosophy, and Science teaching: Selected Reading*. New York: Teachers College Press.
- Hodson, D. (1993). In search of a rationale for multicultural science education. *Science Education*, 77, 685–711.
- Hodson, D. (2003). Time for action: Science education for an alternative future. *International Journal of Science Education*, 25(6), 645-670.
- Hodson, D. (2008). *Towards Scientific Literacy: A Teachers' Guide to the History, Philosophy and Sociology of Science*, Sense Publishers, Rotterdam / Taipei.
- Holbrook, J. & Rannikmae, M. (2009). The Meaning of Scientific Literacy. *International Journal of Environmental & Science Education*, 4(3), 275-288.
- Höttecke, D. & Henke, A. & Riess F. (2010). Implementing history and philosophy in science teaching: strategies, methods, results and experiences from the European HIPST project. *Science & Education*. [[DOI 10.1007/s11191-010-9330-3](https://doi.org/10.1007/s11191-010-9330-3)]
- Höttecke, D. & Silva C. C. (2010). Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: an analysis of obstacles. *Science & Education*. [[DOI 10.1007/s11191-010-9285-4](https://doi.org/10.1007/s11191-010-9285-4)]
- Hulin, N. (1996). Histoire des sciences et enseignement scientifique. Quels rapports ? Un bilan XIX^e-XX^e siècles. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 90 (786), 1201-1243. [http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=5969]
- Hurd, P. (1958). Science literacy: Its meaning for American schools. *Educational Leadership*, 16(1), 13–16.

- Hurd, P. (1960). Summary, in N.B. Henry (eds.). *Rethinking Science Education the fifty-ninth year-book of the national society for the study of education*. Chicago(33-38), University of Chicago press.
- Iaccarino, M. (2003). Viewpoint, Science and culture: Western science could learn a thing or two from the way science is done in other cultures. *EMBO reports* 4(3), 220-223
- Irzik, G., & Nola, R. (2011). A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science & Education*. [DOI 10.1007/s11191-010-9293-4]
- Jenkins, E. W. (1994). Scientific literacy. In T. Husen & T. N. Postlethwaite, (Eds.), *The international encyclopedia of education* (Volume 9, 2nd ed., 5345–5350). Oxford, UK: Pergamon Press.
- Johnson-Laird, P. N., & Wason, P. C. (1972). *Psychology of reasoning*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Joshua, S. (1996), Le concept de transposition didactique n'est-il propre qu'au mathématiques ? In Raisky, C. et Caillot, M. (Eds.) *Au-delà des didactiques, le didactique. Débats autour de concepts fédérateurs* (61-73), Bruxelles, De Boeck,.
- Joshua, S. (1996), Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29-53.
- Joshua, S. et Dupin, J.-J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- Joshua, S. et Dupin, J.-J. (2003). *Introduction à la didactique des mathématiques et des sciences*, PUF, Quadrige (1^{ère} édition : PUF, 1993)
- Khisfe, R. & Abd-el- Kalick, F. (2002). Influence of explicit and reflexive versus implicit inquiry oriented instruction on sixth graders' views of nature of science. *Journal of Research for Science Teaching*, 39, 551-578.
- Kimball, M. E. (1967- 68). Understanding the nature of science: A comparison of scientists and science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 5, 110-120.
- Klopfer, L. E. (1969). The teaching of science and the history of science. *Journal of Research for Science Teaching*, 6, 87-95.
- Klopfer, L. E., & Watson, F.G. (1957). Historical materials and high school science teaching. *The Science Teacher*, 24(6), 264-293.
- Knorr-Cetina, K. D. (1981). *The manufacture of Knowledge: An essay on the constructivist and contextual Nature of Science*. New York. Pergamon Press.

- Korth, W. (1969). Test every senior project: Understanding the social aspects of science. *Paper presented at the 42nd Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching*.
- Khun, T. (1970). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- Kuhn, T. S. (1977). *Objectivity, value judgment, and theory choice*. In *The essential tension* (320–339). Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmers. In: I.Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (91–195). Cambridge. Cambridge University Press.
- Lakin, S & Wellington, J. (1994). Who will teach the «nature of science»? Teachers' views of science and their implication for science education. *International journal of Science education*, 16(2), 175-170.
- Lankshear, C., Gee, J. P., and Hull, G. (1996). *The new work order: Behind the language of the new capitalism*. Boulder, CO: Westview Press.
- Larcher, C. & Schneeberger, P. (2007). Professionnalité des enseignants en sciences expérimentales. Une mosaïque de cas et d'approches pour une profession aux multiples facettes. Paris: INRP. *Aster*, 45, 7-16.
- Larochelle, M. & Désautels, J. (1991). The epistemological turn in science education: the return of the actor. In Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.) *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies*, (155-175). Kiel, ALL: Institute for Science Education.
- Larochelle, M. & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science: itinéraire cognitifs d'étudiants*. Bruxelles : De Boeck-Wesmael s.a. – Québec : les presses de l'université de Laval.
- Latour, B. (1981). *Science in Action*. Cambridge. Harvard University Press. (Réed, 1987).
- Latour, B. & Woolger, S. (1986). *Laboratory life: The Construction of scientific Facts*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Laudan, L. (1977). *Progress and its problems*. Berkley. University of California Press.
- Laudan, L., Donovan, A., Laudan, R., Barker, P., Brown, H., Leplin, J., Thagard, P., & Wykstra, S. (1986). Scientific change: Philosophical models and historical research. *Synthese*, 69, 141- 223.
- Laugksch, R. (2000). « Scientific literacy: A conceptual overview ». *Science Education*, 84(1), 71-94.

Lazar, P. & Schwartz, D. (1997). *Eléments de probabilités et statistiques*. Paris : Flammarion.

Lawson, A. E. (1982). The nature of advanced reasoning and science instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 19, 743-760.

Layton-Jr., E. T. (1974). Technology as Knowledge. *Technology & culture*. 15(1), 31-41.

Lederman N. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: a review of the research. *Journal of Research in Science Teaching*. 29(4), 331-360.

Lederman, N. G. (1998). The State of Science Education: Subject Matter Without Context, *The Electronic Journal of Science Education*, 3(2).

[<http://wolfweb.unr.edu/homepage/jcannon/ejse/lederman.html>]

Lederman, N. G. (1999). Teachers' Understanding of the Nature of Science and Classroom Practice: Factors That Facilitate or Impede the Relationship. *Journal of Research in Science Teaching*, 36 (8), 916-929.

Lederman, N. G. (2004). Syntax of nature of science within inquiry and science instruction. In L. B. Flick & N. G. Lederman (Eds.), *scientific inquiry and nature of science* (pp. ix–xviii). Dordrecht: Kluwer.

Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present, and future. In S. K. Abell & N. G. Lederman (dir), *Handbook of research in science education*, (831-879). New Jersey: Lawrence Erlbaum associates.

Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L. & Schwartz, R. S. (2002). Views of Nature of Science Questionnaire: Toward Valid and Meaningful Assessment of Learners' Conceptions of Nature of Science. *Journal of research in Science Teaching*. 39(6), 497–521.

Lederman, N. G., & O'Malley, M. (1990). Students' perceptions of tentativeness in science: Development, use, and sources of change. *Science Education*, 74, 225–239.

Lederman, N. G., Wade, P. D., & Bell, R. L. (1998). Assessing understanding of the nature of science: A historical perspective. In McComas, W. (Ed.), *The nature of science in science education: Rationales and strategies* (331–350). The Netherlands: Kluwer Academic.

Lederman, N. G., & Zeidler, D. L. (1987). Science teachers' conceptions of the nature of science: Do they really influence teaching behavior? *Science Education*, 71(5), 721-734.

- Leibniz, G.W. (1686). *Discours de métaphysique*. “ Les classiques Agora”. Pocket 1993.
- Lejeune, A. (1989). *L’OTIQUE DE CLAUDE PTOLÉMÉE dans la version latine d’après l’arabe de l’émir Eugène de Sicile*. Édition critique et exégétique augmentée d’une traduction française et de compléments, (LEIDEN, New York, KØBENHAVN, KLÖN) : E.J. Brill.
- Lindberg, D.C. (1976). *Theories of vision from Al- Kindi to Kepler*. University of Chicago Press. Chicago.
- Linn, M.C., Clark, D., & Slotta, J.D. (2003). WISE design for knowledge integration. *Science Education*, 87(4), 517-538.
- Loi d’orientation de l’éducation et de l’enseignement scolaire : Loi n° : 2002 du 23 juillet 2002. Tunisie.
- Longino, H. (1997). Cognitive and non-cognitive values in science: Rethinking the dichotomy. In L. H. Nelson & J. Nelson (Eds.), *Feminism, science, and the philosophy of science*. Dordrecht: Kluwer.
- Loughran, J., Berry, A., & Mulhall, P. (2006). *Understanding and Developing Teachers' Pedagogical Content Knowledge*, Rotterdam, Sense Publishers.
- Lucrece (1994). *De la nature*, texte établi et traduit par A. Ernout, Paris, Les Belles Lettres.
- Luminet, J. P. (2007). Bruno et Galilée au regard de l’infini. *Europe*, 937, 16-28.
- Lunetta, V. N., Hofstein, A. & Clough, M.P. (2007). Learning and teaching in the school science laboratory: An analysis of research, theory, and practice. In S. K. Abell. & N. G. Lederman (Eds.) *Handbook of research on science education* (393-441) Mahwah, New Jersey, USA: LEA Publishers.
- Mackay, L.D. (1971). Development of understanding about the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 8(1), 57-66.
- Maitte, B., (1981). *La lumière*. Points Sciences. Paris : seuil.
- Martin, M. R. (1972), *Concepts of science education: A philosophical analysis*, Greenview, IL, Scott, Foresman.
- Martin, O. (2000-2001). La construction sociale des sciences. *Histoire et philosophie des sciences, hors série*, 31, 36-41.
- Martinand, J.-L. (1981). Pratiques sociales de référence et compétences techniques. A propos d’un projet d’initiation aux techniques de fabrication mécanique en classe de quatrième, in A. Giordan (coord.). *Diffusion et appropriation du savoir scientifique : enseignement et vulgarisation. Actes des Troisièmes Journées Internationales sur l’Education Scientifique*. (149-154) Paris : Université Paris 7.

- Martinand, J.L. (1983). Questions pour la recherche : la référence et le possible dans les activités scientifiques scolaires. In G. Delacôte & A. Tiberghien (Eds.), *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international* (227-249). Paris : Editions du CNRS.
- Martinand, J.-L. (1986) *Connaître et transformer la matière*. Berne, Peter Lang.
- Martinand, J.-L. (1989). Pratiques de référence, transposition didactique et savoirs professionnels en sciences et techniques. *Les sciences de l'éducation, pour l'ère nouvelle*, 2, 23-29.
- Martinand, J.L. (2001). Pratiques de référence et problématique de la référence curriculaire. In A. Terrisse (Eds.), *Didactique des disciplines. Les références au savoir* (179-24). Bruxelles : De Boeck Université.
- Martinand, J.-L. (2001). Matrices disciplinaires et matrices curriculaires : le cas de l'éducation technologique en France. In C. Carpentier (Eds.), *Contenus d'enseignement dans un monde en mutation : permanences et ruptures* (249-269). Paris : L'harmattan.
- Martinand, J.-L. (2003). La question de référence en didactique du curriculum. *Investigações em Ensino de Ciências* –8(2), 125-130.
- Martins, A.F.P. (2007). História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caninho. *Cad. Bras. Ens. Fis.*, 24(1), 112-131.
- Mathé, S. (2010). *La «démarche d'investigation» dans les collèges français: Élaboration d'un dispositif de formation et étude de l'appropriation de cette nouvelle méthode d'enseignement par les enseignants*. Thèse de doctorat. Université Paris Diderot- Paris7.
- Mathé, S., Méheut, M. & de Hosson, C. (2008). Démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 32, 41-76.
- Matthews, M. (1994). *Science teaching: The role of history and philosophy of science*. New York, NY: Routledge.
- Matthews, M. (1995). *Constructivism and New Zealand science education*. Auckland: Dunmore Press.
- Matthews M. (2003). The nature of science in science teaching. In B. J. Fraser & K.Tobin K. (Eds.) *International Handbook of science education* (pp. 981-1000). Dordrecht, Boston, Londres : Kluwer Academic Publishers.
- Mathy P. (1997). *Donner du sens aux cours de sciences. Des outils pour la formation éthique et épistémologique des enseignants*. De Boeck, Paris, Bruxelles.
- Maurines L. & Beaufils D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *RDST*, 3, 271-305.

- Maurines L., Beaufile D. & Chapuis C. (2009). Travailler l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique grâce à l'histoire des sciences. *Sixièmes journées scientifiques de l'ARDiST*. [[http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/wp-content/textes-communications/22_Maurines L](http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/wp-content/textes-communications/22_Maurines_L)].
- Mazrui, A. A. & Ade Ajayi J. F. (1998) in *Histoire Générale de l'Afrique*, VIIIA, 697-745 (Eds. Mazrui, A. & Wondji, C.) UNESCO Publishing, Paris, France.
- Mc Comas, W. F. (1998). The nature of science in science education. Rationales and strategies. 83-126. Kluwer.
- Mc Comas, W. F. (2008). Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. *Science & Education*, 17, 249–263.
- McComas, W. F.; Almazroa, H. & Clough, M. P. (1998). The nature of science in science education: An Introduction. *Science & Education*, 7(6), 511–532.
- McDonald, J. & Dominguez, L. (2005). Moving from content knowledge to engagement. *Journal of College Science Teaching*, 35(3), 18-22.
- Meichtry, Y. J. (1993). The impact of science curricula on student views about the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(5), 429–443.
- Meichtry, Y. J. (1992). Influencing Student understanding of the Nature of Science: Data from a case of curriculum development. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 389-407.
- Meirieu, P. (1988). *Apprendre... oui, mais comment ?*, Paris, PUF (2^e éd. Augmentée).
- Mendelsonh, E. Weingart P. & Whitley- R. (Eds.) (1977). *The social production of scientific Knowledge*, D. Reidel publishing Co. Boston.
- Merle H. (2002). Histoire des sciences et sphéricité de la Terre : compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, 20, 115-136.
[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/23917/DIDASKALIA_2002_20_115.pdf?sequence=1]
- Merton, R. K., « The Normative Structure of Science » (1942) in Storer N.W. (Eds.), *The Sociology of Science*, Chicago, 1973, University of Chicago Press, 267-278
- Metz, D., Klassen, S., McMillan, B., Clough, M., & Olson, J. (2007). Building a foundation for the use of historical narratives. *Science & Education*, 16(3–5), 313–334.
- Millar, R. (1996). Investigation des élèves en science : une approche fondée sur la connaissance. *Didaskalia*, 9, 9-30.

- Millar, R., & Osborne, J. (Eds.) (1998). *Beyond 2000: Science education for the future*. London: King's College.
- Miller, J. D. (1983). Scientific literacy: A conceptual and empirical review. *Daedalus*, 112(2), 29–48.
- Miller, J. D. (1989, February). Scientific literacy. Paper presented at the annual meeting of the American Association for the Advancement of Science, San Francisco, CA.
- Ministry Of Education And Training (2000) *Ontario curriculum, grades 9 to 12: Program planning and assessment*. Toronto: Queen's Printer for Ontario.
- Monk, M., & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: A model for the development of pedagogy. *Science Education*, 81 (4), 405-424.
- Morge, L.; Boilevin, J.-M. (2007). *Séquences d'investigation en physique-chimie, Collège, Lycée*. Clermont-Ferrand : CRDP d'Auvergne.
- Mulkay, M. & Gilbert, N. (1982). Accounting for error: How scientists construct Their Social World When They account For correct And Incorrect belief, *Sociology*, (16), 165-133.
- Nakashima, D. (2000) In *Proceedings of the World Conference on Science*, 442–444 (ed. Cetto, A.M.) Banson, London, UK.
- National Commission on Excellence in Education. (1983). *A nation at risk*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office
- National Research Council (1996). *National Science Education Standards*. Washington, DC: National Academy Press.
- National Research Council (2000). *Inquiry and the national science education standards: A guide for teaching and learning*. Washington, DC: National Academy Press.
- National Science Teachers Association. (1982). *Science-technology-society: Science education for the 1980s. (An NSTA position statement)*. Washington, DC: Author.
- National Science Teachers Association. (1995). *A High School Framework for National Science Education Standards*, Arlington, VA. National Science Teachers Association.
- Niaz, M. (2009). Progressive transitions in chemistry teachers' understanding of nature of science based on historical controversies. *Science & Education*, 18, 43–65
- Niaz, M. & Marza, A. (2011). *Nature of science in General Chemistry textbooks*. Dordrecht-Heidelberg London New-York. Springer.

- [http://www7.uc.cl/sw_educ/educacion/grecia/plano/html/pdfs/biblioteca/LIBROS/LibNi-azMaza.pdf]
- Nola, R., & Irzik, G. (2005). *Philosophy, science, education and culture*. Dordrecht: Springer.
- Norris, S. P., & Phillips, L. M. (2003). How literacy in its fundamental sense is central to scientific literacy. *Science Education*, 87, 224-240.
- Okasha, S. (2002). *Philosophy of science: a very short introduction*. Oxford. Oxford University Press.
- Osborne, J. (1996). Beyond Constructivism. *Science Education*, 80, 53-82
- Osborne, J. (2007). Science education for the twenty first century. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 3(3), 173-184.
- Osborne, J., Collins, S., Ratcliffe, M., Millar, R & Duschel, R. (2003). What ‘‘Ideas-about-Science’’ Should Be Taught in School Science? A Delphi Study of the Expert Community. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(7), 692–720.
- Pathy, M. (2008) Les analogies mathématiques au sens de Poincaré et leur fonction en physique. Texte basé sur un exposé aux Journées sur l’analogie, *Equipe REHSEIS, CNRS, Paris, 6-7 décembre 1994*.
- Paun, E. (2006). Transposition didactique : un processus de construction du savoir scolaire. *Carrefours de l’éducation*, 22, 3-13. [DOI : 10.3917/cdle.022.0003].
[<http://www.cairn.info/revue-carrefours-de-l-education-2006-2-page-3.htm>]
- Pella, M. O., O’Hearn, G. T., & Gale, C. G. (1966). Referents to scientific literacy. *Journal of Research in Science Teaching*, 4, 199–208.
- Pélissier, L. (2011). *Etude de pratiques d’enseignement de savoir de l’épistémologie en classe de physique de lycée général*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France.
- Pelissier, L. & Venturini, P. & Calmettes, B. (2007). (L’épistémologie souhaitable et l’épistémologie implicite dans l’enseignement de la physique. De l’étude sur l’enseignement en seconde à la démarche d’investigation au collège. *3ème Journées ReForEHST IUFM de Caen*, 31 mai et 1er juin 2007, 8-13.
- Perl, M. & Lee, E. R. (1997). The Search for Elementary Particles with Fractional Electric Charge and the Philosophy of Speculative Experiments. *American Journal of Physics*, 65, 698–706.
- Perrenoud, Ph. (1984). *La fabrication de l’excellence scolaire : du curriculum aux pratiques d’évaluation*. Genève, Droz (2e édition augmentée en 1995).

- Perrenoud, Ph. (1994 a). *La formation des enseignants entre théorie et pratique*, Paris, L'Harmattan.
- Perrenoud, Ph. (1994 b). Curriculum : le réel, le formel, le caché, in Houssaye, J. (Eds.) *La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui* (61-76). Paris, ESF, 2e édition.
- Perrenoud, Ph. (1998). La transposition didactique à partir de pratiques: des savoirs aux compétences. *Revue des sciences de l'éducation*, XXIV(3), 487 - 514.
- Perrin-Glorian, M.-J. (1998). « Analyse d'un problème de fonctions en termes de milieu : structuration du milieu pour le maître et pour l'élève ». *Actes de l'université d'été de la Rochelle*. IREM de Clermont-Ferrand.
- Piaget, J., & Garcia, R. (1989). *Psychogenesis and the history of science*. New York: Columbia University Press.
- PISA 2006 : Les compétences en sciences, un atout pour réussir, vol. 1, OCDE 2007.
- Poggendorff, J.C. (1983). *Histoire de la physique*. Paris: Dunod
- Popper, K. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*, Basic Books, New Yor (German original edition of 1934).
- Popper, K. R. (1985). Conjectures et réfutations, la croissance du savoir scientifique. Paris.Payot (*Conjectures and refutations*. London: Routledge and Kegan Paul. 1963)
- Popper, K. (1972). La connaissance objective trad. de Jean-Jacques Rosat. Paris. Champs Flammarion, Aubier, (réed. 1991, 1998).
- Popper, K.R. (1997). *Toute vie est résolution de problèmes : questions autour de la connaissance de la nature*. Paris: Actes Sud.
- Postman, N. (1995). *The end of education: Redefining the value of school*. New York: Vintage.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1980). *La nouvelle Alliance-métamorphose de la science*. Paris. Gallimard. (réed. 1986)
- Qualifications and Curriculum Authority (1998). *Education for citizenship and the teaching of democracy in schools*. London: QCA.
- Raisky, C. (2001). Référence et système didactique. In A. Terrisse (Eds.), *Didactique des disciplines. Les références au savoir* (pp. 25-48). Bruxelles : De Boeck Université.
- Raisky, C. (1996) Doit-on en finir avec la transposition didactique ?, in Raisky, C. et Caillot, M. (dir.) *Au-delà des didactiques, le didactique. Débats autour de concepts fédérateurs* (pp. 37-59). Bruxelles, De Boeck.
- Rashed, R., (1993). *Géométrie et dioptrique au X^e siècle, Ibn Sahl, Al. Qūhī et Ibn Al Haytham*. Paris : les belles lettres.

- Rashed, R., (2000). *Les catoptriciens grecs*. Paris : les belles lettres.
- Reichenbach, H. (1938). *Experience and prediction*. Chicago: University of Chicago Press.
- Richoux, H. (2005). Conception de travaux pratiques par les enseignants : analyse de quelques exemples de physique en termes de transposition didactique. *Didaskalia*, 27, 11-39.
- Robardet, G. (1989). Utiliser des situations-problèmes pour enseigner les sciences physiques. *Collectif recherche-formation en didactique des sciences physiques. IFM université Joseph Fourier Grenoble*. Mai 1989, 61-70.
- Robardet, G. (1995). *Didactique des sciences physiques et formation des maîtres : contribution à l'analyse d'un objet naissant*. Thèse : Université J. Fourier–Grenoble 1.
- Robardet, G., & Guillaud J.-C. (1997). *Eléments de didactique des sciences*. Paris: PUF.
- Robardet, G. & Vérin, A. (1998). L'enseignement scientifique vu par les enseignants. *Aster*. 26, 3-10
- Roberts, D. (2007). Scientific literacy/science literacy. In S. Abell & N. Lederman (dir.), *Handbook of research on science education* (pp. 729-780). Mahwah : Lawrence Erlbaum Publishers.
- Robine, F. (2009). « L'enseignement des sciences, France et Europe ». *Communication présentée aux journées d'études S-TEAM*, Grenoble. Disponible sur Internet à l'adresse : <<http://iufm.ujf-grenoble.fr/index.php/accueil/188.html?start=5>> (consulté le 26 janvier 2011).
- Robinson, J. T. (1968). *The nature of science and science teaching*. Belmont, CA, Wadsworth Publishing Company.
- Roletto, E. (1998). La science et les connaissances scientifiques : points de vue des futurs enseignants. *Aster*, 2, 11-30.
- Ronchi, V. (1996). *Histoire de la lumière*. Paris : Jacques Gabay.
- Rosmorduc, J. (1987). *Histoire de la physique (tome1): la formation de la physique classique, technique et documentation*. Paris: Lavoisier.
- Roux, S. (2007). La fonction des expériences. *Cours d'épistémologie des sciences physiques*. Université de Grenoble II.
- Rowe, M. B. (1974). A humanistic intent: The program of preservice elementary education at the University of Florida. *Science Education*, 58, 369-376.
- Royal Society. (1985). *The Public Understanding of Science*. London: Royal Society.
- Rubba, P.A. (1976). The development, field testing and validation of instrument an instrument to assess secondary school students' understanding of the nature of scientific knowledge. *Dissertation Abstracts International*, 38, 5387A (University Microfilms n° 78.00, 998).

- Rubba, P. A., & Anderson, H. O. (1978). Development of an instrument to assess secondary school students' understanding of the nature of scientific knowledge. *Science Education*, 62(4), 449–458.
- Rudge, D. W., Howe E.M. (2009). An explicit and reflective approach to the use of history to promote understanding of the nature of science. . *Science & Education* 18, 561–580.
- Ruse, M. (1988). *But Is It Science? The Philosophical Question In the Creation/Evolution Controversy*. Prometheus, Albany, NY.
- Russell, T. L. (1981). What history of science, how much, and why? *Science Education*, 65(1), 51-64.
- Rutherford, J. F. (1964). The role of inquiry in science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 2(2), 80-84.
- Rutherford F. J. (2001). Fostering the History of Science in American Science Education. *Science & Education* 10, 569–580.
- Rutherford, F. J., Holton, G., & Watson, F. G. (1970). *The project physics course*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Ryan, A.G. & Aikenhead, G.S. (1992). Students' preconceptions about the epistemology of science. *Science Education*, 76, 559-580.
- Sanner, M. (1983). *Du concept au fantasme*, Paris, PUF.
- Schneeberger, P. & Rodriguez, R. (1999). Des lycéens face à une investigation à caractère expérimental en première S. *Aster*, 28, 79-106.
- Schnittka, C. G. (2006). The Use of Stories about Science History: Increasing Interest in Science and Knowledge of the Nature of Science, *EDIS 955B*
[<http://www.uky.edu/~csc222/litreview.doc>]
- Schwab, J. J. (1964). “The teaching of science as inquiry”, in J. J. Schwab & p. F. Brandwein, *The teaching of science* (pp. 31-102). Cambridge, MA Harvard University Press.
- Scottish Consultative Council on the Curriculum (1996) *Science education in Scottish schools: Looking to the future*. Broughty Ferry: SCCC.
- Searle, J. R. (1995). *The Construction of Social Reality*, Allen Lane. London & the Free Press, New York, NY.
- Seker, H., & Welsh, L. C. (2006). The use of history of mechanics in teaching motion and force units. *Science & Education*, 15, 55-89.
- Shamos, M. H. (1995). *The myth of scientific literacy*. New Brunswick: Rutgers University Press.

- Shapin, S. (1982). History of Science and its Sociological Reconstruction. *History of Science*, 20, 57-211.
- Shen, B. S. P. (1975a). Scientific literacy and the public understanding of science. In S. B. Day (Eds.), *Communication of scientific information* (44–52). Basel: Karger.
- Shinn, R. & Ragouet, P. (2005). *Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*. Paris. Raisons d'agir éditions.
- Shortland, M. (1988). Advocating science: Literacy and public understanding. *Impact of Science on Society*, 38(4), 305–316.
- Simon, G. (1988). *Le regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'antiquité*. Paris : Seuil.
- Simon, G. (1996). *Sciences et savoirs aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Villeneuve-d'Ascq : P. U. Septentrion.
- Simon, G. (2003). *Archéologie de la vision. L'optique, le corps, la peinture*. Paris : Seuil.
- Soler, L. (2000). *Introduction à l'épistémologie*. Ellipses. Paris.
- Showalter, V. M. (1974). What is united science education? Part 5. Program objectives and scientific literacy. *Prism II*, 2, 3 - 4.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
- Snow, C. P. (1962). *The two cultures and the scientific revolution*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Solbes J. & Traver M. (2003) Against a Negative Image of Science: History of Science and the Teaching of Physics and Chemistry. *Science & Education* 12, 703–717.
- Solomon, J. (1998). « The science curricula of Europe and the notion of scientific culture ». In D. Roberts & L. Ostman (dir.), *Problems of meaning in science curriculum*(pp. 166-177). New York. Teachers College Press.
- Songer, N. & Linns M. (1991). How do students' views of science influence knowledge integration? *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 761-784.
- Sörensen, K. H. (1994). *The car and its environments*. Bruxelles, European commission, social sciences.
- Sörensen, K. H. & Levold, N. (1992). Tacit networks, heterogeneous Engineers, and Embodied technology. *Science, Technology & Human Values*. Sage, London, 17(1), 13-36.

- Schwartz, R & Lederman, N. (2002). 'It's the nature of the beast': the influences of knowledge and intentions on learning and the nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39, 205–235.
- Tao, P. K. (2003). Eliciting and developing junior secondary students' understanding of the nature of science through a peer collaboration instruction in science stories. *Int J Science & Education* 25(2), 147– 171.
- Tavignot, P. (1991). *L'analyse du processus de transposition didactique : exemple de la symétrie orthogonale au collège*. Thèse de doctorat non publiée. Université de Paris 5, France.
- Thomas, G., & Durant, J. (1987). Why should we promote the public understanding of science? In M. Shortland (Eds.), *scientific literacy papers* (1–14). Oxford, UK: Department for External Studies, University of Oxford.
- Tobin, K. (1993). *The Practice of Constructivism in science and Mathematics in Science Education*. American Association for the Advancement of Science. Washington, DC.
- Tobin, K. & Tippins, D. (1993). Constructivism as a referent for teaching and learning. In K. Tobin (Eds.), *The practice of constructivism in science education* (3–21). Washington: AAAS Press.
- UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation. (1993). *Final Report: International forum on scientific and technological literacy for all*. Paris: UNESCO.
- Van Fraassen, B. (1980). *The scientific image*. Oxford: Clarendon Press.
- Venturini, P., (2007). *L'envie d'apprendre les sciences. Motivation, Attitudes, Rapport aux savoirs scientifiques*. Paris. Editions Fabert.
- Venturini, P. & Albe, V. (2002). Rapport à la physique d'étudiants issu d'un DEUG Sciences de la matière in A. Terrisse (Eds.) *didactique des disciplines scientifiques et technologiques, Concepts et méthodes*, les dossiers des sciences de l'éducation, 8, 11-22, PUM
- Verret, M. (1975). *Le temps des études*, Paris, Librairie Honoré Champion.
- Von Glasersfeld, E. (1989). Cognition, construction of knowledge and teaching. *Synthese*, 80, 121–140.
- Von Glaserfeld, E. (1995). *Radical constructivism: A way of knowing and learning*. London: Falmer.
- Walberg, H. J. (1983). Scientific literacy and economic productivity in international perspective. *Daedalus*, 112(2), 1–28.

- Wandersee, J. H. (1992). The historicity of cognition: Implications for science education research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 423- 434.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J, & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. L. Gabel (Eds.), *Handbook of research on science teaching and learning* (179-204). New York. Macmillan.
- Wang, H. A. & Marsh, D. D. (2002). Science instruction with a humanistic twist: Teachers' perception and Practice in using the history of science in their classrooms. *Science & Education*, 11, 169-189.
- Weil-Barais & Dumas-Carré (1998). Les interactions didactiques : tutelle et/ou médiation. In A. Dumas Carré & A. Weil-Barais (Eds.) *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique* (pp. 1-15). Berne : Peter Lang.
- Wilson, L. (1954). A study of opinions related to the nature of science and its purpose in society. *Science Education*, 38 (2), 159- 164.
- Zeidler, D. L. & Lederman, N.G . (1989). The effect of teachers' language on students' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 26, 9, pp. 771- 783.
- Zeidler, D. L., Walker,K.A., Ackett,W.A. & Simmons, M.I. (2002). Tangled up in views; beliefs in nature of science and responses of socioscientific dilemmas. *Science education*, 86(3), 343-367.
- Ziman, J. (2000). *Real science: What it is and what it means*. Cambridge: Cambridge University Press.

Annexes

1. Les textes historiques

2. Les questionnaires

3. Les tests de chi 2

1. Les textes historiques

1.1. Ptolémée (v. 100-v. 170)



Ptolémée d'après une gravure allemande du XVI^e siècle

fr.wikipedia.org/wiki/Claude_Ptolémée

Claude Ptolémée, astronome grec d'Alexandrie, publia aux environ de l'an 140 une compilation²⁸ de toutes les connaissances astronomiques des Anciens sous le nom d'*Almageste*. Dans ce livre, il est aussi question d'optique. Après avoir abordé la réflexion par les miroirs, voici comment il présente le phénomène de réfraction et son étude :

Quant au phénomène, nous pouvons le saisir sur le vif par la pièce de monnaie placée dans le récipient appelé « baptistir »²⁹. L'œil est placé à un endroit tel que le rayon visuel³⁰ qui affleure le bord du récipient aboutit plus haut que la pièce de monnaie. Toutes conditions égales, on versera doucement de l'eau dans le récipient jusqu'à ce que le rayon visuel qui affleure le bord soit brisé vers l'intérieur et tombe sur la pièce de monnaie. Le résultat est que les objets qui au départ n'étaient pas vus, apparaissent alors sur une droite tirée de l'œil à un point plus élevé que la position véritable. On croit non pas que le rayon visuel est réfracté, mais que ceux-ci nagent et s'élèvent jusqu'au rayon visuel. C'est pourquoi ils apparaîtront alors sur le prolongement du rayon visuel [incident] et d'autre part sur la normale menée de [l'objet] à la surface de l'eau. [...]

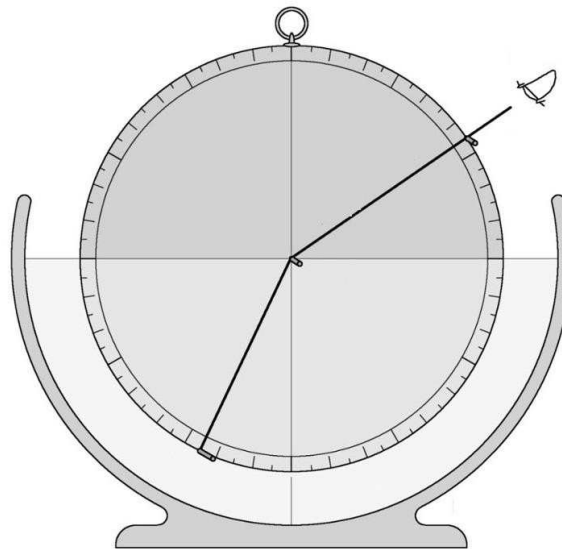
²⁸ Compiler: mettre ensemble (des extraits, des documents) pour former un recueil

²⁹ Récipient avec un fond hémisphérique

³⁰ Pour Ptolémée, la lumière part de l'œil suivant des lignes droites appelées rayons visuels

Le rayon visuel se propage en ligne droite et les brisures des rayons sont dues seulement au choc sur les surfaces de séparation de milieux de compositions différentes ; il n'y a pas dans ce cas de réflexion à angles égaux, mais ces angles présentent une certaine relation quantitative par rapport à la normale au point d'incidence. Nous devons maintenant mesurer les différences concrètes des angles d'incidence et de réfraction dont cette relation est la loi générale. (Lejeune, 1989, p. 225, du livre V de l'optique de Ptolémée)

Ptolémée réalise un dispositif expérimental qui lui permet de repérer la direction du rayon réfracté pour un angle d'incidence et un milieu donné, et ainsi mener une étude systématique de la réfraction. Dans le cas de la réfraction à l'interface air/eau, Ptolémée utilise un disque circulaire divisé en 4 quadrants gradués en degrés plongé dans l'eau de telle façon que la surface de l'eau coïncide avec le diamètre horizontal. Pour définir la direction du *rayon visuel incident*, il place un point de mire sur le bord du disque et un au centre et vise les deux points de mire de telle façon qu'ils lui paraissent alignés. Pour définir la direction du rayon réfracté, il place un petit bâtonnet coloré sur l'arc du quadrant opposé situé dans l'eau, et le déplace, jusqu'à ce que ce dernier soit masqué par les deux points de mire.

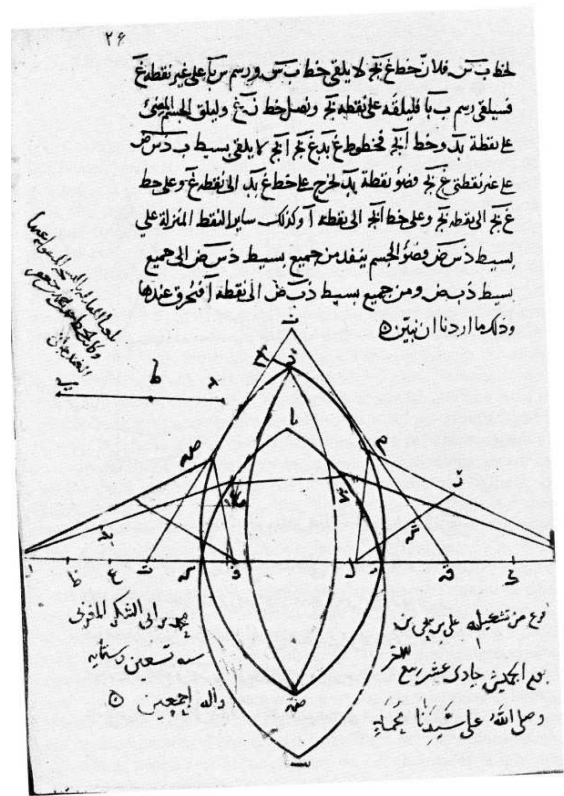
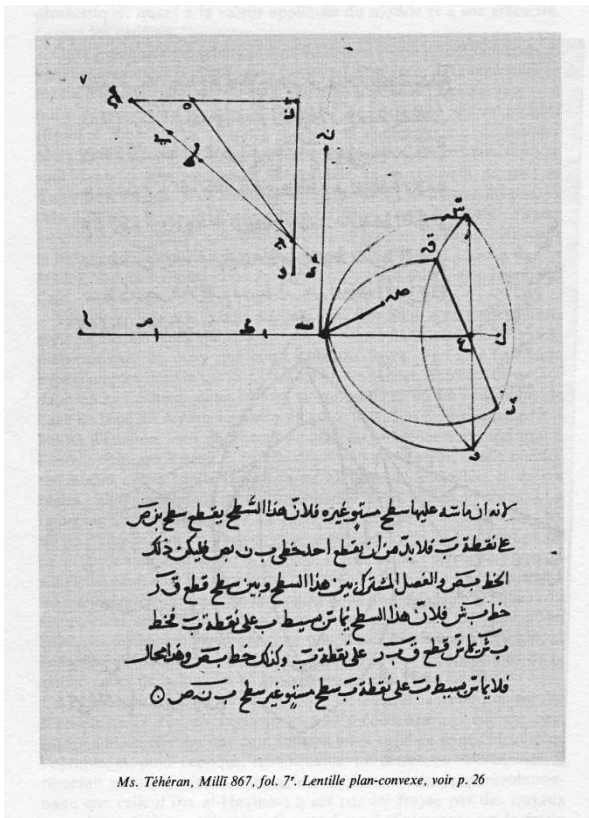


Schématisme du dispositif de Ptolémée

extrait de <http://brunelleschi.imss.fi.it/vitrum/fvtr.asp?c=8250>

A partir des mesures des angles d'incidences i et de réfraction r , Ptolémée dégage plusieurs lois faisant intervenir des inégalités. Parmi elles, écrites en langage moderne, on a : $i'/i > r'/r$ et $i'/r' > i/r$ et $i' - i/i > r' - r/r$.

1.2. Abû Sa'd AlâIbn Sahl (? 940-1000?)

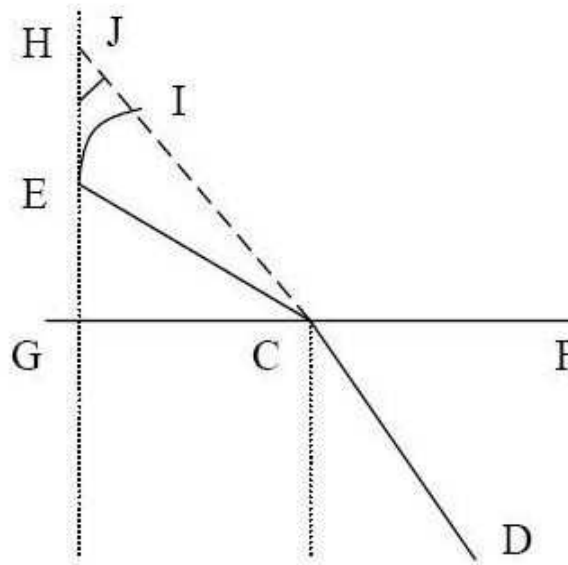


Rashed (1993, pp. XLII, XLIII)

Ibn Sahl, mathématicien ayant vécu à la cour de Bagdad, s'est intéressé à l'optique. Il a écrit un traité vers 984 sur les miroirs et les lentilles : *les instruments ardents*. On cherchait depuis l'antiquité à réaliser des miroirs « ardents » car ils pouvaient servir d'armes en brûlant ce sur quoi ils concentraient la lumière. Ibn Sahl n'échappe pas à cette tradition, mais soulève une nouvelle interrogation, celle de l'embrasement par réfraction à travers ce qu'il appelle- *Âla*, c'est à dire un morceau de matière transparente.

Après avoir cherché mathématiquement comment devait être la forme de la surface d'un miroir ardent, il réalise le même travail dans le cas d'une lentille. Cela l'amène à étudier comment la lumière est réfractée au point C de l'interface cristal-air.

A la base de toutes les constructions d'Ibn Sahl se trouve le schéma suivant :



Rashed (1993, fig. 11 p. 24)

Ibn Sahl considère ici que la lumière se propage dans un cristal suivant le chemin DC dont elle rencontre la surface en C. La lumière se réfracte alors dans l'air, dans le plan de la figure, suivant CE. Il trace la perpendiculaire GE à la surface du dioptr. Cette perpendiculaire coupe le prolongement DC du rayon qui ne serait pas réfracté en H.

Ibn Sahl considère le rapport CH/CE qu'il dit être constant³¹. Muni de ce rapport et de la loi du retour inverse de la lumière, il montre que l'hyperbole est une courbe anaclastique³².

Ibn Sahl explique comment tracer « mécaniquement » cette courbe et fabrique un gabarit de la lentille. Il en taille une et vérifie expérimentalement que la forme trouvée par le calcul mathématique permet de focaliser la lumière par réfraction.

³¹ Si comme en langage moderne, l'on nomme i l'angle d'incidence compté par rapport à la normale au dioptr en C et r l'angle de réfraction avec la normale, le rapport CE/CH est égal au rapport $\sin r/\sin i$

³² L'**anaclastique** est une surface qui permet de faire converger les rayons d'un faisceau parallèle en un seul point.

1.3. Al- Hasan abū Ali ben al-Hasan ben al- Haytham (965 - 1039- 40 ?)



Hevelius, selenographia, 1647

Frontispice : « Alhazen ratione, Galilaeus sensu »

Paris, Bibl. de la Sorbonne

Hamou (1999, p. 161)

Ibn al Haytham, savant arabe connu en latin sous le nom d'Alhazen et établi au Caire, s'est intéressé à la vision des objets, que ce soit en vision directe ou par réflexion, ou réfraction. Il conçoit les images réfléchies et réfractées comme une altération de la vision directe. Il avance l'idée que la lumière possède une existence propre indépendante de la vision et que la vision d'un objet n'est possible que si l'œil reçoit de la lumière émise par l'objet. Il étudie la

réfraction de la lumière à différentes interfaces planes (air-eau, air-verre) grâce au dispositif de Ptolémée qu'il a amélioré. Il énonce les propriétés suivantes pour la réfraction:

Le verre, le cristal, l'eau et leurs homologues, sont plus denses que l'air. Si le rayon du soleil se propage dans l'air et aboutit à un corps en verre, en cristal, en eau, ou en un de leurs homologues, sans être perpendiculaire à sa surface, il se réfracte et ne se propage pas sur son prolongement, et sa réfraction se fera dans la direction de la perpendiculaire à la surface de ce corps; il pénètre ensuite dans le deuxième corps, qui est le verre ou son homologue, sur le prolongement de la droite suivant laquelle il s'est réfracté; s'il aboutit à l'autre bout de ce corps, et s'il y a de l'air derrière celui-ci, alors il se réfracte également, et sa réfraction se fera dans la direction opposée à la normale à la surface de l'air qui entoure ce corps. Si le rayon se réfracte à partir de l'air dans le verre, l'angle de déviation sera inférieur à la moitié de l'angle entouré par le rayon et la perpendiculaire³³, et supérieur à son quart. Mais ceci a été montré par Ptolémée dans le cinquième livre de son ouvrage de l'optique. A mesure que l'angle entouré par le rayon et la normale croît, l'angle de déviation croît, et le rapport de l'angle de déviation à l'angle entouré par le rayon et la normale avant la réfraction sera plus grand. Et si les angles des rayons et de la normale sont égaux, alors les angles de déviation sont égaux. (Rashed, 1993, pp.113, 114)

Il détermine géométriquement la position de l'image donnée par une lentille sphérique et du point d'embraselement donné par une sphère ardente et vérifie expérimentalement ses résultats

Tout rayon parmi les rayons du soleil, s'il parvient en un point, y produit une chaleur; si donc de nombreux rayons se réfractent vers un seul point; il parvient en ce point beaucoup de chaleur. Et si la chaleur augmente en un point quelconque et se multiplie, il s'y produit un embraselement, en raison de l'excès de chaleur. (Rashed, 1993, pp.113-114)

³³ Actuellement l'angle d'incidence

1.4. Giambattista Della Porta (1535 – 1615)



Page de garde d'un exemplaire en anglais datant de 1658 de la Magia Naturalis avec un portrait de l'auteur.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Giambattista_della_Porta

Della Porta est né vers 1535. Sa famille, noble et fortunée, s'était fixée à Naples. Il y mourut le 4 février 1615. Il travailla à Murano près de Venise où se trouvaient déjà de célèbres cristalleries. Il publia en 1558 son premier ouvrage, la *Magia Naturalis*.

Della Porta est un propagandiste de la « magie naturelle », il se passionne pour tout ce qui a un caractère secret, caché ou mystérieux. Il s'intéresse à toutes les techniques de son temps: l'optique, la météorologie. Son optique s'apparente à une optique d'agrément dans la mesure où son but principal est de distraire, d'amuser, d'étonner. Certains des objets et des instruments que Della Porta manipule utilisent des phénomènes optiques dont les effets divers sont liés aux lentilles. Voici ce qu'il dit des lentilles :

« Maintenant je rapporterai une chose que j'ai toujours tenue secrète et que j'ai voulu taire. Si tu appliquais une lentille de verre à l'ouverture d'une chambre obscure³⁴, tu verrais toutes les choses plus claires, les visages des gens qui marchent, les couleurs, les vêtements, les actes et toutes les choses et si tu les observais attentivement, tu en aurais tellement de plaisir que celui qui les a vus n'en a jamais assez de les revoir [...] »

Les lentilles concaves font voir très clairement les choses lointaines, les lentilles convexes les choses voisines; donc on peut en user pour la commodité de la vision. Avec les lentilles concaves, tu vois les choses lointaines petites mais claires; avec les lentilles convexes les choses voisines plus grandes mais peu nette; si tu sais assembler avec justesse les unes et les autres, tu verras, agrandies et claires, les choses proches et lointaines [...].

J'ai rendu par là de grands services à des amis dont la vue était mauvaise, et je les ai mis en état de voir très nettement ». (Ronchi, 1996, pp. 58, 63, 64)

³⁴ Une chambre obscure est une boîte percée d'un petit trou et munie d'un écran translucide qui permet de voir une image renversée d'un objet placé devant le trou.

1.5. Galileo Galilei (1564-1642)



La statue de Galilée sur le piazzale des offices de Florence

http://www.tripadvisor.fr/LocationPhotoDirectLink-g187895-d191153-i41979759-Uffizi_Gallery-Florence_Tuscany.html

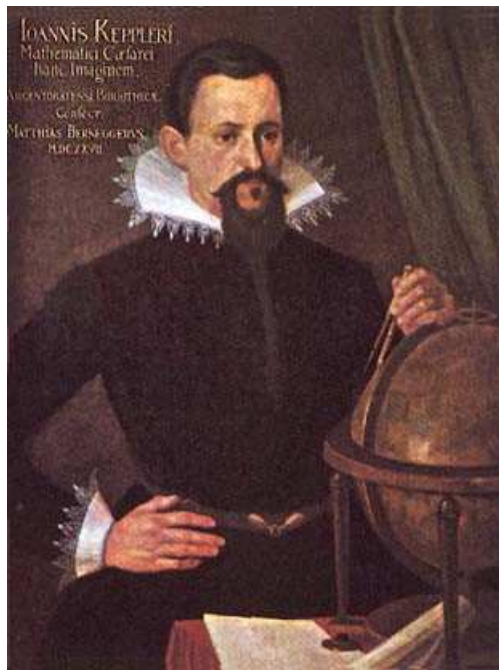
Galileo Galilei, astronome et physicien de Florence, entendit parler d'une invention étonnante venant de Hollande en 1609, celle de la lunette astronomique. En regardant à travers deux lentilles de verres, placées à une certaine distance l'une de l'autre, il était possible d'obtenir une image très agrandie d'un objet lointain. Comme il pensait que la lunette était le meilleur moyen pour observer le ciel afin de justifier la théorie héliocentrique de Copernic, il chercha à s'en fabriquer une. Celle qu'il a réalisée est connue depuis sous le nom de lunette de Galilée. Voici comment il décrit son travail :

« Quelle est ma part dans la découverte de cet instrument, et si je pouvais raisonnablement l'appeler mon enfant, je l'ai depuis longtemps raconté dans mon Sidereus Nuncius. J'y disais comment à Venise, où je me trouvais alors, me parvint la nouvelle qu'un Hollandais avait présenté au comte Maurizio une lunette qui faisait voir les choses éloignées aussi parfaitement que si elles étaient très proches. [...] Avec ce simple renseignement, je retournai à Padoue, où je demeurais alors, et je me mis à réfléchir à ce problème. Voici quel fut mon raisonnement. Cet instrument comporte un seul verre ou plusieurs. Ce ne peut être un seul verre car sa forme est soit convexe, c'est-à-dire plus épaisse au milieu qu'aux bords, soit

concave, c'est - à - dire plus mince au milieu, soit compris entre deux surfaces parallèles. Or cette dernière n'altère en rien les objets visibles en les agrandissant ou en les diminuant ; la forme concave les diminue; la convexe les agrandit bien, mais les présente très indistincts et troubles; donc un seul verre ne suffit pas pour que l'effet se produise. Passant alors à deux et sachant que le verre à faces parallèles ne change rien, comme je l'ai dit, j'en conclus que le phénomène ne pouvait résulter de l'emballage de ce verre avec l'un des deux autres. Cela m'oblige à expérimenter ce que donnerait l'assemblage des deux autres, c'est-à-dire le convexe et le concave.

Je garnis les extrémités d'un tuyau de deux verres, l'un convexe, l'autre concave; et le tournant vers les objets, je remarquai, qu'il les augmentait trois fois en diamètre. Je fis peu après un autre télescope, qui augmentait environ huit fois; en fin n'épargnant ni peine ni dépense, j'en procurai un qui grossissait environ trente fois en diamètre et ce fut par le moyen de ce dernier que je découvris les satellites de Jupiter, les taches solaires, les taches de Venus. Telles furent les étapes de ma découvert. (Hamou, 1999, pp. 95, 96, 97)

1.6. Johannes Kepler (1571, 1630)



*This painting showing the royal mathematician
Johannes Kepler
is devoted to the library of Strasbourg. [By] Matthias
Bernegger, 1627*

<http://www.w-volk.de/museum/museum03.htm>

Kepler, astronome allemand, a cherché à conforter l'hypothèse héliocentrique de Copernic et a énoncé plusieurs lois sur les mouvements des planètes. Il est aussi connu pour son travail en optique.

Ses premiers travaux visent à comprendre et améliorer les méthodes d'observation astronomique. En 1604, il publie les *Paralipomenes ad Vitellio* – Compléments à Vitellion - ou partie optique de l'astronomie- qui porte sur la réfraction et la vision. Il développe l'idée de Della Porta que l'œil est un système optique comparable à une chambre noire munie d'une lentille. A partir des tables donnant les angles d'incidence et de réfraction connues à l'époque³⁵

³⁵ Ptolémée a établi les premiers tableaux de mesure connus pour la réfraction; ceux-ci ont servi de base aux travaux d'optique réalisés par Ibn Al Haytham aux environs de l'an mil, Vitellion vers 1270, et Kepler.

et en réalisant des expériences, Kepler établit une loi de réfraction pour les petits angles qui en langage moderne s'écrit : $i/r = \text{constante}$. Ainsi le lieu de convergence des rayons parallèles à l'axe de la sphère. Il propose les premières lois géométriques pour les lentilles convexes et concaves.

Suite à l'invention de la lunette de Galilée, Kepler publie un deuxième ouvrage en 1611, *La Dioptrice*. Il se sert des lois qu'il a établies sur les lentilles pour expliquer le fonctionnement de cette lunette. Il en invente une autre qui résulte de la combinaison de deux lentilles convexes et produit une image inversée. Elle porte depuis son nom³⁶.

³⁶La lunette de Galilée est constituée d'une lentille concave et d'une lentille convexe. La lunette de Kepler comporte deux lentilles convexes.

1.7. Willebrord Snell van Royen ou Snellius (1580-1626)



Portrait de Snellius (Wikipedia)

http://en.wikipedia.org/wiki/willebrord_snellius

Snellius, hollandais, étudie le droit puis les mathématiques et l'astronomie. Il est connu pour avoir établi en 1621 une loi pour la réfraction mais il meurt sans avoir publié son travail. On sait de manière certaine qu'il cherchait à expliquer la vision d'un objet placé au fond d'un vase rempli d'eau. En revanche, la façon dont Snellius a établi cette loi reste obscure. Pour certains, il aurait fait des expériences et des mesures. Pour d'autres, il l'aurait trouvé à partir d'un raisonnement disant que la lumière prend le trajet le plus aisé.

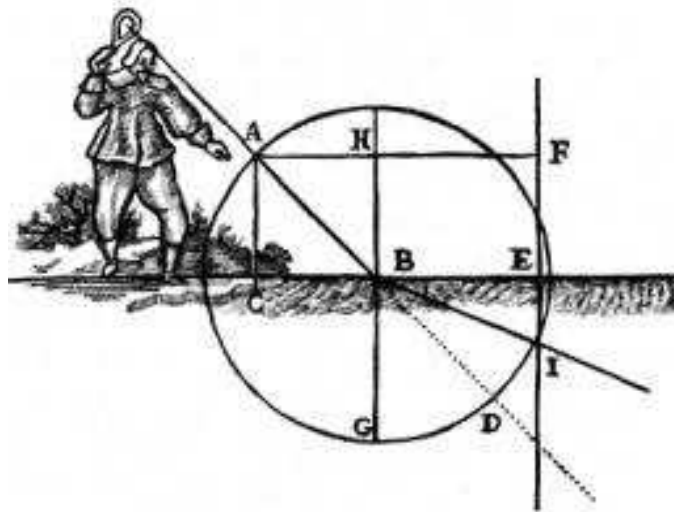
Quoi qu'il en soit, Snellius énonce une loi³⁷ qui, en langage moderne, dit que : le rapport du sinus de l'angle de réfraction au sinus de l'angle d'incidence est égal au rapport de la valeur de la vitesse de la lumière dans le milieu considéré à la valeur initiale de la vitesse de la lumière : $\sinus i_2 / \sinus i_1 = v_2 / v_1$ ³⁸

Snellius indique aussi que si un rayon de lumière passe de l'air dans l'eau ce rapport est de 4/3 et si ce rayon passe de l'air dans le verre ce rapport deviendrait 3/2.

³⁷ Snellius énonce la loi sous la forme suivante : *La route CF du rayon se change en CE ; prenons CD pour rayon, CF sera la sécante³⁷ de FCD, ou la cosécante³⁷ de FCB, CE sera la sécante de ECD ou la cosécante de l'angle rompu³⁷ ECB. $CE/CF = \text{coséc ECB} / \text{cosécFCB}$*

³⁸ Ce rapport est égal à l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1, c'est-à-dire dans le cas de l'expérience étudiée par Snell, à l'indice de l'eau par rapport à l'air.

1.8. René Descartes (1596-1650)



Le modèle balistique de Descartes

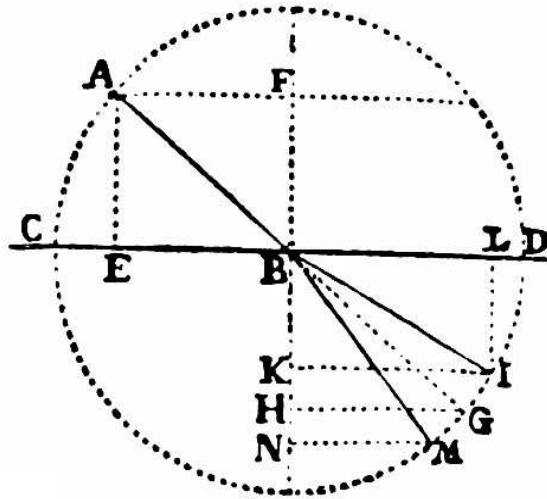
Extrait du discours de la méthode (1966, p.112)

Descartes, mathématicien, physicien et philosophe français, ayant vécu de longues années au Pays-Bas, publie la *Dioptrique*³⁹ en 1637. Contestant la méthode suivie par les artisans et Galilée pour la fabrication de la lunette, il montre que celle-ci aurait pu être inventée en appliquant « la méthode ». Pour lui, l'expérience sensible, ne peut pas être une source de connaissances fiables. La « méthode » nécessite de trouver la forme des verres à tailler et leur position relative afin d'obtenir une image nette de l'objet et beaucoup plus grande, et ce, grâce à un raisonnement mathématique fondé sur les principales propriétés de la lumière et de l'anatomie de l'œil.

Descartes propose différentes analogies pour expliquer les propriétés fondamentales de la lumière : propagation, réflexion et réfraction. Dans le cas de la réfraction, il reprend l'analogie mécanique d'Ibn Al Haytham : *l'action de la lumière, suit en ceci les mêmes lois que le mouvement de la balle*. Il décompose la vitesse de la balle en composantes normale et parallèle à la surface réfringente, et conserve la composante parallèle en faisant varier l'autre en rapport avec la résistance du milieu. Le fait que la lumière passant de l'air à l'eau se

³⁹ *Dioptrique* : science qui traite essentiellement des rayons réfractés dans les milieux denses transparents, les milieux naturels de l'œil humain comme les verres artificiels.

rapproche de la normale à la surface de séparation, l'amène à la conclusion que la composante normale de la vitesse est augmentée, et donc que la lumière va plus vite dans l'eau que dans l'air. Il avance que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est constant et caractéristique du milieu.



— 10. — Schéma de la théorie de la réfraction d'après Descartes (*De Lumine*, p. 175).

1.9. Pierre de Fermat (1601?-1665)



Buste de Fermat dans la salle des Illustres du Capitole de Toulouse

http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_de_Fermat

Fermat, juriste et mathématicien français, énonce son *principe d'économie naturelle* ou *principe de minimum* (1657) selon lequel le chemin emprunté par la lumière est celui qui minimise son temps de parcours en admettant l'idée, exprimée auparavant par Ibn al Haytham, que la lumière conserve une vitesse constante dans un milieu homogène, mais que celle-ci est plus petite dans un milieu dense.

Il examine la proposition qui sert de fondement à la Dioptrique de Descartes et qui conduit à la loi des sinus sur la réfraction. Il conteste sa démonstration en disant qu'elle lui semble un paralogisme, c'est à dire un raisonnement faux fait de bonne foi.

[...] Premièrement, parce qu'il la fonde sur une comparaison et que la géométrie ne se pique guère de ces figures, les comparaisons y étant encore plus odieuses que dans le commerce du monde.

Secondement, parce qu'il suppose que le mouvement de la lumière, qui se fait dans l'air et dans les corps rares, est plus malaisé ou, si vous l'aimez mieux ainsi, plus lent que celui qui se fait dans l'eau et les autres corps denses; ce qui semble choquer le sens commun.

Et enfin, parce qu'il prétend que l'une des directions ou des déterminations du mouvement d'une balle subsiste toute entière après la rencontre du second milieu [...].

En utilisant un autre raisonnement fondé sur le principe d'économie et supposant que la lumière se déplace d'autant moins vite que le milieu est dense⁴⁰, il établit une loi pour la réfraction qui se trouve être à son grand étonnement semblable à celle trouvée par Descartes.

[...] je ne voyais point d'autre moyen plus assuré que de chercher les réfractions dans cet unique principe, que la nature agit toujours par les voies les plus courtes, sur le fondement duquel je lui indiquai qu'on pouvait chercher par la géométrie le point de réfraction, en le réduisant au problème ou théorème que vous savez. Mais, parce que j'en jugeai l'invention très difficile et très embarrassée, puisque ces questions des maxmis et minimis conduisent d'ordinaire à des opérations de longue haleine et qui se brouillent aisément par une infinité d'asymétries qu'on trouve sur son chemin, [...].

Je surmontai toutes les asymétries avec peine, et voilà que tout à coup, à la fin de mon opération, tout se débrouille et il me vient une équation très simple qui me donne justement la même proportion que M. Descartes.

Je crus sur l'heure avoir équivoqué, car je ne pouvais me figurer qu'on aboutît à une même conclusion par des routes tout à fait opposées, M. Descartes supposant, pour un des moyens de sa démonstration, que le mouvement de la lumière trouve plus de résistance dans l'air que dans l'eau, et moi supposant tout le contraire [...].

Je refis donc pour lors la question à diverses reprises, en changeant les positions, et je trouvai toujours la même conclusion, ce qui me confirma deux choses; l'une que l'opinion de M. Descartes sur la proportion des réfractions est très véritable; et l'autre, que sa démonstration est très fautive et pleine de paralogismes ». (Ronchi, 1996, pp. 118, 119, 120)

⁴⁰ En 1850, Foucault réalisa une mesure relative des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau grâce à l'expérience dite du « miroir tournant » et montra que la vitesse de la lumière est plus petite dans l'eau que dans l'air.

2. Les questionnaires

2.1. Les questionnaires des élèves

Questionnaire1 :

Partie 1

Q₁₁₁ : Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?

Partie 2

Nous voudrions savoir ce que vous pensez de la façon dont les physiciens travaillent. N'hésitez pas à expliciter votre position en donnant des exemples.

Q₁₂₁ : Que cherchent à faire les physiciens grâce à leurs travaux ?

Q₁₂₂ : Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas d'expérience ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q₁₂₃ : Peut-on faire des découvertes en physique si l'on ne fait pas appel aux mathématiques ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q₁₂₄ : Les physiciens doivent-ils suivre une méthode précise dans leur travail ?

Oui, quelle est cette méthode ? Pourquoi les physiciens doivent-ils suivre cette méthode ?

Non, pourquoi ?

Q₁₂₅ : Les physiciens font-ils appel à leur imagination et créativité dans leur travail ?

Oui, quand ? Comment ?

Non, pourquoi ?

Questionnaire n°2 :

Partie 1 sur les documents :

Nous voudrions savoir ce que vous pensez des documents distribués. Merci d'entourer votre réponse.

Q₂₁₁: Tous les documents sont-ils faciles à comprendre ?

Oui

Non : lesquels vous ont paru difficiles, et pourquoi ?

Q₂₁₂: Avez-vous eu des difficultés à vous mettre d'accord avec les camarades de votre groupe sur la façon de remplir le tableau ?

Non

Oui : lesquelles ?

Partie 2 sur la séquence d'enseignement :

Nous voudrions savoir ce que vous pensez de la séquence d'enseignement. Merci d'entourer votre réponse et de la développer lorsque c'est demandé.

Q₂₁₁. Qu'est-ce qui vous paraît le plus important dans ce que vous avez appris aujourd'hui et pourquoi ?

Q₂₁₂ Pensez-vous qu'il est important de faire réfléchir les élèves en cours de physique à la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées (autrefois) ?

Oui : pourquoi ?

Non : pourquoi ?

Q₂₁₃ : Souhaitez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement organisées de cette façon ?

Oui : pourquoi ?

Non : pourquoi ?

Q₂₁₄ : Cette séquence d'enseignement comportait plusieurs périodes d'activités :

- La première période s'intéressait à vos idées sur la façon dont la loi des sinus sur la réfraction de la lumière a été établie autrefois.

- La deuxième période était consacrée à la lecture des documents et à leur exploitation en petits groupes.

- La troisième période portait sur la mise en commun des informations recueillies par chaque groupe.

- La quatrième période portait sur la confrontation de vos idées avec l'ensemble des informations recueillies dans les documents.

- la cinquième période résumait les résultats obtenus à propos de l'élaboration de la loi des sinus et les généralisait à d'autres lois.

Précisez dans le tableau ci-dessous en répondant par oui ou non si le travail proposé pendant ces différentes périodes vous a intéressé, paru difficile, utile.

Selon vous, chacune de ces étapes est-elle :	Exprimer nos idées sur la façon dont la loi des sinus a été établie autrefois	Lire les documents et chercher les informations en petits groupes	Mettre en commun les informations recueillies par les différents groupes	Confronter nos idées avec les résultats de la lecture collective des documents	Résumer et généraliser les résultats obtenus
difficile					
utile					
intéressante					

En conclusion,

Q₂₁₅ : Comment avez-vous trouvé cette séquence d'enseignement ?

Et pour finir, merci de préciser votre genre. M

F

Questionnaire 3 :

Q₃₁₁. Selon vous, est-il correct d'appeler la loi de la réfraction « loi de Descartes » ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q₃₂₁. On entend souvent dire que les scientifiques cherchent à expliquer les phénomènes naturels. Selon vous, est-ce que cela concerne tous les scientifiques ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q₃₃₁. Selon vous, les scientifiques travaillent-ils tous de la même façon ?

Oui, comment ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Questionnaire3bis :

Cochez la ou les cases qui correspondent aux affirmations avec lesquelles vous êtes d'accord.

Q₃₁₂ : la loi des sinus $\sin i_1 = n \sin i_2$ doit être appelée :

3.1.2.1 : « la loi de Descartes » car Descartes a établi cette loi et l'a fait connaître ;

3.1.2.2 : « la loi de Snell » car Snell est le premier à avoir établi cette loi ;

3.1.2.3 : « la loi de Snell-Descartes » car ces deux savants ont donné la forme la plus générale de la loi de la réfraction ;

3.1.2.4 : « la loi de la réfraction » car de nombreux savants ont contribué à l'établissement de cette loi ;

3.1.2.5 : autrement Précisez comment et pourquoi.

Q₃₂₂ : La loi qui permet d'expliquer un phénomène particulier peut être établie

3.2.2.1 : uniquement en étudiant ce phénomène et en cherchant cette loi ;

3.2.2.2 : en cherchant à élaborer ou améliorer un dispositif technique mettant en jeu ce phénomène ;

3.2.2.3 : en cherchant les conséquences grâce à un raisonnement mathématique des idées auxquelles on pense que la nature obéit ;

3.2.2.4 : autrement. Précisez comment ;

Q₃₃₂ : Les démarches de travail

3.3.2.1 : Tous les scientifiques travaillent de la même façon, car Il y a des étapes pour travailler qui sont connues par tous les savants ;

3.3.2.2 : Tous les scientifiques commencent leurs recherches en faisant des expériences ;

3.3.2.3: Un scientifique commence ses recherches en faisant une expérience ou un raisonnement en fonction du problème qu'il cherche à résoudre ;

3.3.2.4 : En cherchant à résoudre le même problème, deux scientifiques aboutissent à des résultats différents car ils utilisent dans leurs travaux deux méthodes différentes.

2.2. Les questionnaires pour les professeurs en formation

Questionnaire1P

Partie 1 sur l'enseignement

Q111P : Que souhaitez-vous transmettre à vos élèves par votre enseignement ?

Q112P : Pensez-vous que l'enseignement de la physique et de la chimie doit être organisé de manière à permettre aux élèves de disposer le plus rapidement possible d'un cours clair et simple ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

Q113P : Pensez-vous que l'enseignement de la physique et de la chimie doit être organisé de manière que les élèves fassent le moins d'erreurs possible ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

Q114P :

Pensez-vous qu'il est intéressant, important, indispensable de faire réfléchir les élèves à la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées autrefois ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

Q115P : Si vous pensez que cette réflexion doit être proposée aux élèves, est-ce dans les cours de physique et chimie ?

Non, pourquoi ? Où doit-elle avoir lieu ?

Oui, pourquoi ?

Q116P : Indiquez s'il est intéressant, important, indispensable de faire faire les activités ci-dessous aux élèves en classe de physique et chimie.

Dans chaque cas, entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

- **Q1161P** : Des expériences

Intéressant, important, indispensable

Pourquoi :

- **Q1162P** : Des exercices

Intéressant, important, indispensable

Pourquoi :

- **Q_{1163P}** : Des débats pour confronter leurs idées

Intéressant, important, indispensable

Pourquoi :

- **Q_{1163P}** : Des activités documentaires (lecture et analyse de textes, recherche documentaire)

Intéressant, important, indispensable

Pourquoi :

- Autres activités

Partie 2 sur la façon dont travaillent les physiciens (on garde la même numérotation que celle des élèves, il s'agit du même questionnaire)

Q₁₁₁ : Que savez-vous de la façon dont la loi des sinus pour la réfraction de la lumière a été établie autrefois ?

Q₁₂₁ : Que cherchent à faire les physiciens grâce à leurs travaux ?

Q₁₂₂ : Est-ce que le développement des connaissances en physique nécessite de faire des expériences ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q₁₂₃ : Est-ce que le développement des connaissances en physique nécessite de faire appel aux mathématiques ?

Oui, comment? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q₁₂₄ : Les physiciens doivent-ils suivre une méthode précise dans leur travail ?

Oui, quelle est cette méthode? Pourquoi les physiciens doivent-ils suivre cette méthode ?

Non, pourquoi ?

Q₁₂₅ : Les physiciens font-ils appel à leur imagination et créativité dans leur travail ?

Oui, quand ? Comment ?

Non, pourquoi ?

Questionnaire 2P

Pour nous permettre d'améliorer la séquence d'enseignement innovante et cette séance de formation, merci de bien vouloir répondre aux questions suivantes.

Partie1 sur la séquence d'enseignement

Q_{211P} : Le choix de faire réfléchir les élèves sur la façon dont les connaissances scientifiques ont été élaborées vous semble t-il intéressant, important, indispensable ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

Q_{212P} : Le choix de faire prendre conscience aux élèves que les enjeux poursuivis par les scientifiques et les démarches suivies sont multiples vous semble t-il intéressant, important, indispensable ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

Q_{213P} : Les documents vous semblent-ils bien adaptés pour le travail à faire faire aux élèves ?

Oui, pourquoi ?

Non, pourquoi ? Quelles modifications leur apporteriez-vous ?

Q_{214P} : Les activités ci-dessous sont proposées aux élèves dans la séquence d'enseignement. Vous semblent-elles originales, intéressantes, importantes, difficiles à mettre en œuvre ?

Pour chaque cas, entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

- **Q_{2141P}** : Travail sur documents

Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre

Pourquoi :

- **Q_{2142P}** : Travail collectif

Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre

Pourquoi :

- **Q_{2143P}** : Exprimer leurs idées et formuler une question à laquelle chercher une réponse

Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre

Pourquoi :

- **Q_{2144P}** : Apporter une réponse à la question posée en confrontant leurs idées aux apportées par les textes

Activité originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre

Pourquoi :

- **Q_{2145P}** : La séquence d'enseignement propose que l'enseignant ne fasse qu'aider les élèves à avancer dans leur réflexion et élargisse les conclusions auxquelles ils sont

arrivés. Cette méthode vous semble t- elle originale, intéressante, importante, difficile à mettre en œuvre ?

Entourez le ou les mots qui vous semblent le plus adapté(s) et précisez pourquoi. Si aucun ne vous semble adapté, précisez-le et dites pourquoi.

- **Q2146P** : Pensez-vous que vos élèves seront intéressés par cette séquence d'enseignement ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

- **Q2147P** : Pensez-vous que vos élèves rencontreront des difficultés lors de cette séquence d'enseignement ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Lesquelles ?

- **Q2148P** : Pensez-vous que vous rencontrerez des difficultés pour réaliser cette séquence d'enseignement avec vos élèves ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Lesquelles ?

Si vous avez répondu oui à la question précédente, qu'est-ce qui pourrait vous aider à surmonter les difficultés que vous envisagez ?

- **Q2149P** : Souhaiteriez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement portant sur l'histoire des sciences ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Sur quels thèmes?

- **Q21410P** : Souhaiteriez-vous avoir d'autres séquences d'enseignement fondées sur la même méthode pédagogique ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ?

Partie 2 sur la séance de formation

Q221P Y a-t-il des aspects de cette séance de formation qui vous ont paru plus importants que d'autres ?

Oui, lesquels ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q222P Y a-t-il des aspects de cette séance de formation qui vous ont paru inutiles ?

Oui, lesquels ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q223P Y a-t-il des points qui vous ont manqué dans cette séance de formation ?

Oui, lesquels ? Pourquoi ?

Non, pourquoi ?

Q224P Souhaiteriez-vous participer à d'autres séances de formation de ce type ?

Oui, pourquoi ? Quels points particuliers souhaiteriez-vous voir abordés ?

Non, pourquoi ?

2.3. Les questionnaires pour le formateur et l'enseignant

2.3.1. Le formateur : Questionnaire F

Pour nous permettre d'améliorer la formation sur la séquence d'enseignement innovante, nous aimerions savoir comment vous l'avez-vous même transmise à d'autres enseignants. Nous vous demandons de bien vouloir répondre à différentes questions. Merci de détailler vos réponses.

1. Quelles sont les indications que vous avez données aux enseignants quant à la nature et l'objectif de la formation ?
2. Quelles sont les indications que vous avez données aux enseignants quant à la nature de la séquence d'enseignement, ses objectifs, ses enjeux ?
3. Quelles indications avez-vous donné aux enseignants lors de chaque étape de la séquence de formation?
4. Selon vous, la séquence d'enseignement a-t-elle intéressée les enseignants ?
5. Selon vous, les enseignants ont-ils rencontré des difficultés lors de la lecture des textes et de leur première analyse ? Si oui, lesquelles ?
6. L'activité de synthèse en petits groupes s'est-elle déroulée comme prévue ? Les enseignants ont-ils rencontré des difficultés à cette étape ? Si oui, lesquelles ?
7. L'activité de synthèse collective en classe entière s'est-elle déroulée comme prévue ? Les enseignants ont-ils rencontré des difficultés à cette étape ? Si oui, lesquelles ?
8. Avez-vous réalisé la séquence de formation telle qu'elle était prévue ? Si non, quelle modification avez-vous apporté, à quel moment et pourquoi ?
9. Avez-vous rencontré vous-même des difficultés lors de cette séquence de formation ? Si oui, lesquelles ? À quelle étape ?
10. Si vous aviez à refaire cette formation, quelles modifications apporteriez-vous ?

2.3.2. Le professeur qui a fait les séquences d'enseignement

Questionnaire1E : 1^{ère} expérimentation

Organisation et déroulement

1. Indiquez les conditions de la réalisation de la séquence :

- 1.1. Effectif total de la classe*
- 1.2. Effectif des garçons et des filles*
- 1.3. Niveau*
- 1.4. Autre particularité*

2. Indiquez la façon dont vous avez organisé le travail collectif :

- 2.1. Nombre de groupes*
- 2.2. Nombre de documents par élèves*
- 2.3. Nombre d'élèves par documents*

3. Indiquez le temps passé pour chaque période

- 3.1. Réponse individuelle au questionnaire 1*
- 3.2. Mise en commun et formulation par les élèves d'une question à laquelle répondre*
- 3.3. Lecture des documents par les élèves et première analyse*
- 3.4 Réponse individuelle au questionnaire 2 (partie 1)*
- 3.5. Mise en commun en classe entière*
- 3.6. Analyse des résultats et conclusion par les élèves*
- 3.7. Institutionnalisation et généralisation par l'enseignant*
- 3.8. Réponse individuelle au questionnaire 2 (partie 2)*
- 3.9. Réponse individuelle au questionnaire 3 (élève) en fin d'année*

4. Quelles sont les indications que vous avez données aux élèves quant à la nature de la séquence d'enseignement, ses objectifs, ses enjeux ?

5. Quelles indications avez-vous donné aux élèves lors de chaque étape de la séquence d'enseignement ?

Questionnaire2E : 2^{ème} expérimentation

1. Selon vous, la séquence d'enseignement a-t-elle intéressé vos élèves ?
2. Selon vous, vos élèves ont-ils rencontré des difficultés lors de la lecture des textes et de leur première analyse ? Si oui, lesquelles ?
3. L'activité de synthèse en petits groupes s'est-elle déroulée comme prévue ? Vos élèves ont-ils rencontré des difficultés à cette étape ? Si oui, lesquelles ?
4. L'activité de synthèse collective en classe entière s'est-elle déroulée comme prévue ? Vos élèves ont-ils rencontré des difficultés à cette étape ? Si oui, lesquelles ?
5. Avez-vous réalisé la séquence d'enseignement telle qu'elle était prévue ? Si non, quelle modification avez-vous apporté, à quel moment et pourquoi ?
6. Avez-vous rencontré vous-même des difficultés lors de cette séquence d'enseignement ? Si oui, lesquelles ? À quelle étape ?
7. Si vous aviez à refaire cette activité, quelles modifications apporteriez-vous ?

3. Les tests de chi 2

Tests de chi 2 pour la comparaison des deux expérimentations réalisées auprès des élèves

Nous récapitulons les résultats obtenus avant et après les deux expérimentations à propos du nombre d'enjeux et de méthodes dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : récapitulatif des résultats obtenus à propos des enjeux

	Avant			Après		
	1 enjeu	Plusieurs enjeux	Non réponse	1 enjeu	Plusieurs enjeux	Non réponse
Séquence 1 (N=20)	60% (12)	40% (8)	0%	80% (16)	5% (1)	15% (3)
Séquence 2 (N=25)	88% (22)	12% (3)	0%	8% (2)	80% (20)	12% (3)

Tableau 2 : récapitulatif des résultats obtenus à propos des méthodes

	Avant				Après		
	1 méthode	Plusieurs méthodes	Non réponse	Sans réponse	1 méthode	Plusieurs méthodes	Non réponse
Séquence 1 (N=20)	55% (11)	40% (8)	5% (1)	5% (1)	5% (1)	95% (19)	0%
Séquence 2 (N=25)	16% (4)	84% (21)	0%	0%	12% (3)	72% (18)	16% (4)

Pour comparer deux résultats (par exemple, ceux obtenus avant et après expérimentation pour les enjeux pour la population E1), nous avons tout d'abord réalisé le tableau associé à ces résultats puis calculé les effectifs théoriques sous l'hypothèse nulle que les différences observées dans ce tableau sont dues au hasard grâce à la relation :

$$E_{ij\text{théorique}} = \text{Total de } L_i * \text{Total de } C_j / T \text{ (où } L \text{ désigne la ligne et } C \text{ la colonne, } T = N)$$

Nous avons ensuite réalisé le test de χ^2 à partir des valeurs du tableau des effectifs observés et de celui des effectifs calculés à partir de la relation :

$$\chi^2_{\text{calculée}} = \sum \frac{(o - c)^2}{c} \text{ (où } o \text{ désigne l'effectif observé et } c \text{ l'effectif calculé)}$$

Nous avons enfin comparé la valeur du $\chi^2_{\text{calculée}}$ à celle donnée par les tables et déduit si les différences observées dans le tableau de résultats sont significatives ou non en tenant compte de la valeur du degré de liberté ν donné par $\nu = (k-1) * (r-1)$ avec k le nombre de colonnes et r

le nombre de lignes. Pour toutes les comparaisons réalisées, les tableaux sont à deux lignes et deux colonnes : $v=1$.

Pour que les tests soient valides, les effectifs calculés doivent être supérieurs à 5. Nous avons regroupé certains résultats pour que cela soit le cas. Tous les effectifs calculés (sauf 2) sont ainsi supérieurs à 5.

1. Les enjeux

1.1. Comparaison des résultats obtenus avant expérimentation

Observés	Un enjeu	Plusieurs enjeux	Total ligne
E1 (N=20)	12	8	20
E2 (N=25)	22	3	25
Total colonne	34	11	45

Calculés	Un enjeu	Plusieurs enjeux
E1 (N=20)	15.11	4.88
E2 (N=25)	18.88	6.11

La valeur du $\chi^2_{\text{calculée}} = 4.733$ est supérieure à la valeur à $\chi^2 = 3.841$ avec une probabilité de 5%. La différence est significative. La population E1 donne plus de réponse « plusieurs enjeux », cela pourrait résulter de la façon dont l'enseignant a introduit la séance avant de distribuer le questionnaire.

1.2 Comparaison des résultats obtenus après expérimentation

Observés	Un enjeu	Plusieurs enjeux	Non réponse	Total ligne
E1 (N=20)	16	1	3	20
E2 (N=25)	2	20	3	25
Total colonne	18	21	6	45

Nous avons réalisé le regroupement suivant

Observés	Un enjeu + NR	Plusieurs enjeux	Total ligne
E1 (N=20)	19	1	20
E2 (N=25)	5	20	25
Total colonne	24	21	45

Calculés	Un enjeu + NR	Plusieurs enjeux	Total ligne
E1 (N=20)	10.6	9.3	20
E2 (N=25)	11.1	11.6	25

La valeur du $\chi^2_{\text{calculée}} = 23.5$ est supérieure à la valeur à $\chi^2 = 10.827$ avec une probabilité de 0.1%. La différence est significative. L'évolution de la population E2 est positive, ce qui n'est pas le cas de la population E1.

1.3 Comparaison des résultats obtenus avant et après expérimentation

Population 1

Observés	1 enjeu+ NR	P enjeux	Total ligne
E1 (N=20) avant	12	8	20
E1 (N=20) après	19	1	20
Total colonne	31	9	40

Calculés	Un enjeu	Plusieurs enjeux
E1 (N=20) avant	15.5	4.5
E1 (N=20) après	15.5	4.5

$\chi^2_{\text{calculée}} = 7.02$ avec $\nu = 1$. La valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 6.635$ avec une probabilité de 1%. La valeur minimale pour les effectifs calculés étant voisine de 5, nous considérons la différence comme significative. L'évolution de la population E1 est négative en ce qui concerne les enjeux.

Population 2

Observés	Un enjeu + NR	Plusieurs enjeux	Total ligne
E2 (N=25) avant	22	3	25
E2 (N=25) après	5	20	25
Total colonne	27	23	50

Calculés	Un enjeu	Plusieurs enjeux
E2 (N=25) avant	13.5	11.5
E2 (N=25) après	13.5	11.5

$\chi^2_{\text{calculée}} = 23.26$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 10.827$ avec une probabilité de 0.1%. La différence est significative. L'évolution de la population E2 est positive en ce qui concerne les enjeux.

2. Les démarches

2.1. Comparaison des résultats obtenus avant expérimentation

Observés	Une méthode + NR	Plusieurs méthodes	Total ligne
E1 (N=20)	12	8	20
E2 (N=25)	4	21	25
Total colonne	16	30	45

Calculés	Une méthode + NR	Plusieurs méthodes
E1 (N=20)	7.1	13.3
E2 (N=25)	8.8	16.6

$\chi^2_{\text{calculée}} = 9.27$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 6.635$ avec une probabilité de 1%. La différence est significative, cela pourrait résulter de la façon dont l'enseignant a introduit la séquence lors de la deuxième expérimentation ou/et d'une modification de pratique pédagogique.

1.2 Comparaison des résultats obtenus après expérimentation

Observés	Une méthode + NR	Plusieurs méthodes	Total ligne
E1 (N=20)	1	19	20
E2 (N=25)	7	18	25
Total colonne	8	37	45

Calculés	Une méthode + NR	Plusieurs méthodes
E1 (N=20)	3.55	16.4
E2 (N=25)	4.44	20.55

$\chi^2_{\text{calculée}} = 4.03$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 3.841$ avec une probabilité de 5%. La différence existe mais est moins significative qu'avant

expérimentation (la valeur minimale des effectifs calculés est inférieure à 5, ce qui ne permet pas d'accorder une grande validité au test de chi 2).

1.3 Comparaison des résultats obtenus avant et après expérimentation

1.3.1. Population 1

Observés	Une méthode+ NR	Plusieurs méthodes	Total ligne
E1 (N=20) avant	12	8	20
E1 (N=20) après	1	19	20
Total colonne	13	27	40

Calculés	Une méthode+ NR	Plusieurs méthodes
E1 (N=20) avant	6.5	13.5
E1 (N=20) après	6.5	13.5

$\chi^2_{\text{calculée}} = 13.8$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 10.827$ avec une probabilité de 0.1%. La différence est significative. L'évolution de la population E1 est positive en ce qui concerne les méthodes.

1.3.2. Population 2

Observés	Une méthode + NR	Plusieurs méthodes	Total ligne
E2 (N=25) avant	4	21	25
E2 (N=25) après	7	18	25
Total colonne	11	39	50

Calculés	Une méthode + NR	Plusieurs méthodes
E2 (N=25) avant	5.5	19.5
E2 (N=25) après	5.5	19.5

$\chi^2_{\text{calculée}} = 1.048$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est voisin de $\chi^2 = 1.074$ avec une probabilité d'erreur de 30%. La différence est non significative, ce qui peut s'expliquer par le fait que la population E2 fournit plus de réponses « plusieurs méthodes » que la population E1 avant expérimentation.

3. Les enjeux et les démarches

3.1. Avant expérimentation

3.1.1. Population 1

Observés (N=20)	Un	Plusieurs	Total ligne
Enjeux	12	8	20
Méthodes	12	8	20
Total colonne	24	16	40

La population E1 est équivalente pour les enjeux et les démarches avant expérimentation.

3.1.2. Population 2

Observés (N= 25)	Un	Plusieurs	Total ligne
Enjeu	22	3	25
Méthode	4	21	25
Total colonne	26	24	50

Calculés (N=25)	Un	Plusieurs
Enjeu	13	12
Méthode	13	12

$\chi^2_{\text{calculée}} = 25.96$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 10.827$ avec une probabilité de 0.1%. La différence est significative.

3.2 Après expérimentation

3.2.1. Population 1

Observés (N=20)	Un+ NR	Plusieurs	Total ligne
Enjeu	19	1	20
Méthode	1	19	20
Total colonne	20	20	40

Calculés (N=20)	Un + NR	Plusieurs
Enjeu	10	10
Méthode	10	10

$\chi^2_{\text{calculée}} = 32.4$ avec $\nu = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 10.827$ avec une probabilité de 0.1%. La différence est significative

3.2.2. Population 2

Calculés (N=25)	Un + NR	Plusieurs	Total ligne
Enjeu	5	20	25
Méthode	7	18	25
Total colonne	12	38	50

Calculés (N=25)	Un +NR	Plusieurs
Enjeu	6	19
Méthode	6	19

$\chi^2_{\text{calculée}} = 0.44$ avec $\nu = 1$. La différence est non significative

3. Conclusion

Les tests de chi 2 confirment l'analyse qualitative des tableaux à savoir :

- Les nombres de réponses « correctes » (plusieurs enjeux, plusieurs démarches) données par la population E1 avant expérimentation sont équivalents. Pour la population E2, il y a une différence en faveur des méthodes.
- Il y a une évolution positive en ce qui concerne les méthodes pour la première expérimentation mais pas pour les enjeux
- Il y a une évolution positive en ce qui concerne les enjeux pour la seconde expérimentation et pas d'évolution pour les méthodes, ce qui s'explique par le fait que le nombre de réponses correcte pour les méthodes est élevé avant expérimentation.

L'image de l'activité scientifique au travers de l'histoire de la dioptrique: élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement pour la classe de seconde; rapport des enseignants tunisiens à l'enseignement des sciences et à l'innovation.

Résumé

Ancré dans la didactique curriculaire et dans le champ de recherche essentiellement développé dans les pays anglo-saxons désigné par l'acronyme *NoS* (Nature of Science), ce travail examine la possibilité d'introduire l'histoire des sciences dans les cours de physique de l'enseignement secondaire tunisien afin de modifier l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique des élèves. Ces conditions portent sur la nature de l'innovation à expérimenter en classe et son impact sur les élèves, sur sa généralisabilité et donc sur le rapport à l'enseignement de la physique et à l'innovation des enseignants.

Une partie des études théoriques a été consacrée à une revue de la littérature traitant de la culture scientifique (*scientific literacy*), de la nature des sciences et de l'histoire des sciences dans l'enseignement (*NoS*), l'autre à l'élaboration d'un cadre de référence épistémologico-historique. Nous y présentons les sciences comme une entreprise humaine réalisée dans un contexte socio-culturel, technique et politique d'une époque donnée et esquissons un panorama de l'histoire de la dioptrique orientée par les objectifs d'apprentissage épistémologique retenus pour la séquence d'enseignement innovante : montrer la diversité des enjeux de la physique et des démarches du physicien.

Les études empiriques ont été conduites en Tunisie. Deux séquences d'investigation documentaires ont été expérimentées en classe à un an d'intervalle par le même enseignant auprès de deux groupes d'élèves, le premier de 20, le second de 25. Elles se distinguent par le fait que l'une vise uniquement l'acquisition de savoirs épistémologiques et que l'autre vise aussi l'acquisition de savoirs scientifiques sur la loi de la réfraction. Le suivi de ces ingénieries a été réalisé essentiellement à l'aide de questionnaires ouverts ou fermés. Un film et deux entretiens sous forme de questionnaires les complètent. La transmission de l'innovation pédagogique a été réalisée dans le cadre de la formation continue des enseignants et a donné lieu à une ingénierie qui a touché 50 enseignants du secondaire. Ceux-ci ont eu à réaliser le même travail que les élèves. Trente d'entre eux ont répondu aux mêmes questionnaires que les élèves ainsi qu'à deux autres questionnaires élaborés pour déterminer leur rapport à l'enseignement de la physique et à l'innovation.

Les résultats obtenus confirment les hypothèses de recherche à propos de l'existence d'une vision empiriste et réaliste naïve des sciences chez les élèves et enseignants et d'une tendance des enseignants à privilégier les expériences dans l'enseignement de la physique. Ils sont encourageants quant à la possibilité de faire évoluer l'image de la nature de l'activité scientifique des élèves grâce à l'introduction de l'histoire des sciences relativement aux objectifs épistémologiques considérés.

Nous terminons par la discussion des apports et limites du travail réalisé et présentons quelques pistes ultérieures de recherche.

Mots-clés : nature des sciences, histoire des sciences, innovation pédagogique, conceptions épistémologiques, élèves, enseignants, dioptrique