

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
REMERCIEMENTS	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. PROBLÉMATIQUE	4
1. Enseignement des sciences : enjeux et limites.....	4
2. Apprentissage des sciences et conceptions initiales.....	5
3. Méthode traditionnelle en enseignement des sciences.....	7
4. L'enseignement de l'effet photoélectrique.....	8
4.1. Aperçu sur l'effet photoélectrique.....	8
4.2. Importance de l'enseignement de l'effet photoélectrique.....	11
4.3. Difficultés en enseignement de l'effet photoélectrique.....	13
5. Nouvelles technologies de l'information et des communications.....	15
6. Apprentissage collaboratif.....	16
7. Technologies mobiles.....	16
8. Objectif de la recherche.....	18
CHAPITRE 2. CADRE THÉORIQUE	19
1. Vision socioconstructiviste de l'apprentissage des sciences.....	20
1.1. Constructivisme de Piaget.....	20
1.2. Constructivisme et apprentissage des sciences.....	21
1.3. Socioconstructivisme de Vygotsky.....	23
1.4. Socioconstructivisme et apprentissage des sciences.....	24
1.5. Récapitulation.....	27
2. Apprentissage collaboratif.....	28
2.1. Définition.....	28
2.2. Composantes.....	29
2.3. Étapes du processus de l'approche collaborative.....	31
2.4. Limites de l'apprentissage collaboratif.....	32
2.5. Les interactions dans une situation de collaboration.....	33
2.6. Sommaire des principes de l'apprentissage collaboratif.....	34
3. Changement conceptuel.....	35
3.1. Prise en compte des conceptions initiales.....	35
3.2. Changement conceptuel.....	35
3.3. Revue sur les principaux modèles de changement conceptuel.....	36
3.4. Récapitulation.....	45
3.5. Conception des environnements d'apprentissage.....	47

4. Conceptions des étudiants au sujet du phénomène photoélectrique et de concepts connexes.....	50
4.1. Conceptions et principaux modèles de la lumière.....	51
4.2. Conceptions des étudiants au sujet de l'effet photoélectrique	55
5. Principales approches d'enseignement du phénomène photoélectrique et de concepts connexes.....	58
5.1. Approche traditionnelle.....	59
5.2. Approche historique	59
5.3. Approche par analogie	60
5.4. Approche par rupture	61
5.5. Approche par juxtaposition	62
5.6. Approche par ordinateur	62
5.7. Récapitulation	64
6. Technologie de l'information et des communications et apprentissage des sciences..	65
6.1. Nouvelles technologies et enseignement des sciences.....	65
6.2. Simulations.....	68
7. Apprentissage mobile.....	87
7.1. Définition de l'apprentissage mobile	88
7.2. Technologies mobiles : potentialités et limites	91
7.3. Apprentissage mobile et théories d'apprentissage.	93
7.4. Apprentissage mobile : problématiques et défis	96
7.5. Apprentissage collaboratif et dispositifs mobiles	102
7.6. Cadre théorique de l'apprentissage mobile	104
7.7. Récapitulation	108
8. Conclusion	110
CHAPITRE 3. QUESTIONS DE RECHERCHE	118
1. Introduction	118
2. Objectif de la recherche	118
3. Questions de recherche	119
CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE	122
1. Introduction	122
2. Démarche d'ensemble et modes d'investigation.....	122
3. Laboratoire élaboré pour le projet de recherche (MobileSIM)	123
3.1. Description de la simulation	124
3.2. Conception d'une activité MCSCL (Mobile Computer Supported Collaborative Learning).....	125
3.3. Élaboration d'un scénario d'apprentissage	129
4. Collecte d'information	137
4.1. Prétest et post-test	138
4.2. Entrevues semi-structurées.....	140
4.3. Questionnaire sur la collaboration, l'apprentissage mobile et les simulations ...	142
4.4. Enregistrements vidéos	143
4.5. Traces des sujets.....	144

5. Traitement des données.....	144
5.1. Étude quantitative des résultats des prétest et post-test	144
5.2. Étude qualitative des entrevues.....	145
5.3. Traitement des enregistrement vidéos.....	146
5.4. Traces : logs, papiers.....	147
CHAPITRE 5. RÉSULTATS ET DISCUSSION	148
1. Effet d'enseignement de l'effet photoélectrique.....	148
1.1. Résultats au prétest.....	149
1.2. Résultats au post-test.....	150
1.3. Comparaison des résultats des deux groupes	152
1.4. Gain normalisé (facteur de Hake)	157
1.5. Récapitulation	159
2. Impact sur l'apprentissage et l'évolution conceptuelle.....	160
2.1. Conceptions des étudiants au sujet de la lumière.....	160
2.2. Conceptions des étudiants au sujet de l'effet photoélectrique et concepts annexes	174
2.3. Récapitulation	193
3. Processus d'apprentissage.....	195
3.1. Observation du contexte et déroulement de l'expérimentation.....	196
3.2. Rôle du simulateur sur PDA	202
3.3. Rôle de la collaboration	212
3.4. Effet de la mobilité.....	223
CHAPITRE 6. CONCLUSIONS	227
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	235
ANNEXES.....	i

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Statistiques descriptives (Prétest)	150
Tableau II. Statistiques descriptives (post-test)	151
Tableau III. Tableau comparatif des résultats (en pourcentage) des deux catégories pour le groupe contrôle.....	152
Tableau IV. Résultat du test de Wilcoxon pour la comparaison du prétest et post-test (Groupe de contrôle)	153
Tableau V. Tableau comparatif des résultats (en pourcentage) des deux catégories pour le groupe expérimental.....	154
Tableau VI. Résultat du test de Wilcoxon pour la comparaison du prétest et post-test (Groupe expérimental)	154
Tableau VII. Tableau comparatif des résultats (en pourcentage) des deux catégories pour les deux groupes.....	156
Tableau VIII. Résultats ANOVA à un seul facteur.....	159
Tableau IX. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental.....	161
Tableau X. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 6).....	166
Tableau XI. Répartition des conceptions des interviewés à propos du photon.....	166
Tableau XII. Évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 7).....	175
Tableau XIII. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 10)	178
Tableau XIV. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 1)	179
Tableau XV. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 4).....	180
Tableau XVI. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 9)	183
Tableau XVII. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 2)	186
Tableau XVIII. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 3)	189
Tableau XIX. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 3)	192
Tableau XX. Caractéristiques et membres des équipes formées	197
Tableau XXI. Temps prévu et temps effectif moyen pour chacune des activités proposées	198
Tableau XXII. Corrélations non paramétriques de Spearman entre le gain normalisé et le temps effectif pour chaque phase.....	200

Tableau XXIII. Corrélations non paramétriques de Spearman	201
Tableau XXIV. Résultats des réponses à la troisième question du questionnaire (Annexe VIII).....	205
Tableau XXV. Pourcentage de bonnes réponses avant et après la simulation.....	208
Tableau XXVI. Corrélations non paramétriques de Spearman entre le gain normalisé de chaque équipe et les différentes composantes de l'apprentissage collaboratif	215
Tableau XXVII. Coefficient de corrélation de Spearman entre le gain d'apprentissage et les interactions apprenant-apprenant	217

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Illustration du montage électrique utilisé par Lenard (PhET, 2007)	10
Figure 2. Approche par analogie mécanique (Kovacevic et Djordjevich, 2006).....	61
Figure 3. Les différents types d'un apprentissage flexible (Brown, 2003).....	90
Figure 4. Modèle de la théorie de l'activité (AT) (Engeström, 1987)	106
Figure 5. Cadre théorique basé sur le modèle de la théorie de l'activité d'Engeström (Zurita et Nussbaum, 2007).....	108
Figure 6. Étapes de la conception d'une activité MCSCL (Zurita et Nussbaum, 2007)....	126
Figure 7. Simulateur sur IPAQ 210.....	132
Figure 8. Illustration de la plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM (écran d'accueil et liste des activités)	136
Figure 9. Énoncé de la question 5 (concept de la lumière)	139
Figure 10. Énoncé de la question 6 sur le concept du photon.....	140
Figure 11. Pourcentage de bonnes réponses au prétest pour les deux groupes (expérimental : PRETEXP et contrôle : PRECTRL)	149
Figure 12. Pourcentage de bonnes réponses au post-test pour les deux groupes (expérimental : POSTEXP et contrôle : POSTCTRL).....	151
Figure 13. Comparaison des scores moyens des deux groupes	156
Figure 14. Gain normalisé de Hake pour les deux groupes (Contrôle et Expérimental) ...	158
Figure 15. Pourcentage des sujets en fonction du gain pour les deux groupes Contrôle et Expérimental	158
Figure 16. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 5	161
Figure 17. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 6	165
Figure 18. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 7	175
Figure 19. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 10	177
Figure 20. Diagramme des réponses des étudiants à la question 1	179
Figure 21. Diagramme des réponses des étudiants à la question 4	180
Figure 22. Diagramme des réponses des étudiants à la question 9	183
Figure 23. Diagramme des réponses des étudiants à la question 2	186
Figure 24. Diagramme des réponses des étudiants à la question 3	189
Figure 25. Diagramme des réponses des étudiants à la question 8	191
Figure 26. Temps effectif par équipe et par phase	199
Figure 27. Évolution du gain normalisé moyen en fonction du temps effectif pour chaque équipe	200
Figure 28. Temps effectif par tâche	201
Figure 29. Gain normalisé en fonction de la durée moyenne des prévisions.....	204

Figure 30. Nombre d'interventions par équipe	214
Figure 31. Pourcentage des composantes de l'apprentissage collaboratif	215
Figure 32. Pourcentage d'interactions apprenant-apprenant et apprenant-professeur pour chaque équipe	216
Figure 33. Gain d'apprentissage normalisé en fonction par équipe des interactions apprenant-apprenant pendant la phase I	217
Figure 34. Gain d'apprentissage normalisé par équipe en fonction des interactions apprenant-apprenant pendant la phase de Mise en commun	217
Figure 35. Résultats du questionnaire portant sur les mécanismes de la collaboration	219
Figure 36. Résultats du questionnaire portant sur le rôle d'étudiant dans un apprentissage collaboratif.	220

Rapport-Gratuit.com

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Jesús Vázquez-Abad, mon directeur de thèse, pour son soutien indéfectible dès le moment où il a accepté la direction de ce travail jusqu'au dépôt de ma thèse et pour ses encouragements sans lesquels je n'aurais jamais complété cette aventure.

Je tiens ensuite à remercier grandement Odile Martial pour ses conseils et son soutien moral et intellectuel tout au long du développement de ce projet de recherche.

Je remercie aussi toute l'équipe de la Maison des technologies de formation et d'apprentissage Roland Giguère (MATI Montréal) et du Laboratoire de recherche en réseautique et informatique mobile (LARIM) : le professeur Samuel Pierre, Sabine Kébreau, Georges-Ibrahim Zreik, Robert Morin et Stéphane Reiss pour leur contribution à ce travail.

Je remercie également Martin Périard et Alexandre Lemerle du cégep de Bois-de-Boulogne pour m'avoir gracieusement aidé à recueillir des données.

Merci à M. Marcel Thouin et Mme France Caron pour leur temps et leurs explications, surtout lors de l'examen de synthèse, qui m'ont permis de jeter un regard sur l'objet de recherche.

J'aimerais finalement remercier le Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture (FQRSC) subventionnant l'équipe de recherche S@c-TIC pour le soutien financier.

INTRODUCTION

L'objet des sciences expérimentales, et de la physique en particulier, est de comprendre le monde qui nous entoure, d'interpréter la réalité et d'agir sur elle. La conception que l'étudiant a de la réalité est déterminée par ses idées préexistantes et elle diffère de celle que lui propose l'enseignant dans une situation d'apprentissage. Un aspect essentiel de l'apprentissage des sciences consiste alors en la construction par les étudiants de modèles mentaux aussi proches que possible des modèles scientifiques (Hodson, 1992); il s'agit de faire évoluer les modèles mentaux des étudiants vers des modèles plus scientifiques. Plusieurs chercheurs ont noté des difficultés récurrentes rencontrées par les étudiants, en situation d'apprentissage de la physique, en particulier lors de l'apprentissage de l'effet photoélectrique. De plus, l'enseignement traditionnel seul ne suffit pas à surmonter ces difficultés et n'aide en aucun cas les étudiants à transformer leurs fausses conceptions en conceptions plus scientifiques. Les enseignants sont souvent à la recherche de méthodes et d'activités innovatrices et plus stimulantes dans le but d'enrichir leur enseignement.

En ce sens, les technologies de l'information et des communications, et particulièrement les dispositifs mobiles, éclairent des façons de faire potentielles d'innovation en enseignement des sciences. Les TIC offrent aux enseignants des possibilités énormes pour développer des activités d'apprentissage collaboratif et peuvent aider les étudiants à construire de nouvelles connaissances en modélisant des phénomènes scientifiques. Dans cette recherche, nous tentons d'explorer l'impact d'une activité en utilisant les technologies de l'information et des communications (les technologies mobiles et la simulation) et en situation de collaboration sur la compréhension conceptuelle du phénomène photoélectrique chez les étudiants au niveau collégial.

Pour ce faire, nous avons réparti ce travail en six chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons tout d'abord la problématique de la compréhension conceptuelle en apprentissage des sciences et particulièrement en enseignement de la physique; les TIC et surtout les dispositifs mobiles nous offrent à la fois un défi et une occasion pour changer radicalement les manières qui facilitent l'apprentissage. Nous avons ainsi posé la question

suivante : comment déployer ces environnements de support d'apprentissage pour une meilleure compréhension conceptuelle de l'effet photoélectrique ?

Le deuxième chapitre est constitué de trois parties : dans la première, nous présentons une vision socioconstructiviste de l'apprentissage des sciences que nous adoptons dans cette recherche ainsi que la notion de l'apprentissage collaboratif et ses composantes. Après avoir brièvement présenté la notion de changement conceptuel, de même que les principaux modèles de changement conceptuel, nous exposons les conceptions les plus fréquentes des étudiants au sujet du phénomène photoélectrique et des concepts connexes. Nous présentons également les principales approches d'enseignement, des plus traditionnelles aux plus novatrices, du phénomène photoélectrique et des concepts connexes. Ensuite, nous exposons dans la deuxième partie, les apports et les limites du recours à la simulation, qui peuvent être vus comme une approche mitoyenne entre l'exposé théorique et l'expérimentation réelle, dans l'apprentissage des sciences. Dans la troisième partie, en nous basant sur une revue de la littérature, nous tentons de donner une définition de l'apprentissage mobile et nous essayons ensuite d'identifier les principales problématiques propres à ce domaine en émergence. Nous portons une attention particulière à la problématique de conception des activités d'apprentissage collaboratif sur des dispositifs mobiles et enfin, nous exposons le cadre théorique que nous avons suivi pour concevoir les activités d'apprentissage de notre expérimentation.

Dans le troisième chapitre, nous reformulons notre objectif de recherche et nous raffinons nos questions de recherche en fonction des éléments issus du cadre théorique. Dans le quatrième chapitre, nous développons la méthodologie utilisée dans ce projet de recherche. Nous discutons le choix des sujets et nous présentons les deux études exploratoires, considérées comme étapes préliminaires pour la conception et la réalisation de notre expérimentation. Nous décrivons ensuite les méthodes utilisées pour le recueil et le traitement des données.

Dans le cinquième chapitre, nous exposons et nous discutons des résultats en essayant de faire un parallèle avec nos questions de recherche. Enfin, nous concluons cette thèse en indiquant les apports, les limites et les perspectives de cette recherche.

CHAPITRE 1. PROBLÉMATIQUE

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter succinctement les enjeux et les limites de l'enseignement des sciences dans le but de mettre en relief la problématique choisie. Nous présentons ensuite les limites des méthodes traditionnelles en apprentissage des sciences. Puis, nous exposons quelques contributions des technologies de l'information et des communications. Nous citons par ailleurs quelques avantages de l'utilisation des simulations dans l'enseignement des sciences, ainsi que de l'apport de la collaboration et de l'usage des technologies mobiles. Nous nous interrogeons enfin sur l'effet d'une séquence d'apprentissage basée sur la simulation, la collaboration et les technologies mobiles sur la compréhension de la nature quantique de la lumière chez les élèves au niveau collégial.

1. Enseignement des sciences : enjeux et limites

L'apprentissage des sciences vise la compréhension du monde qui nous entoure. La nature des phénomènes naturels exige que ceux qui les étudient se conforment à une discipline forte rigoureuse. En effet, les activités dites scientifiques supposent des attitudes bien peu naturelles et requièrent l'usage d'un ensemble de concepts où de termes comme photon, onde, fréquence et lumière prennent un sens plus précis, plus restreint et dont l'emploi exige une rigueur certaine (Potvin, 2002).

Selon Knight (2004), loin de se livrer à des abstractions mathématiques et autres concepts difficiles, le but de l'enseignement de la physique est la compréhension des phénomènes. Ainsi, le développement de l'intuition physique est plus facilement compris s'il est présenté sous forme de démonstration simple, sans être encombré d'abstractions mathématiques abstruses.

Dans l'enseignement des sciences, on s'intéresse aux changements et à la façon dont les étudiants reflètent leur apprentissage et s'engagent activement dans un processus visant à expliquer les phénomènes qui les entourent. Ainsi, le développement des capacités de métacognition chez les étudiants est nécessaire pour accroître les compétences. Les

apprenants possèdent des capacités de raisonnement même s'ils possèdent moins de connaissances et moins d'expertise. Les étudiants renforcent leur habileté à résoudre les problèmes.

L'enseignement des sciences présente des difficultés propres à cette discipline. Notons tout d'abord le problème du transfert entre les modèles théoriques et les manifestations physiques des phénomènes étudiés. Ce transfert peut être facilité par l'instauration d'un niveau intermédiaire entre ces deux niveaux de compréhension (Richoux et al., 2002).

De plus, les sujets traités en sciences sont des systèmes dynamiques complexes. L'enseignement tend souvent à simplifier cette réalité et, par le même fait, rend statiques des phénomènes dynamiques. D'où le besoin de créer des contextes qui permettent d'explorer des systèmes dynamiques et de diminuer la distance entre la réalité dynamique des systèmes et l'enseignement statique dans les établissements scolaires (Wilensky and Stroup, 2004).

Enfin, notons les difficultés d'ordres conceptuels rencontrées par les étudiants lorsqu'ils tentent d'expliquer un phénomène naturel en particulier lors de l'apprentissage de la physique. Les étudiants ont des difficultés à transformer leurs modèles personnels ou construits et à rompre avec leurs convictions antérieures pour adopter des conceptions plus scientifiques.

2. Apprentissage des sciences et conceptions initiales

Les apprenants ne sont pas des tables rases (tabula rasa), ils arrivent en situation d'apprentissage avec des idées plus ou moins structurées, qu'ils tentent d'adapter à la situation; ces idées constituent pour eux un système explicatif, c'est-à-dire qu'ils possèdent déjà des explications sur les phénomènes naturels même si ces phénomènes ne leur ont jamais été enseignés. (Driver et Easley, 1978; diSessa, 1982; Wandersee et al., 1994). Dans

ce qui suit, nous utiliserons le terme conception pour représenter ces idées initiales ou antérieures, en nous basant sur la définition suivante :

« ... Une conception correspond à une structure de pensée sous-jacente, à un modèle explicatif simple, logique et organisé, dont les origines sont diverses, et qui peut être utilisé dans une situation donnée pour poser ou résoudre un problème. » (De Vecchi et Giordan, 1988, p. 56)

Ainsi, les conceptions des élèves sont des connaissances personnelles au sujet des phénomènes naturels. C'est en essayant de comprendre ces phénomènes que l'élève élabore ses conceptions ou modèles implicites. Ces conceptions issues de la vie quotidienne peuvent être considérées naïves et non conformes aux conceptions scientifiques; elles ont un pouvoir explicatif et sont enracinées, résistantes et persistantes (Duit, 1991). Elles ne sont pas facilement remplacées par des conceptions scientifiques (Wandersee et al., 1994).

Ces conceptions initiales ont une influence importante sur l'apprentissage des sciences chez les apprenants (Ausubel, 1968 dans Duit, 1991). Cette influence persistante des conceptions des élèves pose de nombreuses difficultés, voire des obstacles, à l'acquisition du savoir enseigné comme l'a indiqué Bachelard :

« C'est en termes d'obstacles qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique...C'est là que nous montrerons des causes de stagnation et même de régression, c'est là que nous décèlerons des causes d'inertie que nous appellerons des obstacles épistémologiques...les sciences physiques et chimiques dans leur développement contemporain peuvent être caractérisées épistémologiquement comme des domaines de pensée qui rompent avec la connaissance vulgaire. » (Bachelard, 1969, p. 13)

Il n'est pas question ici de considérer des conceptions figées et fixées. C'est au contraire dans leur capacité à évoluer et à s'adapter aux nouvelles situations que certaines conceptions acquièrent cette capacité à coexister à côté du savoir scolaire, et par la suite à « résister » à l'enseignement (Johsua et Dupin, 1993, p. 127). L'utilisation exclusive de la méthode traditionnelle ne semble pas permettre de développer une compréhension appropriée des concepts en physique.

3. Méthode traditionnelle en enseignement des sciences

La méthode traditionnelle d'enseignement, souvent utilisée en enseignement des sciences, est caractérisée par la transmission des connaissances comme l'indique Gunstone (1990) : « *What the teacher says is what the learner hears and therefore knows.* » Une telle approche, selon Mc Robbie et Tobin (1997), entraîne un apprentissage basé sur la mémorisation des connaissances, le rappel des concepts et des applications directes des formules avec une compréhension très limitée.

Les leçons typiques au niveau préuniversitaire s'apparentent à une récitation inefficace : c'est le cas des cours magistraux, des exercices d'application et des problèmes typiques, des diplômes délivrés après des examens ou des tests standards d'évaluation basés sur la restitution des faits et sur la résolution des problèmes quantitatifs similaires à ceux déjà étudiés (European Physics Education Network, 2000; Howes, 2001). Habituellement, l'enseignant présente son cours par un exposé oral en l'associant éventuellement à d'autres outils d'enseignement (projection d'un transparent ou acétate et commentaires associés, etc.). L'enseignement magistral demeure l'une des stratégies d'enseignement les plus utilisées par le personnel enseignant. Ce personnel recourt à l'exposé magistral non seulement pour traiter les notions abstraites, mais aussi pour expliquer des phénomènes physiques dans le cas où le matériel expérimental n'est pas disponible.

Bien que l'enseignement magistral puisse être efficace, particulièrement pour enseigner à des classes où le nombre d'étudiants est élevé, il faut reconnaître que son utilisation régulière se traduit trop fréquemment par de longs exposés qui rendent inactifs, démobilisent et démotivent un nombre important d'étudiants (Giordan et Girault, 1994). L'enseignement magistral ne laisse que peu de place à la réflexion. Ce type d'enseignement n'offre pas aux apprenants l'occasion de manipuler les concepts théoriques (abstraites). C'est le cas par exemple des concepts de lumière ou de photon du fait que ces concepts représentent des outils d'analyse à la fois du fonctionnement de la physique enseignée et de l'activité cognitive des apprenants par le biais de leurs verbalisations. Ainsi, les résultats

d'une recherche conduite par Mazur (1997) de l'Université de Harvard montrent que les étudiants, après avoir complété des cours traditionnels en physique, répondent correctement à des questions traditionnelles d'un test sans comprendre les concepts de base ou apprendre les approches de résolution des problèmes.

4. L'enseignement de l'effet photoélectrique

4.1. Aperçu sur l'effet photoélectrique

En 1905, Albert Einstein publia dans un des trois articles révolutionnaires une explication inattendue de l'effet photoélectrique en attribuant à la lumière une double nature : ondulatoire et corpusculaire. Ceci lui a valu par la suite le prix Nobel.

Jusqu'à la fin du 19^e siècle, l'observation des phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation avait clairement mis en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. De plus, il était généralement accepté que les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement électromagnétique se fassent de manière continue. Éclairée par une lumière bleue, une plaque de métal éjecte des électrons, minuscules grains d'électricité : c'est l'effet photoélectrique. Avec une lumière rouge, on n'obtient aucun effet, même en concentrant beaucoup de lumière en un point ! Difficile à comprendre si l'on admet que la lumière n'est qu'une simple vibration, une onde transportant une énergie électromagnétique, tel que l'assumait le modèle courant à la fin du XIX^e siècle. Pour l'expliquer, Einstein a émis l'hypothèse que la lumière est « quanta », onde et corpuscule à la fois. C'est ainsi que tout un chapitre de la physique s'ouvrit.

L'effet photoélectrique est parmi les phénomènes majeurs qui permettent de mettre en évidence la nature corpusculaire de la lumière : la lumière est composée de grains d'énergie localisés.

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau, généralement métallique, lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique

de fréquence suffisamment élevée; cette fréquence dépend du matériau, alors que le nombre d'électrons émis, qui détermine l'intensité du courant, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse. Ce phénomène a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz.

De nombreux scientifiques ont répété les expériences d'Hertz avec des appareils semblables. Non seulement leurs résultats appuyaient l'hypothèse d'Einstein, mais ils fournissaient aussi les fondements de l'analyse sur l'effet photoélectrique. La figure 1 montre le montage utilisé par Lenard (1902) pour étudier le phénomène de l'effet photoélectrique. Voici quelques-uns des plus importants résultats de la recherche :

- l'émission des électrons n'est possible que si la fréquence de la lumière incidente est au-dessus d'une certaine fréquence, appelé fréquence seuil. Au-dessus de la fréquence seuil, plus grande est l'intensité de la lumière, plus grand est le courant électrique généré par les électrons émis.
- l'intensité de la lumière n'a aucun effet sur la fréquence seuil. Quelle que soit l'intensité de la lumière incidente, si elle se trouve sous la fréquence seuil, aucun électron n'est émis.
- la fréquence seuil à laquelle l'émission photoélectrique se produit d'abord est différente pour les différentes surfaces. Par exemple, la lumière produisant une émission photoélectrique à partir d'une cathode de Césium n'a aucun effet sur une cathode de cuivre.
- à mesure que le potentiel de freinage appliqué à l'anode est augmenté, le courant photoélectrique faiblit, sans égard à l'intensité de la lumière. Les électrons sont alors émis avec différentes énergies cinétiques. Une valeur du potentiel de freinage est finalement atteinte, suffisamment pour réduire le courant électrique à zéro. Même les électrons les plus rapides ne peuvent parvenir à l'anode et sont retournés par le potentiel de freinage.

- si différentes fréquences de lumière, toutes au-dessus de la fréquence seuil, sont dirigées sur la même surface photoélectrique, le potentiel d'arrêt varie pour chacune. Il apparait que plus la fréquence de la lumière est élevée, plus le potentiel d'arrêt est élevé.
- durant la photoémission, la libération de l'électron est immédiate, sans temps d'attente notable entre l'illumination et l'émission de l'électron, même avec une lumière extrêmement faible. Il semble que l'électron absorbe l'énergie lumineuse immédiatement : aucun temps n'est requis pour l'accumulation d'énergie suffisante à libérer les électrons.

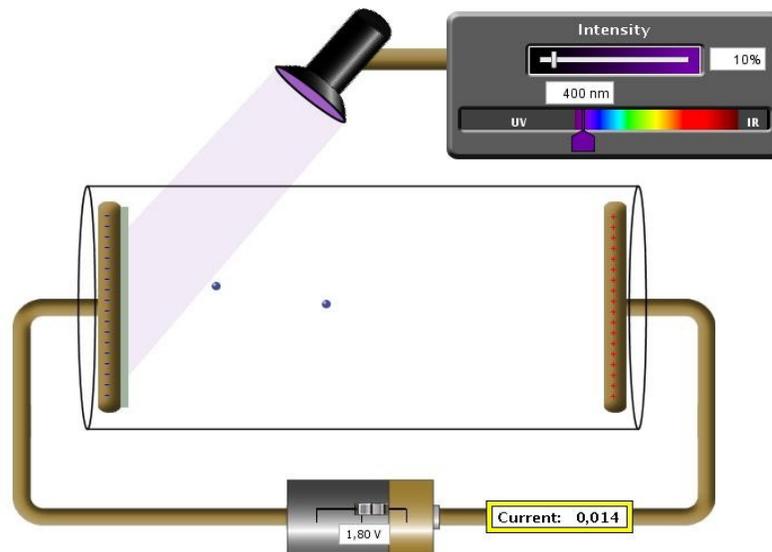


Figure 1. Illustration du montage électrique utilisé par Lenard (PhET, 2007)

Parmi tous ces résultats de recherche, seul le premier pouvait être expliqué par la théorie électromagnétique classique de la lumière. Plus particulièrement, selon la théorie ondulatoire classique, il n'existe aucune raison pour laquelle un faisceau intense de lumière à basse fréquence ne puisse produire un courant photoélectrique, ni que l'intensité de la lumière ne puisse affecter l'énergie cinétique maximale des électrons libérés. La théorie ondulatoire classique de la lumière ne pouvait vraiment pas expliquer l'effet photoélectrique.

Einstein était bien au fait de ces nouvelles expériences et de l'hypothèse du corps noir de Planck. Il connaissait aussi la théorie atomique de la lumière de Newton, dont il a retenu certains aspects pour avancer une hypothèse audacieuse : l'énergie du rayonnement électromagnétique, y compris celle de la lumière visible, n'est pas transmise de façon continue; elle se concentre plutôt en lots d'énergie appelés photons. Il a utilisé sa théorie sur les photons pour expliquer certains résultats d'expériences portant sur l'effet photoélectrique, tout en prévoyant de nouveaux effets.

L'effet photoélectrique joue non seulement un rôle théorique majeur en introduisant la nature quantique de la lumière, mais aussi un rôle très important en technologie. Il possède de nombreuses applications, particulièrement dans les semi-conducteurs connus sous le nom de photodiodes. Ces photodiodes sont les pièces majeures de nombreux dispositifs antivols, de portes de garage et les dispositifs de fermeture de portes automatiques. Plusieurs autres dispositifs utilisent l'effet photoélectrique comme les télécommandes de certaines télévisions et de magnétoscopes, les détecteurs de fumée etc. L'une des applications les plus importantes de l'effet photoélectrique est le dispositif à transfert de charge (DTC); un réseau de ces dispositifs est utilisé dans les appareils photonumériques pour capter les images électroniquement, d'une manière plus précise.

4.2. Importance de l'enseignement de l'effet photoélectrique

L'expérience de l'effet photoélectrique est présentement enseignée au niveau collégial, dans le cadre du programme « 200. B0. Sciences de la nature » dans le cours de physique : « Optique et physique moderne ». Ce programme actuel a vu le jour en 1998 dans le but de préparer les étudiants pour l'université. Il s'étale sur une période de quatre sessions et s'échelonne sur deux ans.

Le programme « Sciences de la nature » au collégial a pour objet de donner à l'étudiant ou à l'étudiante une formation équilibrée, intégrant les composantes de base d'une formation scientifique et d'une formation générale rigoureuse, les rendant aptes à poursuivre des études universitaires en sciences pures, en sciences appliquées ou en sciences de la santé (MELS, 2007)

Les cours offerts se subdivisent en deux blocs, soit, d'une part, la formation générale commune et complémentaire de 45 crédits, et, d'autre part, la formation spécifique de 60 crédits. Parmi les objectifs du programme, on mentionne que l'étudiant ou l'étudiante doit être capable de réaliser les différentes étapes d'une démarche scientifique de type expérimental (MELS, 2007).

La formation spécifique inclut des cours de biologie, de chimie, de physique et de mathématiques. La présente recherche entre dans le cadre d'un cours de physique, intitulé « Ondes, optique et physique moderne, 203-NYC-05 ». Le cours se déroule sur une session de 15 semaines pour un total de 75 heures, dont 45 heures sont consacrées à la théorie et 30 heures aux expériences de laboratoire. Ce cours est le dernier des trois cours de physique pour les étudiants inscrits au Diplôme d'études collégiales en Sciences de la nature. Il est suivi habituellement lors de la quatrième et dernière session de leur cheminement.

Selon le ministère de l'Éducation de Québec (1998), un des 10 buts de la formation spécifique du programme Science de la nature du collégial consiste à rendre l'étudiant capable d'analyser différentes situations ou des phénomènes physiques reliés aux ondes, à l'optique et à la physique moderne à partir de principes fondamentaux. L'annexe I indique les objectifs et standards concernant ce but. L'effet photoélectrique présente une opportunité importante pour acquérir cette compétence.

Cette expérience est traitée dans le but de montrer la nature quantique de la lumière et par la suite d'introduire à la physique quantique ou moderne. Elle constitue donc un bon exemple d'analyse de situation à partir de notions de la physique moderne en faisant appel aux standards nécessaires pour aboutir au but général mentionné ci-dessous (voir Annexe I). Une activité basée sur cette expérience présente également une opportunité pour les étudiants d'appliquer une démarche scientifique en faisant appel aux concepts, aux lois et aux principes de la physique. Enseigner aux étudiants que la lumière, une saturation apparemment infinie de rayonnement électromagnétique, est aussi de nature quantique offre une occasion de préparer les étudiants aux concepts qu'ils rencontreront à l'université. En

utilisant le dispositif de l'expérience conduite par Philip Lenard (1902), la mise à l'épreuve de plusieurs situations, par les étudiants, leur permet de développer habituellement des méthodes de raisonnement qu'ils utiliseront constamment durant leurs études postérieures. L'enseignement de l'effet photoélectrique peut ainsi impliquer l'appropriation de deux modes de raisonnement : inductif, les étudiants tentent de construire un modèle pour expliquer les résultats de l'expérience, et déductif, en appliquant le modèle pour la vérification. De plus, le traitement de cette expérience peut mener les étudiants à une redécouverte guidée, à l'amélioration de leur compétence d'analyser les graphiques et à une meilleure communication scientifique.

Du point de vue du contenu, cette expérience introduit un nouveau modèle de la lumière : le modèle quantique, du fait que le modèle ondulatoire ne peut pas expliquer les résultats. Dans le modèle ondulatoire classique de la lumière, l'énergie est transmise d'une façon continue, tandis que dans le modèle quantique, l'énergie contenue dans chacun de ses photons prend des valeurs discrètes. Ce modèle quantique de la lumière constituera un élément très important pour le développement de la physique moderne et la mécanique quantique en particulier.

4.3. Difficultés en enseignement de l'effet photoélectrique

Plusieurs difficultés sont présentes. Au niveau conceptuel, les étudiants ne sont pas capables d'interpréter l'effet photoélectrique. De fausses conceptions sur la nature de la lumière persistent encore. Steinberg et al. (1999) mentionnent les difficultés qu'ont les étudiants à comprendre les modèles et concepts classiques, par exemple le modèle ondulatoire de la lumière. Ainsi la plupart des étudiants ne développent pas un modèle ondulatoire raisonnable du comportement de la lumière. Les étudiants amènent avec eux ces difficultés au moment de leur étude de la physique moderne. Cela peut mener à une mauvaise interprétation de la nature quantique de la lumière. Au lieu de corriger la manière de penser la lumière, plusieurs étudiants incorporent la nouvelle physique qu'ils apprennent dans leur faux modèle (Ambrose et al. 1999).

Selon Steinberg et al. (1996), certains étudiants ont adopté des modèles mixant onde et corpuscule. D'autres difficultés ont été présentées par la même recherche montrant que les étudiants continuent à croire que $V = IR$ s'applique à l'expérience photoélectrique et qu'un photon est un objet chargé; ils sont incapables de différencier entre l'intensité de lumière, et par conséquent le flux de photons, et la fréquence de lumière, donc l'énergie du photon; ils sont incapables de faire toute prévision d'un graphique représentant l'évolution de l'intensité du courant électrique I en fonction de la variation de la tension V pour l'expérience de l'effet photoélectrique et de donner toute explication reliant les photons à l'effet photoélectrique. Une autre recherche récente réalisée par Mc Kagan et al. (2009) a confirmé l'existence et la persistance de toutes ces difficultés.

D'autres difficultés sont reliées au matériel; plusieurs établissements scolaires ne possèdent pas les appareils nécessaires qui sont relativement chers. Notons également que le temps consacré à l'enseignement de l'effet photoélectrique en classe reste insuffisant. Les expériences d'Hertz, de Lenard et l'explication d'Einstein sont enseignées dans un espace de temps assez limité soit une ou deux périodes de 50 minutes en général.

Dans l'enseignement traditionnel, l'effet photoélectrique est présenté en un cours simple où le professeur décrit l'expérience et interprète la nature corpusculaire de la lumière, les étudiants lisent le texte du livre et doivent être capables de résoudre les problèmes à la fin du cours. Les étudiants sont incapables d'interpréter l'expérience de l'effet photoélectrique au regard du modèle photon de la lumière. Les étudiants ne sont pas capables de prévoir ou d'expliquer les effets du changement qualitatif des paramètres de l'expérience. Un tel enseignement ne fournit pas aux étudiants une aide à une compréhension fonctionnelle (Steinberg, 1996).

5. Nouvelles technologies de l'information et des communications

Les usages des technologies de l'information et des communications à l'école se développent de manière significative depuis déjà une trentaine d'années. La question sur l'utilité pédagogique et les apports didactiques de l'introduction de ces technologies en enseignement des sciences ne cesse d'être posée. Le recours aux nouvelles technologies de l'information et des communications est souvent mis en avant comme un moyen de faciliter les apprentissages et de motiver les étudiants. Ceci impactera positivement la qualité de l'enseignement.

Les apports des technologies de l'information et des communications, notamment ceux des simulations sont multiples. En enseignement des sciences, on distingue habituellement deux applications principales des ordinateurs, soit l'expérimentation assistée par ordinateur (ExAO) et la simulation assistée par ordinateur.

Les logiciels éducatifs sont souvent utilisés comme outils d'acquisition et de manipulation des données, par exemple l'observation, la cueillette des données et la construction des graphes dans le cas de l'ExAO. Cette approche permet aux étudiants de faire de véritables manipulations, favorise leur autonomie, développe leur esprit d'initiative et valorise leurs possibilités (Christian et al, 2001; Fiolhais et al. 1998; Lederman, 1998).

Si la manipulation d'appareils dans une activité expérimentale permet aux étudiants d'apprendre à les utiliser, alors la simulation offre aux apprenants un moyen de manipuler les modèles et les concepts théoriques (Beaufils, 2001). Le recours à des simulations sur ordinateur s'est largement développé, notamment dans le cadre des disciplines d'enseignement scientifique telles que la physique où elles permettent aussi bien de petites animations interactives que des modélisations élaborées. La simulation présente de nombreux avantages en enseignement des sciences; elle rend l'apprenant actif et permet une rétroaction instantanée (Roschelle et al., 2000); elle multiplie les formes de

représentations (Cholmsky, 2003); elle permet d'explorer des concepts plus abstraits et de développer une meilleure compréhension des notions enseignées, des phénomènes et des lois physiques (Jimoyiannis et Komis, 2001); elle encourage les étudiants à explorer et interagir avec le système en incluant des éléments réels ou virtuels, à changer les paramètres et à observer le résultat de cette manipulation. La simulation se présente alors comme un outil didactique puissant dont l'enseignement de la physique doit tirer profit.

6. Apprentissage collaboratif

L'apprentissage des sciences dans un cadre socioconstructiviste incite les étudiants à donner un sens au monde, à travers des processus à la fois individuels et sociaux (Driver et al., 1994). L'apprentissage est une activité sociale dans laquelle les apprenants sont impliqués dans la construction consensuelle du sens à travers des discussions et des négociations avec les pairs et les enseignants.

Par ailleurs, la collaboration dans l'apprentissage des sciences implique l'engagement des étudiants dans ce qu'ils considèrent comme une activité significative. La nature de la participation des étudiants au travail pratique et le rôle que cette participation peut jouer en apprentissage des sciences ont été beaucoup discutés (Brufee, 1993; Curtis et Lawson, 1999; Dillenbourg, 1999). La question qui se pose alors est de savoir si l'ensemble des tâches constitue un réel travail scientifique. La plupart des éducateurs contemporains des sciences soulignent l'efficacité de la collaboration et du dialogue dans l'apprentissage. L'apprentissage collaboratif supporté par ordinateur (CSCL) offre la possibilité de fournir les conditions essentielles pour le succès de l'apprentissage collaboratif.

7. Technologies mobiles

Le nombre de téléphones portables dans le monde en 2006 a été estimé à 2.6 milliards contre 2.2 milliards en 2005, soit une augmentation de 20 % (selon StrategyAnalytics, 2005). Au Canada, le nombre de personnes qui utilisent le téléphone cellulaire est passé de 100 000 en 1987 à 15 millions en 2005.

Les communications de données sans fil sous la forme de services des messages courts (SMS) et les navigateurs (WAP) du protocole d'Access sans fil ont gagné une popularité globale en raison de leur petite taille et du peu de connaissances nécessaires à leur utilisation. Les téléphones portables peuvent être discrets dans la salle de classe (Nyiri, 2003), n'exigent aucune formation à la technologie et n'intimident pas la plupart des utilisateurs.

Les technologies mobiles jouent un rôle important dans la nouvelle structure sociale. Les occasions créées par ces technologies peuvent réduire de manière significative notre dépendance à l'égard des endroits fixes pour travailler et pour apprendre (Peters, 2005).

Les dispositifs mobiles offrent la possibilité d'un environnement mobile naturel de collaboration avec des interactions face à face. De plus, chaque étudiant, en ayant son propre dispositif, a le contrôle physique du matériel, à la différence des étudiants qui attendent leur tour sur un même PC; cela contribue à une synchronisation des tâches et fournit l'interactivité nécessaire aux apprentissages.

Ces technologies mobiles nous offrent à la fois un défi et une occasion : un défi pour découvrir comment construire et déployer les environnements de support d'apprentissage et une occasion pour changer radicalement les manières qui facilitent l'apprentissage; cela donne aux étudiants un meilleur soutien individuel et une approche beaucoup plus souple à la gestion de leurs expériences d'apprentissage.

La disponibilité d'un environnement d'apprentissage mobile à n'importe quel endroit et quel que soit le lieu, nous permet probablement de dépasser la contrainte du temps.

8. Objectif de la recherche

En récapitulation, des difficultés posent des contraintes à l'enseignement de l'effet photoélectrique : difficultés conceptuelles présentes, difficultés reliées au matériel et au problème du temps à les consacrer. .

D'une part, les nouvelles technologies ont un grand potentiel en enseignement des sciences. Elles nous fournissent des occasions de créer des environnements d'apprentissage plus efficaces. La simulation permet plus particulièrement les manipulations difficiles ou impossibles à réaliser dans la classe.

D'autre part, l'ubiquité des appareils mobiles nous offre la possibilité d'un environnement mobile naturel de collaboration avec des interactions face à face.

L'objet de la présente thèse est d'étudier l'apport d'une simulation de l'effet photoélectrique dans des environnements mobiles à une meilleure compréhension de la nature quantique de la lumière chez les étudiants au niveau collégial.

Notre question de recherche est la suivante :

Peut-on tirer parti des technologies de simulation et des dispositifs mobiles pour développer des activités d'apprentissage collaboratif plus significatives de l'effet photoélectrique ?

Nous poursuivrons, dans le chapitre suivant, en présentant des considérations théoriques qui permettront de raffiner notre question de recherche et amèneront à formuler nos hypothèses.

CHAPITRE 2. CADRE THÉORIQUE

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons une vision socioconstructiviste de l'apprentissage des sciences que nous adoptons dans cette recherche. Nous exposons ainsi quelques repères théoriques sur lesquels nous nous appuyons pour montrer que l'apprentissage est non seulement une affaire individuelle, mais aussi une affaire sociale. Nous présentons par la suite la notion de l'apprentissage collaboratif et ses composantes. Vu l'importance de la prise en compte des conceptions antérieures des étudiants et du changement conceptuel en apprentissage des sciences, nous définissons ainsi dans la troisième section la notion du changement conceptuel et nous présentons brièvement ensuite les principaux modèles. Par la suite, nous identifions les principaux modèles de la lumière et les conceptions au sujet de l'effet photoélectrique et concepts connexes chez les étudiants, ainsi que les principales approches d'enseignement de l'effet photoélectrique. Dans la sixième section, nous interpellons le rôle de l'utilisation des nouvelles technologies en enseignement des sciences et nous donnons une brève définition de la simulation, des différents types de simulations; nous présentons ensuite les apports et limites de l'utilisation des simulations en enseignement des sciences. Dans la septième section, en nous basant sur une revue de la littérature, nous tentons de donner une définition de l'apprentissage mobile et nous essayons ensuite d'identifier les principales problématiques propres à ce domaine en émergence. Nous portons une attention particulière à la problématique de conception des activités d'apprentissage collaboratif sur des dispositifs mobiles et enfin, nous exposons le cadre théorique que nous avons suivi pour concevoir les activités d'apprentissage de notre expérimentation.

Finalement, nous concluons en montrant l'importance de l'utilisation d'une simulation dans des environnements mobiles et en situation de collaboration dans l'apprentissage des sciences.

1. Vision socioconstructiviste de l'apprentissage des sciences

Dans le cadre général de notre travail sur l'enseignement et l'apprentissage des sciences, nous adoptons une vision basée sur la complémentarité entre le constructivisme de Piaget et le socioconstructivisme de Vygotsky. Il nous paraît important de donner quelques repères théoriques permettant de clarifier notre vision sur l'apprentissage des sciences.

1.1. Constructivisme de Piaget

Selon Funderstanding (2001), le constructivisme est une philosophie fondée sur la construction de notre compréhension du monde à partir de nos expériences vécues. Dans la perspective piagétienne, le constructivisme, envisagé dans le cadre des théories du développement de l'enfant, demeure une approche holistique. Piaget propose de reconnaître les stades de développement de l'enfant. La recherche de stabilité au plan cognitif est une activité constante dans le processus d'adaptation et anime celui qui connaît, durant l'assimilation des connaissances nouvelles; il impose aussi en tout temps de retrouver un équilibre dans sa représentation du monde des connaissances.

Selon Piaget, la compréhension du monde des connaissances chez l'enfant se développe en exploitant plusieurs voies. Il lit, écoute, explore : il vit des expériences en tirant profit de son environnement. En classe, l'enseignant favorise des mises en situation variées dont les environnements divers sont propices au vécu d'expériences nombreuses par les apprenants. Ils apprennent dans l'action par voie de résolution de problèmes; même les erreurs font partie des solutions retenues.

Pour dégager la forme générale des besoins et intérêts communs à tous les âges, Piaget considère que tout besoin tend 1) à assimiler le monde extérieur aux structures [formes d'organisation de l'activité mentale] déjà construites, et 2) à réajuster celles-ci en fonction des transformations subies, donc à les accommoder aux objets externes (Piaget, 1970, p.14). Le constructivisme piagétien sert donc à justifier la démarche de construction des connaissances que nous proposons. Deux principes dérivés contribuent à en justifier l'usage : assimilation-accommodation et équilibration-viabilité.

Le courant constructiviste, de ce fait, considère la connaissance scientifique au même titre que n'importe quelle autre connaissance et propose que les sciences construisent, plutôt que révèlent, une réalité possible à partir d'expériences cognitives successives. Dans cette perspective, les individus construisent eux-mêmes leurs propres savoirs (Schunk, 2004).

1.2. Constructivisme et apprentissage des sciences

En apprentissage des sciences, il est important d'examiner la nature du savoir scientifique à enseigner (Driver et al. 1994). Dans une perspective constructiviste,

« The objects of science are not the phenomena of nature but constructs that are advanced by the scientific community to interpret nature » (Driver et al. 1994, p. 5).

En effet, la science ne nous livre pas la vérité absolue, mais nous offre un moyen d'interpréter les événements de la nature et de faire face au monde. Le savoir scientifique est inventé pour donner un sens à des observations, qui sont à leur tour ouvertes à des interprétations individuelles (Matthews, 1992). Par conséquent, le savoir scientifique se compose des entités formelles spécifiques et des relations entre elles qui les relient :

« ...the symbolic world of science is now populated with entities such atoms, electrons, ions, fields and fluxes, genes and chromosomes... » (Driver et al. 1994, p. 6).

Des chercheurs constructivistes en enseignement des sciences, tels que Driver et Easley (1978) et Novak (1977), ont lancé un mouvement qui lie les travaux antérieurs des sciences cognitives, tels que la théorie de Piaget, et le contexte des explications des apprenants :

« Achievement in science depends to a greater extent upon specific abilities and prior experience than general levels of cognitive functioning » (Driver et Easley, 1978, p. 66)

La vision constructiviste de l'apprentissage prétend que les apprenants construisent activement plutôt que d'acquérir leurs propres connaissances, fortement influencées par ce qu'ils savent déjà. En effet, Ausubel (1968, p. vi) avait anticipé cette idée lorsqu'il a écrit sa célèbre phrase :

« If I had to reduce all of educational psychology to just one principle I would say this : the most important single factor influencing learning is what the learner already knows. Ascertain this and teach him accordingly. »

La connaissance n'est pas transplantée dans l'esprit des apprenants comme si l'esprit était une table rase (Cobern, 1993). Alternativement, les apprenants donnent un sens au monde en interprétant la nouvelle information en fonction de ce qu'ils savent déjà :

« Fundamentally, constructivism asserts that we learn through a continual process of constructing, interpreting, and modifying our own representations of reality based on our experiences with reality. »(Jonassen, 1994, p. 35)

Les enseignants doivent prendre en compte non seulement les connaissances, mais aussi les conceptions antérieures des apprenants avant l'enseignement formel :

« Prior knowledge is used to make sense of experience and as a consequence; teachers should give close attention to the prior knowledge of each student in the class » (Tobin, 1990, p. 31).

Le rôle de l'enseignant est donc de caractériser ces conceptions, dures et tenaces à déloger, que les apprenants apportent avec eux en classe et de fournir des expériences qui les aideront à construire des nouvelles connaissances du monde (Duit et al., 1994). En ce sens, l'enseignant constructiviste agit comme un guide de médiation entre le monde quotidien des apprenants et le monde de la science (Driver et al., 1994).

En somme, l'enseignement constructiviste donc est celui qui nourrit et encourage l'autonomie des apprenants et leur volonté de prendre l'initiative; fait des interventions et intègre les réactions des apprenants, en se basant sur la conception ainsi que sur la construction du contenu de ses leçons et stratégies d'enseignement; stimule leur curiosité et les engage dans des expériences pouvant engendrer des contradictions par rapport à leurs hypothèses initiales et générer ainsi davantage de discussions et interactions entre enseignant et apprenants, et ces derniers, entre eux-mêmes (Brooks et Brooks, 1993). Ainsi l'apprentissage est considéré comme un processus actif de construction de sens plutôt que l'acquisition de connaissances; l'enseignement doit donc supporter cette construction plutôt que transmettre du savoir. Effectivement, la construction de la connaissance ne peut être faite que dans un contexte où l'étudiant s'engage d'une manière active, peut établir des liens avec ses différentes connaissances et construire un sens à ses apprentissages, peut utiliser différentes façons de représenter ce qu'il apprend lorsqu'il est face à un problème ou à une question, confronte ses hypothèses avec ses pairs et ses propres observations, et possède le temps d'échanger et de réfléchir sur sa pratique (Jonassen et al., 1999).

Cependant, la connaissance scientifique n'est pas indépendante des savants, mais représente une connaissance socialement construite, validée et basée sur des expériences réelles :

« ...science is viewed as a set of socially negotiated understandings of the events and phenomena that compromise the experienced universe » (Tobin et Tippins, 1993, p. 4).

Nous croyons ainsi que l'apprentissage n'est pas une affaire individuelle, mais une affaire sociale. En ce sens, Vygotsky porte une importance particulière sur le rôle de la communauté des apprenants et introduit le concept de la zone proximale de développement comme support et échafaudage à l'apprentissage (Vygotsky, 1978). Dans la section suivante, nous allons faire une revue des travaux de Vygotsky.

1.3. Socioconstructivisme de Vygotsky

Pour Vygotsky, la compréhension des phénomènes naturels ou scientifiques se construit dans l'interaction sociale avec la médiation du langage; elle met en jeu un fonctionnement psychologique à la fois social et individuel. La connaissance scientifique et l'activité se situent sur deux plans : d'abord social, puis individuel.

Le socioconstructivisme de Vygotsky (1978) reconnaît que l'apprentissage est une activité sociale dans laquelle les apprenants sont impliqués dans la construction consensuelle du sens à travers des discussions et des négociations avec les pairs et les enseignants. Le socioconstructivisme repose donc sur deux principes : le premier situe nécessairement le sujet agissant dans ses rapports avec d'autres humains, à savoir le rôle de la communauté des apprenants. Ainsi la production des discours mobilisés par des fonctions de communication spécifiques est exercée dans une zone, dite proximale de développement, qui caractérise la dynamique de développement de l'apprenant et de la réussite de son activité intellectuelle. Le deuxième principe d'inspiration vygotkienne clame le rôle de médiation lié à l'activité personnelle intermentale par la mise en place d'une zone proximale de développement comme support à l'apprentissage.

Vygotsky met l'accent sur la spécificité des apprentissages scientifiques et propose la distinction entre concepts scientifiques et concepts quotidiens. Il affirme que « les concepts scientifiques ne se développent pas du tout comme les concepts quotidiens »

(Vygotsky, 1997, p. 281). Il précise que les concepts quotidiens se forment dans l'expérience, ont une portée immédiate et sont peu abstraits. En revanche, les concepts scientifiques sont transmis par le langage, ont une portée générale, et forment des systèmes. Leur faiblesse résulte de leur « verbalisme » et de leur « insuffisance saturation en concret ». Ainsi, les rapports des concepts quotidiens et des concepts scientifiques avec l'expérience et avec la formulation sont différents :

« L'enfant formule mieux la loi d'Archimède qu'il ne définit ce que c'est qu'un frère. Le concept de frère est saturé d'expérience et ne résulte pas d'une explication du maître » (Vygotsky, 1997, p. 292).

1.4. Socioconstructiviste et apprentissage des sciences

L'apprentissage des sciences dans un cadre socioconstructiviste implique que les étudiants construisent un sens du monde à travers des processus à la fois individuel et social (Driver et al, 1994). Le savoir est personnellement construit, mais socialement médié (par médiation) :

« ... the individual and social components [of constructivism] being parts of a dialectical relationship where knowing is seen dualistically as both individual and social, never one alone, but always both » (Tobin et Tippins, 1993, p. 21).

Les étudiants ont l'opportunité de tester la viabilité de nouvelles connaissances en revendication avec leurs pairs et de lier ces nouvelles idées avec des expériences personnelles et des connaissances existantes (McRobbie et Tobin, 1997). Ainsi, à partir d'une perspective socioconstructiviste, le développement de la compréhension par écrit et par débat d'idées avec les pairs est un élément essentiel de l'apprentissage; cela implique l'articulation, la clarification, l'élaboration, la négociation et la construction du consensus :

« Accordingly, students should be encouraged to be involved in putting language to ideas, testing their understandings with peers and listening and making sense of the ideas of other students »(p. 197).

Les étudiants peuvent identifier et articuler leurs propres opinions, échanger des idées et réfléchir sur les points de vue des autres étudiants. Ils procèdent à une réflexion critique sur leurs propres idées et, si nécessaire, les réorganisent et négocient leurs significations partagées (Prawat, 1993).

1.4.1. Construction du savoir partagé

Selon Tobin (1990), la construction du savoir partagé par les pairs à travers des discussions permet aux apprenants de s'exprimer, de clarifier leurs propres idées, d'écouter attentivement les opinions de leurs pairs. Les discussions et les conversations offrent aux apprenants l'opportunité de réfléchir sur leurs propres idées et celles des autres, de justifier, de défendre et de débattre de leurs propres points de vue dans le but d'élaborer ensemble un sens commun. La promotion du dialogue et de la réflexion à travers l'apprentissage par les pairs est la plus importante :

« Social constructivists believe that meaning making is a process of negotiation among the participants through dialogues or conversations » (Jonassen et al., 1999, p. 5).

L'expression des idées des apprenants est une première étape pour clarifier leurs idées (Gallas, 1995), aiguïser leurs conceptions, et conduit souvent à la reconnaissance de nouvelles connexions (Linn et Hsi, 2000).

Le processus de réflexion implique activement le suivi, l'évaluation et la modification de la pensée et sa confrontation à la fois aux modèles d'experts et des pairs (Duffy et Cunningham, 1996). Ce type de réflexion exige une combinaison des deux réflexions individuelle et collaborative (Lin et al., 1999). Sur le plan social, les processus tels que l'explication, la clarification, l'élaboration, la justification, l'évaluation, l'analyse, la synthèse, le questionnement et la restructuration ont lieu lorsque les étudiants réfléchissent sur ce qu'ils ont appris et lorsqu'ils interagissent avec leurs pairs (Tobin, 1990).

La discussion des pairs rend visibles les idées aux autres étudiants en classe et donne aux apprenants des opportunités importantes de partager différents points de vue, d'écouter attentivement les idées des autres et de promouvoir le respect mutuel entre les pairs (Linn et Hsi, 2000). Le processus d'écoute est plus facile lorsque les étudiants utilisent un langage approprié pour leur âge et leur milieu (Hand et al., 1997).

La négociation de la signification entre les étudiants va bien au-delà du rôle traditionnel des étudiants qui s'entraident pour obtenir la bonne réponse à un problème; elle concerne la création des opportunités d'expliquer et de justifier aux autres leur développement d'idées, d'écouter, de comprendre et de réfléchir sur la viabilité des autres idées et ensuite, de réfléchir sur la viabilité de leurs propres idées (Taylor et al., 1994).

Justifier et choisir les théories viables au cours de discussions entre les pairs est un élément clé de l'apprentissage dans un cadre socioconstructiviste (Tobin, 1990, p. 32).

Ainsi, par ces échanges entre pairs, les étudiants prennent conscience des idées des autres, cherchent la confirmation de leurs propres idées et renforcent ou rejettent leurs propres idées (Maor et Taylor, 1995).

Comme les étudiants construisent des connaissances partagées dans les groupes de pairs, les enseignants jouent le rôle de soutien des interactions des étudiants avec leurs pairs et le monde physique (Taylor et al., 1994). Ils aident les étudiants à reconstruire et évaluer leurs conceptions existantes et négocier la construction de connaissances scientifiquement acceptables (Hand et al., 1997). Les enseignants doivent promouvoir le respect mutuel entre les étudiants en leur expliquant le principe de base du constructivisme.

1.4.2. L'apprentissage par les pairs

L'efficacité de l'apprentissage par les pairs est généralement acceptée dans les milieux éducatifs depuis les années 1980 et constitue un abandon du rôle traditionnel de l'enseignant comme source de connaissance. Damon et Phelps (1989) préconisent trois grandes approches de l'apprentissage par les pairs. Premièrement, l'enseignement par les pairs se produit lorsqu'un étudiant enseigne à un autre étudiant dans une relation « expert/novice » semblable à la relation traditionnelle « professeur/étudiant » où l'un transmet à l'autre une expertise. Deuxièmement, l'apprentissage coopératif est un terme générique qui couvre une diversité des approches d'apprentissage en équipes telles que l'utilisation des équipes, les réalisations des groupes ou des centres d'apprentissage. Troisièmement, à la différence de l'apprentissage coopératif où différents rôles sont pris, la collaboration des pairs implique que les étudiants travaillent conjointement sur la même tâche et commencent presque avec le même niveau de compétence. Damon et Phelps (1989) soulignent que toute activité de petit groupe peut impliquer une combinaison de ces types.

Les avantages de l'apprentissage coopératif sont bien documentés. Des recherches ont confirmé que l'apprentissage coopératif a un effet positif sur la réussite des étudiants, la résolution de problèmes et la motivation à apprendre (Quinn et al., 1995; Slavin, 1990). Par

exemple, Johnson et Johnson (1987) ont fait une méta-analyse de 378 études comparant les réalisations de personnes qui travaillaient dans des équipes coopératives. Plus de 50 % favorisaient la coopération, tandis que moins de 10 % étaient en faveur des efforts individuels. Des équipes coopératives ont favorisé la réussite académique individuelle et ont renforcé la motivation pour tous les étudiants indépendamment de leur origine ethnique et de leur âge. L'apprentissage coopératif encourage mieux les attitudes à l'égard des pairs et l'estime de soi (Slavin, 1990), mais parfois, il met trop l'accent sur les rôles de gestion, plutôt que sur les rôles cognitifs (Rogoff, 1990).

Pour sa part, la collaboration des pairs (Peer collaboration) utilise les groupes qui ne sont pas très structurés, où les rôles spécifiques ne sont pas assignés et dont les tâches ont tendance à être plus ouvertes pour tous (Blumenfeld et al., 1996). Elle offre un environnement favorable qui encourage les étudiants à expérimenter et à tester de nouvelles idées, et à faire un réexamen critique de leurs propres conceptions. La collaboration fournit un moyen riche de découverte mutuelle, de rétroaction et de partage d'idées et elle est particulièrement utile pour des tâches qui nécessitent de nouvelles idées et le développement d'une connaissance approfondie (Damon et Phelps, 1989).

Des questions importantes doivent être prises en compte dans n'importe quel type de groupe d'apprentissage, incluant le choix des membres du groupe, les rôles des enseignants et des étudiants, la nature des activités et l'évaluation des activités du groupe. L'encouragement d'un bon travail de groupe dépend d'un développement ouvert, des tâches d'investigation qui favorisent l'articulation, la discussion et le débat, ainsi que la création de groupes dont l'objectif est d'encourager la responsabilité individuelle et d'offrir des stratégies et le soutien nécessaire à la promotion des interactions entre les étudiants (Slavian, 1990).

1.5. Récapitulation

Dans le cadre de notre travail, nous prenons les théories de Piaget et de Vygotsky de façon complémentaire. À ce sujet, Vergnaud (2000) précise :

« La plus grande différence au fond est que Piaget privilégie l'interaction de l'enfant avec le monde des objets physiques et prend comme première référence l'action matérielle sur et avec les objets, tandis que Vygotsky privilégie l'interaction de l'enfant avec autrui et prend comme

référence le langage. Ce n'est pas une mince différence évidemment, mais en même temps on voit bien que les deux approches sont complémentaires, non pas contradictoires. »

À partir de cette rapide revue sur les travaux de Piaget et Vygotsky, nous retenons qu'au cours de l'apprentissage, l'étudiant est en interaction avec les objets/événements du monde matériel, avec les autres étudiants et avec le professeur. Ces interactions mettent en jeu le langage et plus largement la médiation. Ces situations d'interaction jouent un rôle essentiel dans l'apprentissage. Ils permettent la formation des concepts au plan intrapsychologique, même s'il ne s'agit pas d'une reproduction du plan social externe. Cependant, concernant la restructuration du plan intrapsychologique, nous trouvons plus opérationnel le constructivisme de Piaget repris dans les travaux sur le changement conceptuel menés dans le cas de l'apprentissage des sciences. Nous revenons sur ce point avec plus de détails à la section 3 de ce chapitre. Nous retenons également que la collaboration, selon lui, fournit un moyen riche de découverte mutuelle, de rétroaction et de partage d'idées et elle est particulièrement utile pour des tâches qui nécessitent de nouvelles idées et le développement d'une connaissance approfondie (Damon et Phelps, 1989).

2. Apprentissage collaboratif

Dans cette section, nous présentons la notion de l'apprentissage collaboratif, ses composantes, ainsi que les comportements sociaux et les habiletés cognitives nécessaires à l'accomplissement d'une tâche académique.

2.1. Définition

Brufee (1993) propose une première définition très générale de l'apprentissage collaboratif comme approche d'apprentissage dans laquelle les étudiants sont invités à travailler ensemble.

« Collaborative learning is an approach to teaching and learning in which students are required to work together in the learning process, and to reach a consensus through negotiation to accomplish group task. » (Brufee, 1993)

Henri et Lundgren-Cayrol (2001) proposent une définition plus complète de l'apprentissage collaboratif :

« L'apprentissage collaboratif est une démarche active par laquelle l'apprenant travaille à la construction de ses connaissances. Le formateur y joue le rôle de facilitateur des apprentissages alors que le groupe y participe comme source d'information, comme agent de motivation,

comme moyen d'entraide et de soutien mutuel et comme lieu privilégié d'interaction pour la construction collective des connaissances. » (Henri et Lundgren-Cayrol, 2001)

Toujours selon ces mêmes auteurs, la démarche collaborative couple la démarche de l'apprenant à celle du groupe. L'apprenant s'engage à travailler avec le groupe et fait preuve d'autonomie en assumant la responsabilité de son apprentissage, tandis que le groupe joue le rôle de catalyseur de l'apprentissage. La démarche collaborative vise une compréhension partagée qui se reflète au plan individuel.

2.2. Composantes

Pour Henri et Lundgren-Cayrol (2001), trois composantes sont essentielles à un apprentissage collaboratif :

- la communication pour alimenter la réflexion sur l'objet de la collaboration, pour réaliser des tâches et pour tisser les relations;
- l'engagement pour assurer une contribution cognitive et sociale significative, pour se mettre au service du groupe et pour mobiliser les efforts en vue de la réussite;
- la coordination pour optimiser l'efficacité de l'activité du groupe.

Selon Dillenbourg (1999), le but de l'apprentissage collaboratif est de soutenir l'enseignement dans un objectif éducatif spécifique par une activité coordonnée et partagée, au moyen d'interactions sociales entre les membres du groupe. Zurita et Nussbaum (2004) précisent que l'apprentissage collaboratif est souvent vu comme un stimulus pour le développement cognitif, par sa capacité de stimuler l'interaction sociale et l'apprentissage des membres d'un groupe. Deux approches théoriques principales expliquent le rôle de l'interaction sociale dans l'apprentissage collaboratif. D'abord, l'approche piagétienne qui favorise l'apparition de conflits cognitifs/sociocognitifs; ensuite la perspective de Vygotsky, qui considère que le changement individuel est présenté comme le résultat d'une intériorisation des activités normatives, telles que la coordination des membres et l'interaction des processus constructifs réalisées par la médiation de communication entre eux (Vygotsky, 1978). Ces deux approches théoriques présentent les premières composantes clés pour évaluer des activités face à face de l'apprentissage collaboratif :

- la présence des conflits, donc, la nécessité de la négociation pour les résoudre;
- l'importance de la coordination et de l'interactivité;
- la communication des membres.

Adams et al. (1990) ont identifié quelques caractéristiques pédagogiques de l'apprentissage collaboratif :

- la collaboration fonctionne davantage lorsque les étudiants sont invités à résoudre un problème réel.
- L'enseignant fournit graduellement un environnement collaboratif où tout le monde est considéré comme une ressource.
- Le fait de penser en équipe « *sinks or swims together* » peut aider les étudiants à apprendre mieux.
- Un environnement collaboratif fonctionne mieux lorsque les risques et les erreurs sont autorisés.
- L'apprentissage collaboratif permet de pratiquer une démarche de résolution de problèmes.
- Les individus apprennent mieux lorsqu'ils sont responsables de leurs propres sous-tâches au sein d'un groupe.
- Les étudiants les moins doués au niveau académique développent davantage des attitudes d'apprentissage quand ils travaillent avec des apprenants plus doués.
- Les enseignants et les étudiants changent souvent de rôles en tant qu'apprenants.

Dans un environnement d'apprentissage collaboratif, le leadership est partagé; la répartition des tâches de chaque membre du groupe est une étape essentielle. Les apprenants doivent ainsi apprendre des habiletés cognitives qui leur permettront d'accomplir leurs tâches collaboratives. Adams et al. (1990) ont identifié cinq habiletés : 1) la clarification ou l'élaboration, comprenant l'interprétation ou la construction des connaissances en se basant sur les informations fournies par les autres membres; 2) le partage des informations appropriées; 3) la recherche des informations pertinentes; 4) la synthèse des informations partagées et enfin, 5) la gestion d'un processus d'apprentissage qui soutient le groupe à atteindre son objectif. Ces auteurs ont également relevé cinq

comportements sociaux qui permettent aux apprenants de fonctionner en groupe : 1) le compromis qui implique de faire une concession aux autres membres du groupe lorsque cela est nécessaire; 2) l'empathie et l'encouragement, plus précisément le maintien d'un sentiment d'empathie pour ses pairs et de compréhension; 3) la prise de la parole qui vise à donner à tous les membres la chance de prendre la parole dans le groupe; 4) l'harmonisation des interactions dans le groupe; 5) le partage du sentiment d'appartenance au groupe et aux procédures.

2.3. Étapes du processus de l'approche collaborative

L'apprentissage peut être ainsi compris comme un processus dynamique qui se déroule dans un contexte social où le partage, la confrontation et la négociation conduisent les apprenants à construire leurs propres connaissances. Selon Dillenbourg et Schneider (1995), l'apprentissage collaboratif aboutit à des formes d'interactions qui peuvent conduire à la stimulation des mécanismes d'apprentissage suivants :

- **Un conflit.** Lorsqu'une mésentente survient entre les pairs, ils doivent entamer des conversations et prendre des mesures pour arriver à une résolution mutuellement satisfaisante. Ceci peut affecter d'une manière positive le rendement au niveau de l'apprentissage.
- **Une solution alternative.** Lorsqu'un désaccord survient et les apprenants n'arrivent pas à une entente acceptable, ils vont souvent proposer une solution alternative.
- **Une auto-explication.** Il est important d'établir une communication bidirectionnelle entre apprenants lors d'une tâche collaborative; les conversations entretenues mènent à la verbalisation des connaissances acquises. L'étudiant apprend lorsqu'il réinterprète son apprentissage selon les explications de son partenaire.
- **Une intériorisation.** Les concepts discutés lors des interactions verbales s'intègrent aux schèmes cognitifs des partenaires; l'intériorisation peut être comparée à une assimilation des nouvelles connaissances acquises lors des discussions entre pairs.
- **Une appropriation.** L'appropriation est un processus qui est plus concret que l'intériorisation.

- **Un partage des tâches cognitives.** L'étudiant apprend en observant son partenaire. Quand deux membres collaborent à une tâche scolaire, ils partagent les tâches cognitives requises par celle-ci. Cette division des tâches cognitives permet à chaque partenaire de trouver des ressources nécessaires à l'achèvement de la tâche.
- **Une gestion de l'apprentissage.** Souvent, les membres du groupe doivent justifier leur travail. Ceci permet aux apprenants de gérer leur apprentissage et de vérifier aussi la compréhension de leur partenaire.
- **Une socialisation.** La détection des mésententes ou des conflits qui peuvent apparaître est un facteur important qui encourage la socialisation.

2.4. Limites de l'apprentissage collaboratif

Il arrive parfois que le processus de l'apprentissage collaboratif soit ralenti par des interventions et ne fonctionne pas correctement. Dillenbourg et Schneider (1995) synthétisent ces conditions en trois critères :

- **La composition du groupe.** La composition du groupe est capitale dans le succès de l'apprentissage collaboratif. Elle doit être définie selon la taille du groupe et son hétérogénéité. Les petites équipes semblent mieux fonctionner que les grandes équipes. L'hétérogénéité du groupe a fait l'objet de plusieurs études. Elle renvoie aux différences objectives ou subjectives des apprenants qui comprennent l'âge, l'intelligence, le développement et le rendement académique. Pour assurer des interactions efficaces, l'hétérogénéité du groupe doit être optimale.
- **Les caractéristiques de la tâche.** Certaines tâches ne nécessitent pas de collaboration tant elles sont simples, mais elles requièrent la participation active du groupe. Ainsi, les consignes des activités collaboratives doivent mener à des interactions intelligentes, efficaces et pertinentes.
- **Les modes de communication.** Pour maximiser la probabilité des interactions, l'enseignant doit mettre à la disposition des participants les moyens de communication qui leur permettent de se concentrer uniquement sur la tâche à accomplir.

Adams et al. (1990) proposent des pistes à suivre pour assurer une collaboration efficace. Ils suggèrent que les apprenants doivent travailler sur des problèmes pertinents. Pour ce faire, les membres du groupe doivent maximiser les interactions entre eux pour arriver à la résolution du problème. Ces interactions sont importantes pour assurer des collaborations efficaces en vue d'aboutir à un accord qui satisfait les membres de l'équipe. Adams et al (1990) et Dillenbourg et Schneider (1995) soulignent, en particulier, l'importance accordée aux interactions entre apprenants dans le processus collaboratif.

2.5. Les interactions dans une situation de collaboration

Rappelons que le socioconstructivisme met l'accent sur le rôle des interactions sociales multiples dans la construction des savoirs. Repman et Logan (1996) identifient quatre types d'interactions dans une situation d'apprentissage :

- **Interaction entre apprenant et contenu.** C'est l'interaction entre l'apprenant et l'information présentée qui devrait mener à l'acquisition des connaissances. Cette interaction repose sur les connaissances de base que l'apprenant a construites à partir des expériences d'apprentissage antérieures et sur l'habileté de l'apprenant à interagir avec le contenu présenté. Dillenbourg et Schneider (1995) ont identifié deux entraves à cette relation : le style d'apprentissage du participant et la pertinence de la matière enseignée telle que perçue par l'apprenant.
- **Interaction entre apprenant et apprenant.** Les interactions se trouvent au cœur de n'importe quelle situation d'apprentissage. Les étudiants qui interagissent souvent avec leurs collègues participent activement à leur apprentissage et améliorent leur niveau de motivation. Notons deux éléments qui peuvent affecter les interactions entre apprenants : l'absence d'un sentiment d'appartenance ou la diversité des étudiants qui proviennent de différentes disciplines. Des activités d'apprentissages tels que des simulations ou des débats offrent aux étudiants l'occasion de s'exprimer et d'interagir avec leurs collaborateurs.
- **Interaction entre apprenant et interface.** Ceci réfère à la convivialité de la technologie utilisée. Le participant et le professeur doivent être habiles à manipuler cette technologie, sinon cela risque de devenir un obstacle à

l'apprentissage. Il se peut que l'enseignant soit obligé de préparer des guides et des consignes détaillés pour l'utilisation des outils de simulation.

- **Interaction entre apprenant et professeur.** Elle dépend des habiletés de communication entre l'apprenant et l'enseignant (Repman et Logan, 1996). Des expériences partagées fournissent une bonne base pour développer un rapport de travail. Comme gestionnaire de l'apprentissage, le professeur devient un guide qui dirige l'apprenant dans ses démarches.

Il est important que ces quatre types d'interactions soient intégrés à des situations d'apprentissage conçues selon l'approche collaborative, tel que proposés par Repman et Logan (1996). Il est donc essentiel d'offrir aux apprenants les meilleures éventualités d'interaction pour qu'ils soient soutenus dans leurs démarches pédagogiques et dans le processus de collaboration.

2.6. Sommaire des principes de l'apprentissage collaboratif

L'approche collaborative ne divise pas les tâches en petites parties constituantes et ne donne pas de récompenses. Elle valorise davantage une interdépendance à caractère associatif. Ce qui importe surtout pour les membres, c'est de mettre en commun leurs idées, de faire part de leurs réalisations et de trouver auprès du groupe une inspiration, un soutien et un appui (Henri et Lundgren-Cayrol, 2001).

Selon Adam et al. (1990), l'apprentissage collaboratif aboutit à des formes d'interactions qui peuvent conduire à la stimulation des mécanismes de collaboration : clarification/explication, partage du travail collaboratif, recherche des informations, construction de connaissances, gestion de groupe/équipe, conflit, compromis, encouragement et socialisation. Dans une activité d'apprentissage collaboratif, l'apprenant participe activement à son apprentissage, discute et négocie des solutions, partage ses connaissances avec ses pairs, se motive et motive ses pairs, interagit positivement avec ses pairs, fait preuve de leadership partagé, clarifie ou élabore des informations et analyse des informations. L'enseignant gère le milieu éducatif (évaluation, etc.), établit les paramètres de l'environnement pédagogique pour maximiser les interactions, explique le processus

collaboratif aux apprenants, clarifie les objectifs de la matière, donne des directives selon les besoins et agit comme guide et animateur lors des discussions.

Récapitulons, l'apprentissage collaboratif développe les habiletés cognitives et sociales des apprenants, les introduit dans une communauté d'apprenants et développe la pensée critique.

Rappelons qu'au cours de l'apprentissage, l'élève est en interaction avec les pairs et avec les objets/événements du monde matériel. L'interprétation de ces événements est fortement influencée par les conceptions antérieures des élèves. Dans la section suivante, nous présentons les principaux travaux sur l'évolution de ces conceptions menés dans le cas de l'apprentissage des sciences; il s'agit de retracer les principaux modèles du changement conceptuel.

3. Changement conceptuel

Dans cette section, nous abordons la notion de changement conceptuel. Ensuite, nous exposons succinctement les principaux modèles du changement conceptuel.

3.1. Prise en compte des conceptions initiales

Prendre en considération les conceptions antérieures des élèves s'est avéré le point de départ d'un apprentissage tangible. Selon Astolfi (1997), cette prise en compte de ces conceptions soutient la mise en place des situations pour identifier les conceptions initiales des apprenants, la construction de situations de confrontation entre les différentes conceptions, et enfin la conception de situations problématiques qui peuvent faire évoluer les conceptions antérieures de l'apprenant. Il faut donc envisager ou fixer un processus actif pour guider les apprenants vers l'acquisition des concepts scientifiques.

3.2. Changement conceptuel

L'un des objectifs de l'apprentissage des sciences est l'évolution des conceptions initiales des élèves vers des conceptions plus réfléchies ou plus proches de celles des scientifiques, ou les deux à la fois. Cette évolution est parfois appelée changement conceptuel (Duit, 1999).

Duit et Treagust (2003) considèrent le changement conceptuel comme un processus graduel où les conceptions initiales doivent être fondamentalement réorganisées pour permettre une compréhension du savoir enseigné. Le but du changement conceptuel n'est pas facile à atteindre. En effet, les élèves comprennent parfois une nouvelle théorie, mais ne croient pas en celle-ci; les élèves peuvent aussi soutenir fermement que leur idée initiale est exacte et ignorer certaines données pour préserver leur première opinion; les élèves peuvent manifester peu d'intérêt pour le phénomène étudié (Duit, 1999). Nous allons couvrir brièvement dans la partie suivante les principaux modèles de changement conceptuel.

3.3. Revue sur les principaux modèles de changement conceptuel

Nous présentons succinctement la position de quelques psychologues ou didacticiens sur le changement conceptuel.

3.3.1. Modèle de Posner et al.

Le modèle de Posner, celui qui est le plus souvent cité, est à la base de nombreuses recherches. Il s'est inspiré des travaux de Piaget (notamment du principe d'accommodation) et de la philosophie des sciences adoptée par Kuhn (1962), Lakatos (1970) et Toulmin (1972). Selon ces philosophes, la science n'évoluerait pas par accumulation de connaissances, mais plutôt par rupture. Posner et al. (1982) supposent que l'apprentissage des élèves est une activité rigoureuse et identique à celle des scientifiques. Ils croient que les anomalies et les idées fondamentales sur la science et la connaissance sont particulièrement importantes pour mener à un changement de conception. Ces anomalies peuvent provoquer un conflit cognitif capable d'inciter l'apprenant à lever cette contradiction; ce conflit mène à l'accommodation et par conséquent, à la construction de nouvelles connaissances. Selon ce modèle, le changement se produit généralement si les quatre conditions suivantes sont respectées (Posner et al, 1982) :

- *il doit y avoir une insatisfaction face aux conceptions existantes;*
- *une nouvelle conception doit être intelligible;*
- *une nouvelle conception doit être plausible;*
- *une nouvelle conception doit être féconde.*

Ces quatre conditions proposées peuvent être considérées comme des traces pour traiter le changement conceptuel. Ce modèle de nature épistémologique est critiqué par un bon nombre de chercheurs. Plusieurs limites sont notées. En effet, il y a peu de distinction entre l'histoire des sciences et le développement des connaissances de l'individu, ce qui peut donner une confusion entre un paradigme épistémologique et un paradigme d'apprentissage, entre une révolution scientifique et un changement conceptuel ainsi qu'entre l'histoire d'un scientifique ou chercheur et celle d'un élève (Potvin, 2002).

3.3.2. Modèle de Chi

Le modèle développé par Michelene Chi (1992) adopte une analyse épistémologique des concepts scientifiques visant à clarifier la transition conceptuelle exigée par l'apprentissage de certaines conceptions scientifiques. La construction théorique de ce modèle est basée sur les éléments suivants :

- Toute entité appartient à une catégorie ontologique dotée d'un certain nombre d'attributs. Il y a trois grandes classes ontologiques : les entités (objets/substances), les processus (événements), et les états mentaux (les états émotionnels/les états cognitifs).
- Dans une situation d'apprentissage, les attributs livrés par l'apprenant à l'entité qui est en jeu peuvent être repérés dans son discours et classés dans une catégorie ontologique. L'entité ou le concept hérite de tous les attributs de la catégorie.
- L'apprenant a du mal à acquérir les concepts scientifiques qui appartiennent à des catégories ontologiques particulières, parce qu'il les catégorise la plupart du temps comme des événements.

Chi pense que les conceptions erronées et les difficultés d'apprentissage de la physique seraient le résultat d'un décalage ou d'une incompatibilité entre la catégorie ontologique que la science attribue au concept et celle que le sujet lui assigne effectivement. Elle en conclut qu'il faut donner aux élèves une méta-instruction explicite en même temps qu'on leur enseigne le concept en jeu.

Chi (2008) distingue trois types de changement conceptuel dans l'apprentissage : la révision de croyance, la transformation du modèle mental et le changement catégoriel. Lorsqu'il y a changement d'une catégorie ontologique à une autre, il peut y avoir deux types de changement, le premier est le changement d'une catégorie à une autre (changement conceptuel fort) ou d'une sous-catégorie à une autre (changement conceptuel moins fort).

Le courant de Chi a suscité certaines critiques, entre autres, sur son applicabilité restreinte au cas du savoir scientifique, et non à une utilisation quotidienne (Buty et cornuéjolos, 2003) et sur la sélection des catégories fondamentales de classification (Duit, 1999).

3.3.3. Modèle de Carey

Susan Carey(1985) a proposé un modèle de changement conceptuel radical en supposant l'existence des « théories intuitives » des enfants en considérant que les connaissances naïves sont structurées en systèmes cohérents, qui jouent un rôle analogue à celui que jouent les théories dans le développement des connaissances scientifiques. Selon l'auteure, les concepts sont considérés comme des représentations mentales unitaires, (objet, matière et poids); les croyances, quant à elles, sont des propositions représentées mentalement et elles sont constituées de concepts. Ainsi, les théories intuitives sont définies comme étant des structures mentales complexes formées par des concepts :

« Theories are complex mental structures consisting of a mentally represented domain of phenomena and explanatory principle that account for them » (Carey, 1991, p. 258)

Ces théories, selon Carey, disposent d'un pouvoir explicatif et prédictif du fait qu'elles sont révisables et cohérentes à l'intérieur de leur domaine d'application.

En étudiant les connaissances des enfants sur le monde du vivant, Carey(1985) indique que, vers l'âge de dix ans, le domaine de la biologie est compris comme indépendant des autres domaines. Ce domaine serait interprété en termes psychologiques. Elle distingue deux réseaux conceptuels différents qui devront se substituer l'un à l'autre; d'une part le système de compréhension des enfants, puisqu'elle considère que le jeune enfant possède des systèmes de connaissances noyaux (core knowledge) de nature

conceptuelle sur des objets physiques, des agents intentionnels, des nombres et de l'espace; d'autre part, le système de compréhension chez les adultes.

Selon ce modèle, le développement de ces théories intuitives est conçu comme une restructuration conceptuelle. Carey a ainsi distingué deux types de restructurations : une restructuration faible et une restructuration forte. Dans le cas d'une restructuration faible, il n'existe aucune incompatibilité entre les deux théories initiales et finales; l'auteure envisage deux processus principaux pour ce type d'apprentissage, soit la création de concepts d'ordre supérieur et l'enrichissement des liens entre les concepts. Dans une restructuration forte, il s'agit de l'apprentissage où les concepts à la base des deux théories ne sont pas mutuellement traduisibles; ce modèle accorde une place plus centrale à la question de compréhension, en négligeant la question de l'acceptation; il étudie les concepts à la base des théories intuitives et se contente de décrire la restructuration conceptuelle.

3.3.4. Modèle de diSessa

Andrea diSessa (1982, 1988) a mené d'importantes recherches en didactique au sujet de la physique naïve (folk physics). Il s'est notamment intéressé à la compréhension intuitive des étudiants à propos des phénomènes en mécanique, son but étant de fonder une épistémologie de la physique intuitive. Il ne s'agit pas de se questionner sur la nature du cadre théorique sur lequel reposent les conceptions des élèves, mais sur les mécanismes souvent intuitifs menant à la formulation d'une interprétation des données de l'expérience sensible et à l'élaboration de conceptions. Il insiste sur la très grande diversité des structures de connaissances à prendre en compte et pense que la physique intuitive consiste à utiliser un grand nombre de petits fragments de connaissances plutôt qu'un petit nombre de structures théoriques. L'auteur utilise des structures suffisamment petites pour être capable de retracer leur évolution dans le détail.

DiSessa postule que les conceptions des élèves reposent davantage sur des structures interprétatives intuitives que sur des théories bien élaborées. Il présente la notion de « classe de coordination » comme un ensemble de façons reliées systématiquement pour collecter de l'information sur le monde (DiSessa et Sherin, 1998). Ces classes de

coordination sont composées des stratégies de lecture d'information sur la situation et d'un réseau causal qui est à son tour constitué des équations et des primitives phénoménologiques ou p-prims. Les p-prims sont des petites entités de raisonnement simple découlant de notre expérience du réel et qui nous servent à organiser et à interpréter les observations. Les p-prims sont très nombreuses et faiblement connectées. Elles ne sont pas activées de la même façon. Elles sont activées par les caractéristiques du contexte jugées importantes pour le phénomène étudié.

Selon DiSessa (1993), les p-prims resteront inchangées au cours de l'apprentissage de la physique newtonienne; ce sont plutôt l'utilisation et la fonction de ces p-prims à l'intérieur d'une classe de coordination qui se développent. Ainsi l'évolution de la physique naïve se fait par un travail complexe, au sein d'une classe de coordination, des p-prims qui la constituent, et le développement de la connaissance scientifique du monde physique qui n'est possible que par une réorganisation des connaissances intuitives.

Selon ce modèle, le changement conceptuel s'accomplit soit par une réorganisation des p-prims (changement facile), soit par un changement des fonctions des p-prims (changement difficile). Ce modèle s'est avéré puissant pour expliquer le détail de l'émergence du sens de la mécanique newtonienne. Cependant, il n'existe que peu de domaines autres que la mécanique qui ont vu l'application d'une telle approche.

3.3.5. Modèle de Larochelle et Désautels

Larochelle et Désautels (1992) proposent un modèle basé sur une analyse épistémologique fortement inspirée du constructivisme radical de Glasersfeld et de travaux en sociologie de la connaissance scientifique. Le constructivisme radical oblige une prise en compte du statut épistémologique de toutes les conceptions considérées respectivement. Le nouveau paradigme que l'on tente de faire intégrer aux élèves repose sur des bases épistémologiques différentes et incompatibles avec l'ancien paradigme. Ainsi, le plus important dans le processus du changement conceptuel est d'identifier et de modifier les engagements épistémologiques des élèves.

Larochelle et Désautels proposent la stratégie du dérangement épistémologique qui consiste à réfléchir d'une façon critique sur les postulats et les finalités qui orientent toute

production du savoir scientifique. L'étudiant doit comprendre le cadre épistémique qui a donné naissance aux conceptions en jeu.

Cependant, deux limites majeures se présentent pour ce modèle :

- La reconnaissance de la valeur arbitraire accordée à la science et l'adoption d'une position relativiste absolue difficile à faire coexister avec les habitudes scientifiques.
- La complexité et le défi que peut poser l'application d'un tel modèle dans la réalité de la classe (Laplante, 1997).

3.3.6. Modèle de Vosniadou

Dans ses recherches en psychologie, Stella Vosniadou s'est intéressée à la structure des connaissances naïves en physique et aux modifications de cette structure au cours de l'apprentissage. À la différence de DiSessa, Stella Vosniadou (2002, p. 67) considère que les éléments de connaissance sont organisés très tôt et forment une structure à réorganiser. Les explications des apprenants sont élaborées à l'aide d'un modèle mental, bien souvent construit sur mesure pour une situation donnée.

« Mental models are dynamic and generative representations which can be manipulated mentally to provide causal explanations of physical phenomena and make predictions about the state of affairs in the physical world. It is assumed that most mental models are created on the spot to deal with the demands of specific problem-solving situations. » (Vosniadou, 1994, p. 48)

Pour Vosniadou (1994), s'il existe très tôt des théories naïves fortes, elles sont largement influencées par l'expérience. De la même façon qu'il est possible en science de distinguer des théories cadres (principes généraux, présupposés, causalités, principes logiques) et des théories plus spécifiques à un domaine donné, Vosniadou considère que les connaissances naïves sont cohérentes et structurées très tôt en « framework theories » et « specific theories ». Elle postule ainsi l'existence des théories cadres et des théories spécifiques, qui déterminent ces modèles mentaux.

Une théorie cadre est un ensemble organisé de présuppositions ontologiques et épistémologiques à la base de la compréhension d'un phénomène et qui contraignent l'apprentissage. Pour Vosniadou, les éléments des cadres théoriques sont des systèmes d'explication relativement cohérents basés sur l'expérience quotidienne et confirmés depuis

des années (Vosniadou, 1994); lorsqu'ils sont assez stables, ils conditionnent l'interprétation du monde et les productions des élèves.

Les théories spécifiques constituent un ensemble de propositions ou croyances reliées qui sont adaptées à des domaines phénoménologiques restreints et qui décrivent les propriétés et les comportements des objets physiques (Vosniadou et Ioannides, 1998). Elles sont soumises aux contraintes fixées par les théories cadres.

Vosniadou utilise la notion de modèles mentaux (mental models). Cette notion relativement classique en psychologie est une représentation mentale des objets et des événements qui serait produite dans chaque situation de résolution de problèmes. Ces modèles mentaux seraient finalement des instanciations des théories spécifiques, créées sur-le-champ ou rappelées à partir de la mémoire à long terme pour des modèles qui auraient déjà été construits pour d'autres situations. Le modèle est donc de très courte durée, très lié à la situation et appelé à évoluer fortement. Pour Vosniadou, les modèles mentaux sont la voie d'entrée par laquelle on peut espérer mieux connaître les structures de connaissances qui les ont générés. Pour ceci, il faut révéler les modèles mentaux par des questions génératives qui n'ont donné lieu à aucun enseignement préalable.

« Understanding the generic mental models individuals use to answer a variety of different questions related to a given concept can provide important information regarding the framework theories and specific theories » (Vosniadou, 1994, p. 48).

Le changement conceptuel se fait, dans un premier temps, par enrichissement en élaborant des modèles mentaux qui tentent de concilier les connaissances nouvelles sans remise en question des théories cadre et des théories spécifiques. C'est seulement lorsque les faits continuent d'invalidier cette théorie que se produit, progressivement, une révision de ses principes fondateurs. Mais ce changement, qui se fait par révision, est plus difficile, car il exige une vérification des théories cadres ou des théories spécifiques. Ces processus de révision des croyances initiales et des théories naïves sont extrêmement lents et graduels. Vosniadou et Ioannides (1998) interprètent donc le changement conceptuel comme un processus graduel dans lequel les structures conceptuelles initiales, basées sur les interprétations enfantines des expériences quotidiennes, sont continuellement enrichies et restructurées.

3.3.7. Modèle de Chinn et Samarapungavan

Chinn et Samarapungavan (2008) ont proposé une approche par modèles. Ils utilisent les modèles scientifiques comme entités épistémiques principales. Ces modèles scientifiques, selon Chinn et Samarapungavan, sont représentatifs et prévus pour représenter des situations réelles. Ces mêmes situations ne sont jamais directement appréhendées, mais elles peuvent être représentées uniquement par des représentations mentales. Ainsi, les modèles scientifiques sont des représentations liées aux représentations mentales des situations réelles. Chinn et Samarapungavan (2008) distinguent donc la notion du modèle scientifique de celle du modèle mental; ils proposent que la modélisation des mécanismes s'effectue à plusieurs niveaux d'analyse à l'aide des deux composantes : des entités qui possèdent certaines propriétés et des activités qui sont gouvernées par des règles. Il importe que ces mécanismes évoluent d'une façon continue tout en indiquant les conditions initiales et finales. Ces auteurs tiennent à couvrir à la fois les obstacles au changement conceptuel relatifs à la croyance et ceux relatifs à la compréhension.

Selon eux, il existe une multitude de facteurs pouvant affecter le changement de croyance, par exemple les caractéristiques des connaissances antérieures (poids de la théorie antérieure, croyances ontologiques, engagements épistémologiques, etc.), celles de la théorie de rechange (sa disponibilité, son intelligibilité, sa précision, sa consistance, etc.), de même que celles des données anormales (leur crédibilité, leur ambiguïté, leur nombre, etc.).

Les obstacles concernant la compréhension des modèles scientifiques peuvent être :

- Des obstacles de nature épistémologique : un apprentissage serait facilité par une meilleure compréhension de la nature des modèles et par la possibilité de proposer une diversité de modèles, même les modèles erronés peuvent être utiles.
- Des obstacles découlant des différences conceptuelles entre les modèles antérieurs et ceux présentés à l'étude. Les modèles scientifiques sont liés aux représentations mentales des situations réelles par un travail de coordination qui peut créer plusieurs difficultés.

- Des obstacles reliés aux relations existant entre les différents modèles scientifiques, l'apprentissage peut être risqué si l'élève ne peut établir un certain nombre de liens entre les divers modèles utilisés, par exemple, les liens contrastants ou des modèles appartenant à des familles de modèles.

En s'appuyant sur leur analyse du changement conceptuel qui suggère que de nombreuses difficultés doivent être surmontées pour concevoir un enseignement efficace, Chinn et Samarapungavan (2008) proposent trois activités de base d'enseignement pour favoriser le changement conceptuel :

- les enseignants expliquent les modèles pour les étudiants;
- les enseignants présentent et expliquent les arguments qui appuient les modèles;
- les apprenants participent à une variété d'activités d'utilisation des modèles (prédiction, modification, conception simple, explication, révision, essai et conception complexe).

Cette approche s'avère intéressante pour notre cas, puisqu'elle accorde une importance beaucoup plus explicite à l'utilisation des modèles scientifiques.

3.3.8. Modèle de Giordan

Giordan (1989) représente les conceptions comme de grands îlots de connaissance plus ou moins indépendants, servant de structures d'accueil qui permettent d'associer de nouvelles connaissances. Il considère que l'apprentissage est une construction de savoirs et de savoir-faire par une série de corrections des connaissances mobilisées. Des structures d'interaction entre les connaissances mobilisées et les informations nouvelles sont constituées chez les élèves, et c'est là que s'organisent les informations et s'élabore le nouveau réseau conceptuel. Par analogie au comportement allostérique d'une protéine, Giordan (1989) présente un modèle allostérique qui préconise « *faire avec pour aller contre* ». Il propose non seulement de faire contre les conceptions, mais également « avec » elles. L'élève se sert de son système interprétatif pour chercher à appréhender de nouvelles connaissances. Selon Giordan (1989), les systèmes cognitifs ne sont pas des blocs solides à interchanger; ils sont des structures vivantes et des organisations flexibles et évolutives

qu'il faut connaître et qu'il faut faire évoluer. Le changement conceptuel est donc un processus continu.

Pour Giordan, la mise sur pied d'un environnement didactique adapté introduit une série de déséquilibres conceptuels pertinents qui perturbent le réseau conceptuel de l'élève en le confrontant à des éléments significatifs (motivation de l'élève). Il est important de lui fournir un certain formalisme comme aide à la réflexion et pour l'organisation des données. C'est l'enseignant qui met en place les situations d'interaction nécessaires et qui apporte ou fait construire les outils les plus adéquats.

3.4. Récapitulation

Plusieurs chercheurs en psychologie ont considéré que le processus de développement cognitif des enfants est similaire au processus de développement des idées chez les scientifiques.

Le modèle de Posner et al (1982), qui prend les conceptions comme entités indivisibles, conceptualise généralement l'apprentissage des conceptions scientifiques comme une rupture. Le modèle de Carey se contente de décrire la restructuration conceptuelle, en accordant une place importante à l'étude des concepts qui sont à la base des théories intuitives très organisées. Pour Vosniadou, le changement conceptuel est considéré comme un processus graduel dans lequel les structures conceptuelles initiales sont continuellement enrichies et restructurées.

Le processus de changement conceptuel fait alors face à deux grandes perspectives : une perspective de rupture et une autre de continuité. Selon Legendre (2002), ce double aspect se reflète dans les divers modèles de changement conceptuel développés qui présentent une description des conceptions avant et après l'apprentissage ainsi que le processus de passage des unes aux autres. Elle classe notamment dans la perspective de la rupture l'approche de Vosniadou (1994), de Carey (1985) et de celui de Posner (1982). En contrepartie, elle classe l'approche de diSessa dans la perspective de la continuité.

Nous pouvons conclure que les modèles de diSessa et de Vosniadou, sont plus aptes à explorer les états cognitifs intermédiaires de l'apprentissage puisqu'ils se donnent les outils conceptuels pour le faire : les conceptions possèdent ici une structure interne plus ou

moins complexe, susceptible d'évoluer partiellement et progressivement. La nature et le degré d'organisation du système de connaissances antérieures de l'individu ne sont pas perçus de la même façon par les deux courants : système de connaissances bien organisé dans le modèle de la rupture et système de connaissances non structuré dans le modèle de la continuité. Il s'agit d'une différence fondamentale.

Notons également le modèle allostérique de Giordan qui préconise « faire avec pour aller contre » et l'approche par modèles scientifiques qui s'avère très importante du fait qu'elle relie les modèles scientifiques et les modèles mentaux. Le modèle de Giordan propose de multiples niveaux d'analyse. Cette approche a mis en évidence la différence entre les obstacles relatifs à la compréhension et ceux relatifs à la croyance.

Ces travaux de psychologie ou de didactique sur le changement conceptuel sont donc des moyens pour caractériser ou étudier l'apprentissage et les conditions favorables à sa réalisation. Nous retiendrons de cette revue bibliographique :

- l'approche phénoménologique de diSessa à prendre en compte, même si elle ne décrit pas des théories naïves et ne fournit pas un cadre d'étude théorique; cependant, il est difficile d'avoir un point de vue clair sur le changement conceptuel, puisque ses propositions ne sont pas centrées sur les concepts en tant que tels;
- la hiérarchie et la structuration des connaissances de Vosniadou et de Carey pour leur capacité à rendre compte de processus d'apprentissage et des difficultés variables de ces apprentissages, ainsi que des différences de structures conceptuelles entre novices et experts.

Selon Vosniadou et Ioannides (1998), il est important de fournir aux étudiants un environnement d'apprentissage qui encourage l'expression de leurs conceptions et croyances, puis de leur faire vivre des expériences significatives leur permettant de comprendre les limites de ces conceptions et croyances et, par conséquent, d'être motivés à les réviser. Dans une vision socioconstructiviste, la mise sur pied d'un environnement didactique adapté introduit une série de déséquilibres conceptuels pertinents qui perturbent le réseau conceptuel de l'étudiant en le confrontant à des éléments significatifs (motivation de l'étudiant). Il est important de lui fournir un certain formalisme comme aide à la

réflexion et pour l'organisation des données. C'est l'enseignant qui met en place les situations d'interaction nécessaires et qui apporte ou fait construire les outils les plus adéquats (Giordan, 1989). Dans la section suivante, nous essayons d'élaborer quelques principes directeurs du design d'un environnement d'apprentissage.

3.5. Conception des environnements d'apprentissage

La théorie de la conception des environnements d'apprentissage doit proposer un ensemble de principes et de modèles conceptuels pour aider les enseignants et les concepteurs à concevoir et créer de tels environnements. Wilson (1996) définit un environnement d'apprentissage constructiviste comme un espace où les apprenants peuvent utiliser des outils et des mécanismes pour construire leurs propres connaissances et développer des compétences pour résoudre des problèmes. Selon Perkins (1991), ces environnements d'apprentissage peuvent être considérés comme des sources d'informations diverses, des moyens techniques de représenter l'information, des espaces où on peut présenter, observer et manipuler des phénomènes (réels ou simulés), des kits de construction facilement manipulables et un gestionnaire de tâches.

Les environnements d'apprentissage constructiviste, d'après Honebein (1996), doivent favoriser l'expérimentation par l'apprenant lui-même afin de lui permettre de prendre conscience du fait qu'il existe plusieurs points de vue valides; intégrer l'apprentissage dans des contextes réalistes et pertinents aussi bien dans une expérience sociale par le biais du dialogue et de la conversation (socioconstructivisme); encourager l'appropriation du processus d'apprentissage par l'apprenant, de façon autonome, l'expression de ses intérêts personnels, l'utilisation de plusieurs modes de représentation et cela de manière à faciliter son éventuelle prise de conscience de son mode de construction des savoirs. Vosniadou, dans ce même cadre, laisse penser que les environnements d'apprentissage devraient soutenir l'apprentissage actif et guider les étudiants vers l'acquisition des processus autorégulés. Il y a donc un accord général sur certains principes de conception pour la construction des environnements d'apprentissage qui ont émergé des recherches de base et appliquées de la science cognitive.

Vosniadou et al. (2001) propose des recommandations pour la conception d'un environnement d'apprentissage en enseignement des sciences :

- **Prendre en compte l'ordre d'acquisition des concepts d'un domaine.** Il est important pour fournir l'enseignement qui rend les différences claires.
- **Prendre en compte des conceptions antérieures des étudiants.** Les étudiants arrivent en classe avec des connaissances antérieures difficiles à déloger. Des séquences d'apprentissage doivent être conçues pour informer les étudiants de leurs représentations implicites, aussi bien que de la croyance et des présuppositions qui les contraignent. Il est important de fournir des expériences significatives qui amènent les étudiants à comprendre les limites de leurs explications et à les motiver pour les changer.
- **Faciliter la conscience métaconceptuelle.** Les étudiants ne se rendent pas compte des cadres explicatifs qu'ils ont construits et des présuppositions qui les contraignent. Le manque de conscience métaconceptuelle empêche les étudiants de remettre en cause leurs connaissances antérieures et facilite l'assimilation de nouvelle information dans les structures conceptuelles existantes. Vosniadou précise que pour aider les étudiants à augmenter leur conscience métaconceptuelle, il est nécessaire de créer les environnements d'apprentissage qui permettent aux apprenants d'exprimer leurs représentations et leurs croyances. Ceci peut être fait dans les environnements qui facilitent la discussion en groupe et l'expression verbale des idées. Il est également important de créer les environnements d'apprentissage qui permettent aux étudiants d'exprimer leurs représentations internes des phénomènes, pour les comparer à celles des autres. De telles activités peuvent prendre du temps, mais elles sont importantes pour s'assurer que les étudiants se rendent compte de ce qu'ils savent et de ce qu'ils doivent apprendre.
- **Dresser le profil des conceptions antérieures des étudiants.** Selon Vosniadou, il est important dans l'enseignement de distinguer la nouvelle information qui est conforme à la connaissance antérieure de celle qui fonctionne contrairement à la connaissance antérieure. Quand la nouvelle information est conforme à la

connaissance antérieure, elle peut être facilement incorporée aux structures conceptuelles existantes. Cependant, lorsque la nouvelle information fonctionne contrairement aux structures conceptuelles existantes, la présentation simple de la nouvelle information comme un fait peut être inadéquate. Pour que l'information contre-intuitive soit comprise, les étudiants doivent remodeler les structures conceptuelles qu'ils ont pour les rendre conformes à la nouvelle information. C'est un travail difficile et dur; les étudiants doivent être assez motivés pour l'entreprendre.

- **Motiver pour le changement conceptuel.** Les étudiants ne voient pas souvent la raison de changer leur croyance et leurs présuppositions parce qu'elles permettent de bonnes explications de leurs expériences quotidiennes, qu'elles fonctionnent adéquatement dans la vie quotidienne et sont attachées à des années de confirmation. Les enseignants doivent leur fournir un environnement qui peut motiver un changement conceptuel et les relier à l'environnement social et culturel en dehors du contexte scolaire étroit. Les étudiants ont besoin d'expériences significatives qui leur prouvent que les explications qu'ils ont construites ont besoin de révision.
- **Favoriser un conflit cognitif.** Bien que nous croyons que le conflit cognitif peut être utile dans l'apprentissage des sciences, nous pensons également qu'il devrait être employé soigneusement. Vosniadou précise que le changement conceptuel est un processus difficile qui implique la réorganisation non seulement d'une fausse conception ou d'une croyance, mais aussi tout un système en corrélation de la croyance et des présuppositions qui prend du temps à se construire. Ainsi, le changement conceptuel est une affaire graduelle, qui exige l'utilisation des différentes interventions d'enseignement, alors que le conflit cognitif ne représente qu'une seule intervention parmi les autres.
- **Fournir des modèles et des représentations externes.** Si les étudiants pensent en termes de modèles et que l'enseignement est basé sur un modèle, plutôt que donné d'une manière linguistique et/ou mathématique, l'apprentissage peut avoir une meilleure chance de produire un changement conceptuel. Les modèles et les représentations externes peuvent être employés pour clarifier les aspects d'une

explication scientifique qui ne sont pas évidents lorsque l'explication est donnée d'une manière linguistique ou mathématique. Les qualités visuelles d'un modèle sont utiles pour qu'une explication soit mieux comprise et plus facilement mémorisée (Mayer, 1993).

- **Encourager la discussion et les interactions sociales des apprenants notamment les interactions face à face.** La conception des environnements d'apprentissage par les pairs inclut le développement cognitif, la façon de s'entendre avec les pairs, le renforcement des relations intergroupes, des compétences de travail en équipe et la responsabilité dans les relations sociales (Jonassen et al. 1999; Rogoff, 1990). Dans une perspective socioconstructiviste, les deux résultats principaux sont donc d'encourager la construction de la connaissance partagée et de permettre aux étudiants formés de se joindre à des communautés instruites de discours (Wegerif et Mercer, 1996). L'apprentissage par les pairs aide les étudiants à construire des connaissances par l'élaboration commune des connaissances au moyen de la conversation. Ainsi, cet apprentissage devient une introduction au langage scientifique, à des valeurs et à des modes de connaissance associée à la discipline de la science (Blumenfeld et al., 1996)

Puisque le changement conceptuel passe obligatoirement par l'identification des conceptions des apprenants, nous tentons de présenter dans la partie suivante les différentes conceptions des apprenants au sujet du phénomène photoélectrique et au sujet de la lumière.

4. Conceptions des étudiants au sujet du phénomène photoélectrique et de concepts connexes

Le but principal de l'enseignement de l'effet photoélectrique est de montrer la nature quantique de la lumière. Les préconceptions sur la nature de la lumière ont un impact important sur l'apprentissage de l'effet photoélectrique. Nous présenterons les principaux

modèles scientifiques de la lumière et un aperçu des conceptions au sujet de la lumière, avant de nous concentrer sur les différentes conceptions de l'effet photoélectrique.

4.1. Conceptions et principaux modèles de la lumière

L'homme s'est longtemps questionné sur la nature de la lumière et il a, sans se décourager, élaboré des théories successives. Principalement, deux conceptions se sont longtemps opposées : la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire. Trancher fut longtemps difficile parce que certains faits faisaient pencher d'un côté tandis que d'autres étaient beaucoup plus faciles à interpréter de l'autre. Dans cette partie, nous décrivons brièvement les principaux modèles scientifiques de la lumière ainsi que les différentes conceptions au sujet de la lumière.

4.1.1. Principaux modèles scientifiques de la lumière

La lumière prend, selon l'expérience, tantôt l'aspect d'une onde (phénomène continu), tantôt celui d'un corpuscule (phénomène discontinu). Cependant, pour en arriver là, l'évolution des conceptions sur la lumière a été influencée par plusieurs courants d'idées au fil de l'histoire. Nous allons présenter ici les grandes phases des principaux modèles qui ont contribué à la conception actuelle de la structure de la lumière.

1) Modèle mécanique : La lumière est vue comme une pression transmise dans un milieu parfaitement élastique. Descartes conçoit la lumière comme une pression exercée par de minuscules particules d'éther, milieu censé remplir l'espace entre les corps. Ces particules ont « tendance » à se déplacer en ligne droite et à tourner sur elles-mêmes.

2) Modèle ondulatoire I (théorie de Huygens) : Christian Huygens pense que l'univers est rempli de particules qui vibrent en même temps, tout en constituant des ondelettes; la lumière est une onde longitudinale. Cette théorie est inspirée par les rides qui se forment à la surface de l'eau. La construction de Huygens permet d'expliquer la réflexion et la réfraction. Ce modèle n'explique pas cependant la propagation rectiligne de la lumière ondulatoire qui devrait courber autour des obstacles.

3) Modèle corpusculaire de Newton : La lumière est considérée comme de fines particules se propageant en ligne droite et plus vite dans un milieu transparent et dans le

vide; la réflexion est expliquée à partir des collisions élastiques; la réfraction est définie en considérant que la lumière est constituée de particules attirées par la surface.

4) Modèle ondulatoire II (théorie de Maxwell) : La lumière est caractérisée comme une vibration électromagnétique transversale et sa propagation est rectiligne. Ceci permet d'expliquer le phénomène de diffraction, tandis que la réflexion et la réfraction sont expliquées en utilisant la construction de Huygens ou les équations de Maxwell. La vitesse de la lumière voyageant dans l'eau est inférieure à celle de la lumière dans l'air. Cependant, ce modèle n'explique pas l'interaction lumière/matière, notamment, l'effet photoélectrique)

5) Modèle quantique (Einstein) : l'énergie lumineuse se présente sous forme de paquets d'énergie de valeur discrète, les photons. Selon la théorie des quanta, le photon est considéré comme une particule pratiquement sans masse, animée de la vitesse c dans le vide et porteuse d'une quantité élémentaire d'énergie appelée quantum, qui est reliée à la fréquence par $E = h \cdot f$. L'aspect corpusculaire prend le pas sur l'aspect ondulatoire au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue.

4.1.2. Conceptions de la lumière

Les conceptions sur les caractéristiques optiques de la lumière (propagation, ombre, réfraction, réflexion, etc.) persistent chez les étudiants au collégial et il est fort possible que ces derniers, avec des expériences limitées, en physique puissent avoir ces conceptions.

4.1.2.1. La propagation de la lumière

Il existe de nombreuses recherches sur les conceptions des étudiants sur la lumière, la couleur et l'optique géométrique (Fever et Ric, 1988; Goldberg and McDermott, 1986,1987; Larisa et al. 1984; Sabena, 1991; Wosilat et al, 1998).

Goldberg et Mc Dermott (1987) ont notamment étudié les conceptions des étudiants à l'Université de Washington sur la propagation de la lumière. Pour ces étudiants, la lumière est un phénomène autonome et se propage en ligne droite. La propagation de la lumière met en jeu explicitement le concept de rayon lumineux. Pour Goldberg et McDermott (1987), les étudiants semblent considérer les rayons comme des objets physiques réels. Que les rayons soient parallèles implique obligatoirement qu'une direction soit privilégiée; c'est le plus souvent une direction horizontale, à la fois pour des raisons

culturelles et des raisons didactiques : la plupart du temps les schémas des manuels d'enseignement et les dispositifs expérimentaux (les bancs d'optique) sont organisés autour d'une direction horizontale (Ronen et al., 1993).

Une analyse de ces travaux est faite par Viennot (1996) en termes de matérialisation des rayons lumineux ou de l'image d'un objet, qu'elle oppose au point de vue physique de la transmission d'une information. Pour Viennot, on peut comprendre une bonne partie des réponses données par les élèves aux différents questionnements de ces travaux si on leur prête l'idée que l'image est un objet quasi matériel, qu'elle part de l'objet source, traverse la lentille en se renversant, au besoin en s'écornant contre un cache, et apparaît sur l'écran d'observation. De la même façon, une tendance à la matérialisation de la lumière expliquerait qu'on accepte assez volontiers l'idée qu'on puisse la voir de côté, sans l'aide d'une substance diffusante, ou que les interactions de lumières colorées différemment obéissent pour les élèves aux mêmes lois que les mélanges de peintures. Viennot ne cache pas que d'autres interprétations conviendraient probablement mieux pour expliquer d'autres aspects des réponses.

Au lieu de caractériser les conceptions « de sens commun » en optique comme une matérialisation, renvoyant au fond au substantialisme dénoncé par Bachelard (1969) comme obstacle épistémologique de première grandeur, Galili (1996) présente une autre direction de synthèse, légèrement différente de la précédente : la conceptualisation holistique (Galili et al, 1993). Surtout, il essaie de saisir le mouvement par lequel, à partir d'une conception de base issue du sens commun, les élèves se font un chemin vers une compréhension plus scientifique de la notion d'image, en passant par une conception hybride, qu'on appelle la conceptualisation de l'image projetée. Il formalise donc trois conceptions différentes de la formation et de l'observation d'une image optique : la conceptualisation primitive holistique, la conceptualisation intermédiaire de l'image projetée et la conceptualisation scientifique, faisant intervenir une correspondance point par point entre l'objet et l'image, par l'entremise de faisceaux de lumière.

Reiner (1992) a étudié les idées des étudiants sur la lumière à travers des entrevues d'un groupe d'étudiants au niveau secondaire avec des expériences manuelles comme des

tests de la flamme bunsen, lumière de la bougie et la lumière colorée. Il a remarqué que les étudiants pensent 1) que l'intensité de la lumière est reliée principalement à la distance, 2) que le filtre a modifié la lumière blanche en lui ajoutant des couleurs et 3) que certaines couleurs de la lumière ont voyagé davantage en raison de la force. Quelques étudiants pensent à la nature de la lumière comme un jet de particules et comme des photons, d'autres étudiants pensent que la lumière est une onde.

4.1.2.2. Couleur et lumière

En analysant les réponses des élèves lorsqu'une lumière colorée interagit avec des objets colorés, Feher et Rice (1992) concluent que les élèves croient que la lumière colorée possède un certain degré d'obscurité lorsqu'elle est comparée avec la lumière blanche, car la gradation dans l'obscurité passe de la couleur noire à la couleur blanche. Le terme brillance est l'opposé de l'obscurité. Ces étudiants ont organisé leurs idées dans des modèles mentaux de la lumière et des couleurs. Ces idées sont différentes de celles des scientifiques. Les élèves n'expliquent pas leurs observations quotidiennes avec leur compréhension scientifique. Ils considèrent que la couleur noire est composée de couleurs plutôt que de penser qu'il s'agit d'une absence de couleurs.

Nous signalons dans ce paragraphe d'autres conceptions présentes chez des élèves au sujet de la lumière et des couleurs (fréquence et longueur d'onde); en voici quelques exemples :

- la lumière visible est le seul type de lumière;
- tout rayonnement est nocif;
- les couleurs primaires de la lumière sont identiques aux couleurs primaires des colorants (rouges, jaune et bleu);
- les objets rouges dans l'espace sont chauds et les objets bleus sont froids;
- les filtres changent la couleur de la lumière.

Dans une recherche faite sur les conceptions des étudiants au diplôme de Métiers d'Arts en France sur la lumière et la couleur, Chauvet (1994) a trouvé que le tiers d'un groupe de ces étudiants (N=14) croit que lorsqu'on croise deux faisceaux laser de couleurs différentes, leur couleur sera modifiée au-delà de la zone de croisement. Dans un tel cas,

Viennot (1996) prétend que les élèves voient la lumière colorée comme « chosifiée » et la couleur comme caractéristique intrinsèque de la lumière.

4.1.2.3. Nature ondulatoire de la lumière

À la suite d'une recherche effectuée par Ambrose et al. (1999) sur la compréhension de 46 étudiants dans des cours de physique optique, l'analyse des entrevues, enregistrées en vidéo avec les étudiants sur l'interférence et la diffraction montre que seulement 7 des 46 étudiants pouvaient expliquer les phénomènes de la diffraction et répondre à des questions simples au sujet de ce qui arriverait au patron observé sur l'écran lors de la modification ou du changement des dimensions des fentes. Ces étudiants sont incapables de choisir entre l'approche géométrique et l'approche physique (ondulatoire) pour traiter une situation. Et même s'ils choisissent la bonne approche, ils n'ont pas une compréhension suffisante du modèle ondulatoire de la lumière pour l'employer. Ces difficultés se manifestent lors de l'enseignement de l'effet photoélectrique et au moment de l'introduction de la nature du comportement corpusculaire de la lumière notamment.

Steinberg et al. (1999) mentionnent les difficultés que les étudiants rencontrent pour comprendre les modèles et les concepts classiques, entre autres, le modèle ondulatoire de la lumière. Ainsi, la plupart des étudiants ne développent pas un modèle ondulatoire raisonnable du comportement de la lumière, ce qui leur cause des difficultés au cours de leur étude de la physique moderne et peut créer une mauvaise interprétation de la nature quantique de la lumière. Au lieu de corriger leur manière de percevoir la lumière, plusieurs étudiants incorporent la nouvelle physique qu'ils apprennent dans leurs faux modèles (Ambrose et al. 1999).

4.2. Conceptions des étudiants au sujet de l'effet photoélectrique

Plusieurs concepts classiques sont en fait des préalables à la compréhension des phénomènes quantiques, et leur fragilité peut constituer une source de difficultés pour l'apprentissage. Dans une recherche sur la compréhension de l'optique physique chez 46 étudiants qui ont fait les cours d'introduction de physique, dont 30 avaient déjà complété le cours de physique moderne, Steinberg et al. (1996) ont utilisé des entrevues de 45 à 60 minutes enregistrées sur vidéos pour mettre en évidence les conceptions des étudiants à

propos des phénomènes de diffraction et d'interférences. En analysant ces entrevues, ils ont constaté que 20 étudiants parmi les étudiants qui ont complété le cours de physique moderne se réfèrent aux photons pour expliquer la diffraction. Ils ont également noté des croyances inattendues au sujet des photons. Par exemple, quelques étudiants ont décrit le photon comme une particule ponctuelle qui se propage sinusoïdalement dans l'espace. Cette confusion des étudiants avec le concept de photon a mené Steinberg et ses collaborateurs (1999) à poursuivre les entrevues pour inclure des questions sur l'expérience photoélectrique (Steinberg et al. 1996). Ces entrevues ont été conduites avec six étudiants de la classe de physique moderne à l'Université de Washington après avoir achevé leur étude sur l'effet photoélectrique. Elles révèlent chez les étudiants des difficultés suivantes :

- une croyance que la loi d'ohm $V = IR$ s'applique à l'expérience photoélectrique;
- une incapacité à différencier entre l'intensité de la lumière, et par conséquent le flux de photons, et la fréquence de la lumière, donc de l'énergie de photon;
- une croyance qu'un photon est un objet chargé;
- une incapacité de faire toute prévision dans un graphique d'intensité électrique en fonction de la tension (I-V) pour l'expérience photoélectrique;
- une incapacité à donner toute explication reliant des photons à l'effet photoélectrique.

Une autre recherche plus récente réalisée par McKagan et al. (2009) a confirmé l'existence et la persistance de toutes ces difficultés; en effet, après l'apprentissage de l'effet photoélectrique, certains étudiants ont des difficultés à :

- tracer un graphique Intensité-Tension qualitativement correct;
- distinguer entre les effets du changement de l'intensité et du changement de la longueur d'onde;
- interpréter le schéma de circuit, particulièrement à tension variable;
- comprendre que la lumière et non la tension cause l'émission d'électron;
- comprendre significativement l'expérience de l'effet photoélectrique.

Dans son livre intitulé « Five Easy Lessons », Knight (2004) a mentionné que les étudiants ne peuvent pas expliquer les résultats de l'expérience de l'effet photoélectrique en utilisant le modèle quantique de la lumière :

« When asked on an exam to explain how the photoelectric effect was inconsistent with classical physics, the majority of students wrote that the mere existence of the photoelectric effect violated classical physics. Only a very small minority could articulate how the photon model succeeds where the classical model fails. »

Dans le cadre du projet C³P (Comprehensive Conceptual Curriculum for Physics), Olenick et ses collaborateurs (2005) ont relevé les conceptions suivantes chez les étudiants des cours d'introduction en mécanique quantique sur la dualité onde-corpuscule :

- la lumière est seulement une particule ou une onde;
- les particules ne peuvent pas avoir les propriétés des ondes;
- les ondes ne peuvent pas avoir les propriétés des particules;
- la position d'une particule peut toujours être connue d'une manière exacte;
- un photon est une particule avec une onde à l'intérieur;
- les photons d'une fréquence plus élevée sont plus grands que ceux d'une fréquence plus basse;
- tous les photons ont la même énergie;
- l'intensité signifie que l'amplitude d'un photon est plus grande.

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

La mauvaise compréhension de la nature quantique de la lumière peut être également influencée par la compréhension de la quantification opérée par Bohr dans son modèle semi-classique de l'atome, du fait que l'effet photoélectrique est l'interaction entre la lumière et la matière. Johnston, Crawford et Fletcher (1998) ont examiné chez l'étudiant la compréhension de la signification de l'effet photoélectrique, de l'incertitude, de la nature des ondes et la nature des forces. Ils ont sondé l'idée du modèle mental des ondes ou de la particule, les concepts de probabilité et de la nature des fonctions propres à partir des réponses des étudiants à des questions d'un prétest. Ils ont ainsi constaté que les nouveaux

concepts présentés en classe sont considérés superficiellement, la réintégration de la dose des concepts préexistants associés de façon inappropriée ne se produit pas fréquemment, le développement des modèles mentaux avec le temps est minimal. La majorité des étudiants maintiennent leurs conceptions originales d'école secondaire et les étudiants ont une grande difficulté à interpréter les données en employant des modèles.

Notons également d'autres conceptions chez les étudiants qui peuvent influencer la compréhension des nouveaux termes quantiques, par exemple les conceptions sur la nature des théories scientifiques. Les étudiants semblent croire que les contenus scientifiques qu'ils ont appris par le passé sont « scientifiquement corrects » et considèrent les connaissances scientifiques comme statiques et universellement valides (Kalkanis et al., 2003). Plusieurs recherches rapportent une confusion des concepts où sont mixés les aspects classiques et quantiques (Kalkanis et al., 2003). Selon Taber (2002), bien que les étudiants adoptent aisément les nouveaux termes, par exemple quantum, ces termes ne sont intégrés que superficiellement. De plus, Mashhadi (1996) rapporte que les étudiants ont incorporé les nouveaux phénomènes quantiques dans les conceptions de mécanique classique.

Nous retenons que les élèves arrivent en classe avec un manque de compréhension des différents concepts de la physique classique et qu'ils rencontrent des difficultés à expliquer les résultats de l'effet photoélectrique en utilisant le modèle quantique de la lumière. L'enseignement de ce phénomène doit donc tenir compte de ces conceptions pour surmonter ces difficultés. Dans la section suivante, nous présenterons les principales approches utilisées pour enseigner l'effet photoélectrique et les concepts connexes.

5. Principales approches d'enseignement du phénomène photoélectrique et de concepts connexes

Les approches pour enseigner l'effet photoélectrique sont nombreuses. Après avoir résumé l'approche traditionnelle, nous passons en revue plusieurs autres approches ayant fait l'objet des travaux de recherche; il s'agit des approches constructiviste, historique, par

analogie, par rupture, par juxtaposition et enfin, par ordinateur. Notons bien que ces approches ne sont pas exclusives.

5.1. Approche traditionnelle

Nous avons vu dans le chapitre 1 que dans l'enseignement traditionnel, les leçons typiques au niveau préuniversitaire s'apparentent à une récitation inefficace : c'est le cas des cours magistraux, des exercices d'application et des problèmes typiques, des diplômes délivrés après des examens ou des tests standards d'évaluation basés sur la restitution des faits et sur la résolution des problèmes quantitatifs similaires à ceux déjà étudiés (Howes, 2001). Dans cette approche, l'enseignement est orienté vers un développement historique. En effet, cette approche traditionnelle passe par la présentation de modèles semi-classiques ayant eu une importance historique, par exemple, le modèle de Bohr dans le cas du modèle atomique ou modèle ondulatoire corpusculaire, et dualité onde-corpuscule dans le cas du modèle de la lumière. L'effet photoélectrique est présenté en un cours simple où le professeur décrit l'expérience et interprète la nature corpusculaire de la lumière, les étudiants lisent le texte du livre et doivent être capables de résoudre les problèmes à la fin du cours. Dans cette approche, les étudiants sont incapables d'interpréter l'expérience de l'effet photoélectrique au regard du modèle photon de la lumière; ils ne sont pas capables de prévoir ou d'expliquer les effets du changement qualitatif des paramètres de l'expérience. Un tel enseignement ne fournit pas aux étudiants une aide à une compréhension fonctionnelle (Steinberg, 1996).

5.2. Approche historique

Une activité a été conçue par Scott Calvin (2004) afin de vérifier si les élèves pouvaient reproduire le raisonnement utilisé par Einstein pour expliquer l'effet photoélectrique. Il a présenté aux élèves une description du schéma de l'expérience de l'effet photoélectrique et un tableau de résultats qui contient les couleurs de la lumière incidente, son intensité, le nombre d'électrons et l'énergie cinétique. Il a demandé aux étudiants de tracer des graphiques de la façon qu'ils jugent pertinente et de suggérer un modèle de la lumière qui pourrait expliquer les résultats. Il a incorporé des conseils sous forme de questions pour focaliser la discussion. Pendant la première séance, aucun élève

n'a pu proposer le modèle corpusculaire. Dans la deuxième séance, il a confronté les étudiants aux différents modèles proposés. Scott Calvin a conclu qu'il est possible pour les étudiants de proposer le modèle d'Einstein dans une période de deux heures et de mener une redécouverte guidée du raisonnement de celui-ci.

5.3. Approche par analogie

Selon Kovacevic et Djordjevich (2006), l'analogie est un outil efficace d'apprentissage particulièrement bien approprié pour l'enseignement de la science. Cependant, une soigneuse planification est exigée pour une bonne application et pour éviter des inconvénients lorsque les analogies sont prolongées trop loin. Ces auteurs ont proposé une analogie mécanique pour présenter l'effet photoélectrique aux étudiants préuniversitaires. La figure 2 montre le modèle mécanique utilisé dans cette analogie. L'énergie des photons ultraviolets correspond à l'énergie potentielle des balles qui se situent à une hauteur maximale. Kovacevic et Djordjevich ont noté l'efficacité de cette manière d'enseigner l'effet photoélectrique; en effet, elle permet aux étudiants de comprendre l'effet photoélectrique, en le reliant au monde mécanique auquel ils sont habitués et à leur expérience visuelle.

Fischler et Lichtfeldt (1992) critiquent cette approche en affirmant que :

« In being oriented to historical development, the teaching over-emphasizes the conceptions of classical physics. The usage of mechanical models, which is implied in this, sets up an additional obstacle to an appropriate understanding of quantum physics. »

Ces deux chercheurs ont proposé de présenter l'effet photoélectrique en tant que rupture avec les conceptions classiques. Il s'agit de souligner très tôt l'étrangeté de la mécanique quantique et sa différence fondamentale avec la physique classique (Popiech, 2000).

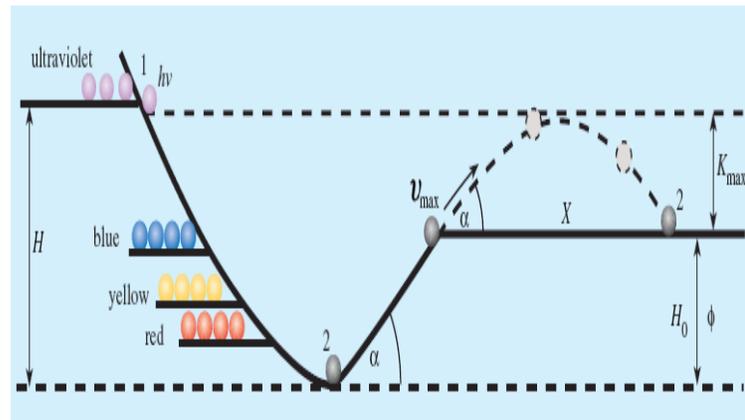


Figure 2. Approche par analogie mécanique (Kovacevic et Djordjevich, 2006)

5.4. Approche par rupture

Des chercheurs (Fischler et Lichtfeldt, 1992; Ireson, 1999) recommandent d'aborder la mécanique quantique et par conséquent, l'effet photoélectrique en évitant toute référence à la mécanique classique. Ils ont étudié les conceptions des étudiants et leur processus d'apprentissage de la mécanique quantique. Leurs propositions d'enseignement pour de nouveaux concepts traités de la mécanique quantique dans les cours d'introduction sont :

- la référence à la physique classique devrait être évitée;
- l'unité d'enseignement devrait commencer par des électrons et non pas par les photons en présentant l'effet photoélectrique;
- L'interprétation statistique des phénomènes observés devrait être employée et des descriptions dualistiques devraient être évitées;
- Le modèle du Bohr devrait être évité lors du traitement de l'atome d'hydrogène.

Ces chercheurs ont proposé une nouvelle structure d'unité d'enseignement pour le cours d'introduction à la mécanique quantique dans laquelle la nature dualistique de la lumière et le concept du photon ne seront traités qu'après l'enseignement de la diffraction des électrons et de la quantification de l'énergie. Les objectifs sont d'effectuer une rupture avec les conceptions classiques, en soulignant le comportement des objets quantiques, et d'éviter la rétention des conceptions semi-classiques ou encore la production de conceptions mixtes. Gil et Solbes (1993) ont noté que l'origine des difficultés des étudiants de physique classique pourrait être épistémologique; en effet, les étudiants ignorent la

révolution conceptuelle associée à l'émergence de la physique moderne. Ainsi, il serait donc préférable de proposer des activités d'enseignement où l'on montre que la physique quantique constitue un nouveau paradigme.

5.5. Approche par juxtaposition

Selon Kalkanis et al. (2003), les conceptions mixtes présentées constituent un obstacle à l'apprentissage de la mécanique quantique. Au lieu d'éviter de faire référence à la mécanique classique, Fischler et Lichtfeldt (1992) proposent de confronter les conceptions en insistant sur la juxtaposition des systèmes conceptuels classique et quantique. Selon ce point de vue, l'association de deux modèles, essentiellement incompatibles, est possible par la compréhension du processus de crise qui a mené au rejet du modèle le plus classique et à l'acceptation du plus moderne.

La nature ondulatoire de la lumière peut être perçue comme incompatible avec la nature corpusculaire, même si elles caractérisent le même concept : la lumière. L'enseignement de l'effet photoélectrique présente aussi l'opportunité d'introduire le concept onde-corpuscule, tout à fait nouveau pour la majorité des étudiants au niveau collégial. Pour enseigner de tels concepts quantiques, Olsen (2002) propose deux moyens : l'emploi du langage mathématique, non disponible en général au niveau collégial, et l'utilisation de modèles plus visuels à l'aide d'un langage non technique. Ce dernier mode de communication utilise des concepts et analogies du domaine classique, par exemple « onde » et « particule ». Selon Cuppari et ses collègues (1997), il s'agit alors de proposer une approche qui fait ressortir les aspects communs. Ces chercheurs proposent d'introduire la notion d'action à partir de la mécanique classique, puis de présenter la constante de Planck comme quantification de l'action.

5.6. Approche par ordinateur

Les ordinateurs peuvent être utilisés à l'enseignement de la physique de plusieurs manières; ils peuvent être employés dans les cours magistraux et dans les laboratoires, pour la collecte de données, l'affichage graphique en temps réel des résultats et également pour la modélisation théorique. Hasson et Manners (1995) ont introduit des simulations CAL (computer aided Learning) pour enseigner la mécanique quantique élémentaire. L'effort

majeur de l'utilisation des simulations est d'illustrer les caractéristiques qualitatives de la mécanique quantique plus que les caractéristiques quantitatives. Les simulations offrent aux enseignants et aux élèves des projets de travail intéressants et des aides d'enseignement très utiles. Hasson et Manners ont identifié les avantages de l'utilisation des simulations comme méthodes d'enseignement de la physique : interaction dynamique, flexibilité, visualisation et représentations dynamiques des phénomènes. Ceci aide le processus d'apprentissage non seulement de manière explicite, mais aussi de façon implicite, puisque l'attention de l'étudiant doit être stimulée par l'interaction et par l'environnement.

Plusieurs chercheurs ont développé du matériel non traditionnel pour enseigner la mécanique quantique, notamment avec des activités et des logiciels qui présentent la mécanique quantique, en évitant les aspects mathématiques les plus compliqués. Prenons l'exemple de l'outil QSAD (Quantum Science Across Disciplines) développé à l'Université de Boston, il s'agit d'un logiciel et d'un outil didactique pour enseigner la mécanique quantique sans exiger une exécution des calculs à haut niveau (Robblee et al, 1999). Il est basé sur l'idée que : « *les phénomènes quantiques sont critiques à la compréhension du monde qui nous entoure.* » Les applications du logiciel QSAD produisent les représentations graphiques des atomes et des molécules. En employant le programme, les étudiants peuvent créer des modèles visuels des atomes et des molécules. Un autre outil informatique VQM (Visual quantum Mechanics), développé à l'université de l'État du Kansas (Zollman et al, 2002), présente la mécanique quantique en employant des activités et/ou des visualisations sur ordinateur. VQM rend la mécanique quantique accessible aux étudiants du collégial et dans des cours d'introduction de la physique, en utilisant le minimum de mathématiques. Les matériaux de VQM aident l'étudiant à obtenir les idées principales de la mécanique quantique, en explorant un dispositif moderne comme la diode LED. Rebello et Zollman (1999) ont indiqué que les activités manuelles et les programmes de visualisation sur ordinateur ont soutenu les étudiants dans la construction des modèles mentaux pour expliquer leur observation.

Steinberg et al (1996) ont développé un tutoriel sur ordinateur, en utilisant une simulation pour enseigner l'effet photoélectrique et pour aider les étudiants à surmonter les

difficultés mentionnées dans le paragraphe 4.2. La première stratégie était de tracer les graphes représentant le courant en fonction de la tension. Le programme est utilisé comme aide à l'enseignement et pour recueillir des informations additionnelles sur la nature, la prédominance et la persistance des difficultés spécifiques à la compréhension de ce phénomène. L'analyse des performances des étudiants dans les problèmes d'examen reliés à l'effet photoélectrique montre que les étudiants font moins d'erreurs et donnent une explication bien meilleure, et que l'engagement intellectuel requis peut améliorer la compréhension de l'effet photoélectrique auprès des élèves. En se basant sur les résultats de la recherche de Steinberg et al. (1996), McKagan et al. (2009) ont développé un curriculum basé sur une simulation informatique interactive en utilisant un schéma très simple du circuit électrique utilisé lors de l'expérience de l'effet photoélectrique. La recherche est faite auprès de quatre groupes d'une centaine d'étudiants universitaires pour un cours de physique moderne pendant 4 sessions différentes et avec des enseignants différents. La simulation est utilisée conjointement avec l'enseignement par les pairs (peer instruction). L'activité est réalisée pendant trois périodes de 50 minutes chacune. En se basant sur les performances des étudiants dans les questions d'examen sur l'effet photoélectrique, McKagan et al. (2009) montrent que 85 % des étudiants prévoient correctement les résultats du changement des différents paramètres, mais la majorité ne réussit pas à établir un lien entre les observations et les inférences pour expliquer l'effet photoélectrique, en utilisant le modèle quantique de la lumière.

5.7. Récapitulation

Dans cette section, nous avons parcouru rapidement les principales approches d'enseignement de l'effet photoélectrique, des plus traditionnelles aux plus novatrices. Nous avons constaté que l'utilisation des technologies se manifeste de plus en plus en enseignement de l'effet photoélectrique. Les performances des étudiants ayant suivi les approches basées sur les technologies nous paraissent encourageantes. Nous croyons ainsi que les technologies peuvent apporter un renfort considérable à l'enseignement et l'apprentissage de l'effet photoélectrique.

6. Technologie de l'information et des communications et apprentissage des sciences

Les technologies de l'information et des communications (TIC) constituent l'un des facteurs les plus marquants des sociétés contemporaines. Le domaine de l'enseignement n'échappe pas à leur emprise. En effet, ces technologies offrent une gamme d'outils qui peuvent grandement élargir et enrichir les stratégies d'enseignement du personnel enseignant et appuyer l'apprentissage des élèves. Leur intégration dans l'enseignement est un sujet de préoccupation pour les chercheurs dans de nombreux pays. Les acteurs de l'éducation se voient contraints de redoubler les efforts pour mieux préparer les élèves pour la réalité d'aujourd'hui, fort imprégnée par le développement des TIC, et celle de demain où les TIC joueront certainement un rôle plus important.

Dans cette section, nous présentons brièvement quelques avantages de l'utilisation des TIC en enseignement des sciences et tentons d'examiner les apports et les limites des simulations pour l'enseignement des sciences.

6.1. Nouvelles technologies et enseignement des sciences

Les ordinateurs ont montré un grand potentiel d'augmenter l'apprentissage des élèves s'ils sont utilisés convenablement, en tant qu'élément d'une approche logique d'enseignement (Bransford et al., 2000). Plusieurs recherches importantes (Bransford et al., 2000; de Jong et al., 1998; Fiolhais et al., 1998; Jimoyiannis et al., 2001; McIntyre, 1998) ont étudié l'utilité pédagogique des logiciels éducatifs.

Selon Bransford et ses collaborateurs (2000), les nouvelles technologies fournissent des opportunités pour créer des environnements d'apprentissage qui prolongent les possibilités des vieilles technologies et l'utilisation des ordinateurs. Elles peuvent être utilisées pour :

- fournir l'échafaudage ainsi que des outils pour améliorer l'apprentissage;
- offrir aux étudiants et aux enseignants plus d'opportunités pour la rétroaction, la réflexion et la révision;

- construire des communautés locales et globales qui incluent les professeurs, les administrateurs, les étudiants, les parents et les scientifiques;
- augmenter les opportunités d'apprentissage des professeurs.

Dans sa revue de questions sur les apports de la technologie informatique pour l'enseignement des sciences, Linn (2003) a abordé cinq principaux domaines dans lesquels ces technologies peuvent être utilisées comme support :

- a) des cours et des textes en sciences.** Les enseignants présentent leurs cours préparés et les documents à l'appui sous format électronique. Cet aspect fournit un excellent véhicule pour la recherche sur la façon dont les documents et les cours présentés contribuent à l'apprentissage; cela permet aux élèves de trier, d'évaluer et d'organiser leurs divers points de vue des phénomènes scientifiques.
- b) de la collaboration et des discussions.** L'apprentissage des sciences dépend de plus en plus des collaborations entre les individus et les groupes. Les participants ont besoin d'apprendre des idées des autres et un ensemble de technologies a été développé pour soutenir les discussions et la collaboration.
- c) de la saisie et la représentation des données.** En enseignement des sciences, une grande partie de l'expérimentation scientifique consiste à répéter des procédures fastidieuses, collecter des données et les représenter dans le but de dévoiler les relations qui existent entre les différentes variables du phénomène étudié.
- d) de la visualisation de phénomènes scientifiques.** Les visualisations permettent souvent aux élèves d'interpréter des représentations visuelles complexes plutôt que de reconnaître immédiatement leurs implications. Souvent, ce processus d'interprétation inclut les savoirs disciplinaires connectés à l'information visualisée.
- e) des modèles scientifiques et de la simulation.** Créer, tester, et réviser des modèles fait partie de l'investigation scientifique (Clément, 2000). Les élèves utilisent des simulateurs et des outils de modélisation pour créer et tester leurs propres modèles. Ces derniers offrent une représentation mathématique d'un phénomène scientifique et peuvent soutenir des tests de données empiriques, des simulations et des jeux.

De nombreux travaux, par exemple Hucke et Fischer (2002), ont examiné les apports respectifs de l'ordinateur comme outil de saisie et de traitement de données, d'une part, et comme outil de modélisation, d'autre part. Ils concluent que le premier type d'utilisation dans les activités expérimentales habituelles donne une part importante à la manipulation d'appareils et à la réalisation de mesures; l'utilisation de l'ordinateur peut réduire l'attention aux faits expérimentaux, l'attention étant déplacée vers le fonctionnement de l'ordinateur, tandis que l'utilisation de simulations favorise la réflexion théorique.

Beaufils et Richoux (2003) ont étudié les possibilités de visualisation de modèles théoriques, de développement d'activités d'exploration et de manipulation de modèles visant la connaissance des propriétés de ces modèles et l'appropriation de leurs règles de fonctionnement, d'une part, et de modélisation, d'autre part; c'est-à-dire d'utilisation de ces outils pour élaborer des modèles de phénomènes physiques.

Les micromondes et les simulations jouent un rôle très important dans l'enseignement de la science, mentionnons à ce titre Interactive Physics, XyZet, Planets and Satellites, Jacobs, Physlets, Simquest, Stella, etc.; en effet, elles encouragent les étudiants à explorer et interagir avec le système, en incluant des éléments réel ou virtuel, à changer les paramètres et à observer le résultat de cette manipulation.

D'autres logiciels peuvent être utilisés comme outils de modélisation, par exemple Modellus, Easy Java simulations, ou comme des outils Internet et télématiques avec des possibilités d'intercommunication d'ordinateurs (Christian et Belloni, 2001).

Parmi les technologies les plus prometteuses en enseignement des sciences, on trouve la simulation sur ordinateur. Elle est devenue une ressource explicite pour l'enseignement de la physique, notamment au niveau collégial. Le recours à des simulations sur ordinateur s'est largement développé, entre autres, dans le cadre des disciplines d'enseignement scientifique telles que la physique où elles permettent aussi bien de petites animations interactives que des modélisations élaborées. La simulation se présente comme un outil didactique puissant dont l'enseignement de la physique doit tirer profit

6.2. Simulations

Nous présentons dans cette partie une définition de la simulation et les différents types de simulations; nous identifions ensuite les apports et limites de l'utilisation des simulations en enseignement des sciences.

6.2.1. Définition

Les simulations sont des programmes informatiques qui contiennent un modèle simplifié d'un système ou d'un processus. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Alessi et Trollip (1991) décrivent les simulations dans un contexte éducatif :

« A simulation is a powerful technique that teaches about some aspect of the world by imitating or replicating it. Students are not only motivated by simulations, but learn by interacting with them in a manner similar to the way they would react in real situations. In almost every instance, a simulation also simplifies reality by omitting or changing details. In this simplified world, the student solves problems, learns procedures, comes to understand the characteristics of phenomena and how to control them, or learns what actions to take in different situations. »

Gredler (2004) indique qu'une vraie simulation doit proposer à l'élève de résoudre un problème mal défini, comme ceux que l'on rencontre dans la vie réelle; il énumère les quatre principales caractéristiques des simulations en éducation :

« (a) an adequate model of the complex real-world situation with which the student interacts (referred to as fidelity or validity), (b) a defined role for each participant, with responsibilities and constraints, (c) a data-rich environment that permits students to execute a range of strategies, from targeted to `shotgun` decision making, and (d) feedback for participant actions in the form of changes in the problem or situation. » (Gredler, 2004).

6.2.2. Types de simulations

Il existe plusieurs classifications des simulations éducatives qui sont utilisées en enseignement des sciences; nous en avons sélectionné quelques unes. Thomas et Hooper (1991) ont classé les simulations en quatre catégories.

a) Les simulations d'expérimentation (experiencing simulations) sont employées pour activer l'étape cognitive ou affective pour l'apprentissage. L'utilisation de ces programmes précède la présentation formelle du matériel de l'apprentissage (par exemple : BioLab, MtnSim)

b) Les simulations d'information (Informing simulations) sont employées pour communiquer de l'information à l'étudiant. Cependant, Thomas et Hooper (1991) ont mis en évidence que les simulations ne sont pas une manière appropriée de transfert de connaissances quand elles sont employées sans soutien de l'enseignant, mais qu'elles doivent être intégrées à un environnement de soutien au travail régulier de l'étudiant en classe ou au laboratoire.

c) Les simulations de renforcement (Reinforcing simulations), toujours selon Thomas and Hooper (1991), peuvent être utilisées pour renforcer des objectifs d'apprentissage très spécifiques. Les formats les plus communs pour une simulation de renforcement sont la performance et la pratique. Dans une telle simulation, une séquence d'exercices stockés ou produits est présentée à l'étudiant pour qu'il les complète. Ces simulations sont conçues pour ajuster le niveau des connaissances de l'étudiant et pour dépister son progrès.

d) Les simulations d'intégration (integration simulations) semblent plus prometteuses en enseignement des sciences. En effet, les élèves acquièrent le savoir et les principes effectifs requis et utilisent les simulations pour appliquer ces connaissances :

« The use of integrating simulations seems to be most prevalent for the acquisition of diagnostic skills. In these studies, the students first learned the required factual information and principles and then used the simulations to relate and apply that knowledge » (Thomas and Hooper, 1991).

Ces simulations fournissent aux étudiants un environnement contextuel dans lequel ils prennent place et jouent des rôles, dont, à titre d'exemple, Exploring the Nardoo, Bioworld. Les trois premiers types de simulations incluent l'étudiant en tant que joueur externe sur les conditions fournies (par exemple, BioLab-frog, MtnSim).

Gredler (1996) distingue deux types de simulations : symbolique et empirique (experiential). Dans les simulations symboliques, l'étudiant n'est pas un participant actif de l'environnement de simulation informatique. Bien que les étudiants puissent exécuter n'importe quelle tâche parmi plusieurs tâches, comme des tendances de prévision de population dans une simulation de démographie, l'étudiant reste hors de l'évolution des événements. D'autre part, les simulations empiriques immergent les étudiants dans un environnement complexe et modifiable dans lequel l'étudiant est un composant actif. Ils permettent aux étudiants d'exécuter des stratégies de résolution des problèmes. Elles

fournissent également aux étudiants des opportunités pour développer leur stratégie cognitive par l'apprentissage à organiser et contrôler leurs propres pensées et formation. Les simulations empiriques peuvent être des exercices coopératifs ou individualisés en fonction de la nature des rôles du participant et des types des décisions et d'interactions dans l'exercice. Selon Gredler (1996), les composantes essentielles d'une simulation empirique sont un scénario de tâches complexes dans lequel la solution d'un problème fait apparaître en partie les actions d'étudiant; il s'agit d'un rôle pris au sérieux par l'étudiant dans lequel il exécute les responsabilités de la position, des multiples itinéraires plausibles à travers l'expérience et, dans lequel il contrôle ainsi la prise de décision.

De Jong et Van Jooling (1998) divisent les simulations en deux catégories principales : des simulations contenant des modèles conceptuels et d'autres basées sur des modèles opérationnels. Les modèles conceptuels contiennent des principes, des concepts et des faits reliés aux systèmes simulés. Les modèles opérationnels incluent des séquences de procédures d'opérations cognitives et non cognitives qui peuvent être appliquées aux systèmes simulés. Les modèles opérationnels sont généralement employés pour l'apprentissage empirique; dans le contexte d'un apprentissage de découverte, on trouve principalement des simulations conceptuelles. De plus, Van Jooling et de Jong (1998) ajoutent d'autres distinctions parmi les types de modèles, tels que le modèle qualitatif versus le modèle quantitatif, continu versus discret, et statique versus dynamique.

Dans une perspective constructiviste, Wilson et Jonassen (1993) décrivent les simulations éducatives comme un scénario réel simulé montré sur ordinateur, dans lequel l'étudiant joue un rôle authentique pour exécuter des tâches complexes (Harper, 2000). De ce point de vue, les simulations devraient refléter la complexité de la réalité, de sorte que les étudiants soient mis au défi de développer des compétences cognitives évoluées de haut niveau telles que la conceptualisation, la modélisation et la résolution de problèmes qui sont vues comme essentielles pour l'apprentissage des sciences (National Science Education Standards, 1996). Ces simulations prennent les étudiants dans un environnement où ils conduisent plusieurs tâches intégrées, de sorte qu'ils apprennent des compétences

complexes devant des problèmes authentiques ou des enquêtes telles que présentées dans Nardoo et BioWorld.

« Exploring the Nardoo is a CD-Rom package modeling an imaginary river system. Students investigate the river system or solve a set problem, including how coal mining, forestry or urban development affect the river system, the life along with it, and the people living along its length » (Harper et al., 2000).

Cette simulation propose une douzaine d'outils à utiliser pour l'analyse de l'eau. Pour résoudre des problèmes identifiés, les élèves travaillent individuellement et collectivement en faisant des activités qui intègrent des situations de discussion, des aperçus de problèmes et des hypothèses pour les solutions, avec identification des sources de données, collecte de données, vérification des hypothèses et présentation des résultats. Cette simulation permet aux étudiants de collaborer, d'interagir et d'explorer la dynamique de la rivière (Harper et al, 2000).

Lajoie et al. (2001) proposent un environnement de simulation des cas réels authentiques qui aident les apprenants à mener des enquêtes significatives en utilisant des multimédias.

« BioWorld is a computer-learning environment designed for high school biology students. BioWorlds complements the biology curriculum by providing a hospital simulation where students can apply what they have learned about body systems to problems where they can reason about diseases. Students work collaboratively at collecting evidence to confirm or refute their hypotheses as they attempt to solve BioWorld cases » (Lajoie et al. 2001).

Tout comme « Exploring the Nardoo », BioWorld offre aux élèves des outils cognitifs d'échafaudage au cours de l'apprentissage, une des caractéristiques fondamentales des environnements d'apprentissage constructiviste (Jonassen, 1995).

Les simulations, comme les simulations d'intégration, les simulations conceptuelles et les simulations empiriques, sont qualifiées de constructivistes du fait qu'elles permettent aux utilisateurs de créer une multitude de situations en modifiant des variables. Ces simulations favorisent l'exploration du comportement d'un système donné et la vérification d'hypothèses et de théories émises par l'apprenant. En revanche, les simulations d'information, ainsi que celles de renforcement, d'expérimentation, symbolique et opérationnelle, considèrent l'utilisateur comme un joueur externe avec des conditions fournies.

6.2.3. Apports de l'utilisation des simulations en enseignement des sciences

La recherche en didactique des sciences s'intéresse depuis plusieurs années à l'utilisation des simulations pour favoriser les apprentissages; nous résumons quelques-uns des principaux travaux sur cette question.

En enseignement des sciences, la réalité des systèmes dynamiques complexes est souvent présentée d'une manière simplifiée afin de permettre aux étudiants de se focaliser sur l'information critique ou les compétences à développer et par conséquent, de faciliter leur apprentissage. Dans cette perspective, l'usage des simulations s'avère très approprié pour exécuter des procédures simplifiées et des tâches cognitives (Grabe et Grabe, 1996). À l'aide des simulations, la distance entre la réalité dynamique des systèmes et l'enseignement statique des écoles est significativement réduite (Wilensky et Stroup, 2000). On peut proposer un phénomène normalement complexe sous forme d'une simulation simple qui permet à l'étudiant d'en développer une compréhension intuitive; nous citons comme exemple l'utilisation de Thinker Tools en physique qui a permis de démontrer une meilleure interprétation des forces agissant sur un objet en mouvement chez les étudiants du secondaire par rapport aux étudiants de niveau postsecondaire ayant reçu un enseignement traditionnel (White et Frederiksen, 2000).

Selon Mintz (1993), une des applications informatiques les plus prometteuses dans l'enseignement des sciences est l'utilisation de simulations pour développer des outils didactiques appropriés pour des expérimentations que nous ne pouvons pas réaliser par une expérimentation conventionnelle de laboratoire en classe. En ce sens, Strauss et Kinzie (1994) soulignent que les simulations se substituent aux expériences dangereuses, aux manipulations relativement longues et/ou aux expérimentations dont le matériel pédagogique coûte cher, notamment dans les cas de la physique nucléaire, de la physique atomique ou de l'astronomie.

Selon Roth and Roychoudhury (1993), les simulations peuvent activer des compétences procédurales de base chez les étudiants en science comme observer, mesurer, communiquer, classifier, prédire, ainsi que des compétences procédurales intégrées à la

démarche scientifique, comme contrôler des variables, formuler des hypothèses, interpréter des données, expérimenter et formuler des modèles (Padilla et al.,1990). En ce sens, Lazarowitz et Huppert (1993) ont étudié l'impact de l'usage des simulations informatiques dans le développement des compétences procédurales en science des élèves de 10e année en biologie. Leurs résultats ont indiqué que la simulation informatique a permis aux étudiants d'utiliser les compétences de communication par graphique, d'interpréter les données et de contrôler les variables dans des expériences simulées; en outre, elle les a aidés à maîtriser ces compétences.

De leur part, Alessi et Trollip (1991) notent également que la simulation fournit aux étudiants l'opportunité d'observer une expérience réelle et d'interagir avec elle. En enseignement des sciences, la simulation peut jouer un rôle important en donnant l'opportunité de faire des expériences virtuelles. Les simulations basées sur des problèmes permettent aux étudiants de contrôler les expériences, d'examiner de nouveaux modèles et d'améliorer leur compréhension intuitive des phénomènes complexes. Elles offrent aussi la possibilité d'explorer le comportement d'un système donné, de vérifier les hypothèses et les théories formulées par l'apprenant et de les confronter avec des observations, de réaliser leurs propres expériences, de construire de nouvelles connaissances et de donner du sens à ce qu'ils apprennent.

Mintz (1993) a étudié des simulations informatiques comme outil d'investigation scientifique, qui est considéré comme un principe fondamental pour l'apprentissage des sciences (National Standard Science Education, 1996). Le procédé d'investigation scientifique comprend l'élaboration des hypothèses, la réalisation des expériences, l'observation et l'enregistrement des données, ainsi que la rédaction des conclusions. Il a conclu que la simulation peut augmenter et améliorer le travail en classe. Les simulations, comme outil d'investigation, améliorent la motivation et l'intérêt. Elles peuvent également se présenter comme un outil efficace de prévision en biologie (Lavoie et Good, 1988). La simulation offre ainsi des environnements d'investigation scientifique et des outils cognitifs nécessaires pour l'échafaudage de l'apprentissage et permet d'appliquer les compétences de

résolution des problèmes. Elle permet aussi de développer explicitement la métacognition des élèves et de réfléchir sur leur apprentissage. Citons l'exemple des outils métacognitifs « Reflector » et « Advisor » dans Thinker Tools que les étudiants peuvent consulter pour réfléchir sur leur travail.

Étant donné que les représentations non verbales stimulent l'activité cérébrale (Clements et McMillen, 1996), la simulation permet de représenter à la fois le phénomène graphiquement et ses manifestations, comme des courbes ou des données connexes. Elle multiplie les formes de représentation : images, animations, graphiques, données numériques (Cholmsky, 2003). En laissant à l'apprenant le choix des représentations qu'il privilégie, la simulation permet d'individualiser l'apprentissage et ouvre la porte à une analyse des modes de pensée de l'élève par l'observation du choix de ses représentations à l'écran, par des outils métacognitifs et des évaluations. Les simulations peuvent être utilisées pour accroître le niveau de motivation et nous permettent aussi de suivre les traces des apprenants au cours de leur apprentissage; l'enseignant sera en mesure d'avoir une idée plus précise de leur mode de fonctionnement et de leurs stratégies de résolution; cet outil lui permet de repérer les difficultés de raisonnement chez les apprenants. Il sera ainsi en mesure d'ajuster ses interventions en conséquence (Wetherill, Midgett et McCall, 2002).

D'autres recherches se sont penchées sur la question suivante : La simulation peut-elle être aussi efficace que le laboratoire conventionnel ou bien le remplacer ? Les résultats montrent que cela dépend du concept ou de la situation. Par exemple, Choi et Gennaro (1987) ont comparé l'efficacité d'expériences simulées sur ordinateur par rapport aux expériences de laboratoire pour l'enseignement du concept du déplacement de volume aux étudiants du collégial. Ils ont trouvé que les expériences simulées sur ordinateur étaient aussi efficaces que des expériences manuelles de laboratoire. Ceci suggère qu'il est possible d'utiliser une expérience simulée sur ordinateur au lieu d'une expérience conventionnelle de laboratoire dans l'enseignement de certains concepts, tels que le déplacement de volume, et obtenir ainsi des résultats comparables qui exigent des interactions cognitives avec le

contenu, plutôt que des interactions psychomotrices ou physiques comme le goût, l'odeur, les interactions de contact.

Les simulations peuvent aussi être utilisées comme un outil complémentaire au laboratoire. En effet, la combinaison des simulations et de l'expérimentation au laboratoire permet par exemple de gagner du temps en réduisant la durée de la séance en laboratoire (McKinney, 1997; Kennepohl, 2001). En ce sens, Riopel (2004) a développé un environnement informatisé d'apprentissage de la mécanique qui associe un système d'expérimentation assistée par ordinateur et un système de simulation. Cet environnement permet aux étudiants de comparer une séquence vidéo animée et une simulation, grâce à une superposition directe d'images d'objets réels et virtuels. L'auteur a constaté que les élèves sont engagés dans le processus de modélisation, faisant intervenir des étapes de raisonnement inductives et déductives. Il en déduit que ce genre de logiciel permet un apprentissage plus rapide de la modélisation.

Selon Choi et Gennaro (1987), les simulations conduites avec un objectif bien précis peuvent être des outils appropriés pour minimiser des déficiences d'apprentissage. Par exemple, les simulations peuvent être utilisées pour l'échafaudage de l'apprentissage de ceux qui ont la capacité d'imagination relativement basse et dont la compréhension des systèmes dynamiques est critique. L'étudiant choisira lui-même le temps qu'il passera et les manipulations qu'il fera. D'après Roschelle et al. (2000), il est important d'avoir une rétroaction immédiate après l'apprentissage de l'étudiant pour rectifier le raisonnement au besoin. Les simulations étant caractérisées par des réponses rapides, l'étudiant peut multiplier les essais sans le découragement associé à la longueur de ces expérimentations habituelles. L'élève peut arrêter la saisie de données et peut reprendre l'expérience avec des entrées différentes. Le nombre de manipulations peut être également augmenté.

En somme, l'utilisation des simulations permet aux étudiants d'explorer des concepts plus abstraits ou de plus haut niveau, et de développer une meilleure compréhension des notions enseignées, des phénomènes et des lois physiques par une approche scientifique, soit la formulation d'une hypothèse, la mise à l'épreuve de l'idée,

l'isolation et la manipulation des paramètres (Jimoyiannis et al, 2001). L'utilisation des simulations apporte des changements chez l'apprenant et l'enseignant sur le plan du contexte et sur le plan du contenu. La simulation rend l'apprenant actif et permet une rétroaction instantanée. L'apprenant est appelé à prendre une part active dans son apprentissage soit par l'appropriation d'un rôle dans un système complexe, soit par l'élaboration et l'application d'un scénario de recherche ou des manipulations, des observations ou des modélisations. Les recherches montrent aussi que les simulations peuvent :

- fournir des expériences ouvertes pour des étudiants (Sadler et al, 1999);
- livrer des outils pour l'enquête scientifique (Windschitl, 2000) et des expériences de résolution des problèmes (Howse, 1998);
- contribuer au changement conceptuel (Windschitl et Andre, 1998);
- être considérées comme un niveau intermédiaire entre les modèles théoriques et les manifestations physiques des phénomènes étudiés (Richoux et al, 2002).

6.2.4. Simulations et changement conceptuel

Zietsman et Hewson (1986) ont utilisé une simulation informatique pour diagnostiquer et corriger les conceptions alternatives au sujet de la vitesse. Leurs résultats indiquent que les simulations peuvent être des représentations crédibles de la réalité et que la remédiation produit un changement conceptuel crucial des étudiants tenant des conceptions alternatives. D'autres études ont trouvé peu ou pas d'effet en utilisant des simulations pour favoriser le changement conceptuel. Dans une étude sur les circuits électriques, Carlsen et André (1992) ont trouvé que l'utilisation du texte conçu pour produire le changement conceptuel a comme conséquence une meilleure performance sur des tests, alors que l'utilisation d'une simulation sur ordinateur et du texte ne produit pas de changement plus grand que lorsqu'on utilise le texte tout seul.

En utilisant un environnement d'apprentissage soutenu par une utilisation constructiviste des simulations, l'insatisfaction surgit dans une simulation lorsque l'étudiant est confronté aux résultats qui sont en conflit avec ses prédictions. Le fait de demander aux étudiants de faire et d'expliquer ces prévisions peut activer ses connaissances antérieures et

les forcer à articuler des explications. La prédiction, la manipulation et la vérification encouragent « le discours interne » à occuper une place importante dans l'esprit de l'étudiant (Perkins et Simmons, 1988); en stimulant la vérification de l'hypothèse de la part de l'étudiant, l'enseignement par ordinateur offre la possibilité de provoquer le conflit conceptuel (Osborne et Squires, 1987), à savoir le conflit entre les hypothèses émises par un individu et les observations qu'il effectue (confrontation empirique); ceci permet de créer une insatisfaction intellectuelle. Les utilisations objectivistes des simulations deviennent souvent des exercices excessivement prescrits qui reflètent la nature confirmatoire simple de certaines activités de laboratoire de science. Ceci peut favoriser, d'une manière efficace, la satisfaction envers un examen critique des phénomènes simulés et rater l'occasion d'activer les connaissances antérieures.

L'apprentissage des sciences en utilisant les simulations peut susciter la remise en question des conceptions grâce à une confrontation avec la réalité et avec les pairs. La discussion peut également encourager le développement conceptuel (Driver, 1989). Les interactions verbales avec les pairs permettent aux élèves d'énoncer leurs conceptions. Les interactions sociales créent une dissonance cognitive et une argumentation entre les élèves, ce qui les amène à prendre conscience de l'existence d'idées différentes des leurs. Cette contradiction peut les amener à modifier leurs idées initiales (Fleer, 1992).

6.2.5. Simulation comme état intermédiaire entre le monde théorique et le monde pratique

En se basant sur les travaux de Tiberghien (1994), Buty (2003) a mis en évidence l'existence de deux mondes séparés : 1) le monde des théories et des modèles où une théorie physique est considérée comme une totalité articulée de concepts, sa cohérence interne étant assurée par le fait qu'il est produit par un débat scientifique collectif et public; 2) le monde des objets et des événements, qui est l'ensemble des connaissances ou énoncés qui réfèrent aux objets du monde réel et aux événements qui s'y déroulent. L'auteur note que la mise en relation entre les deux mondes pour les élèves pose un problème fondamental de l'apprentissage de la physique. Pour sa part, Martinand (2002) utilise le terme référent au lieu de l'expression monde; il distingue ainsi entre référent empirique et

réfèrent modèle. Il a également identifié que la mise en relation entre le concret et l'abstrait, entre l'expérimental et le théorique passe par la modélisation scientifique.

« Pour ceux que préoccupe l'éducation scientifique et technologique des jeunes, la question des rapports entre concret et abstrait, formel et celle de l'articulation entre expérimental et théorique passent par la prise en compte des modèles, du rôle que nous voulons leur faire jouer, de la manière dont ils peuvent être appropriés : sciences et techniques ne peuvent plus s'en passer. »

Naturellement, les élèves apprennent plus facilement lorsqu'ils effectuent des liens entre le monde des théories et des modèles, et le monde des objets et des événements. Notons également que les événements essentiels relatifs aux phénomènes lumineux sont invisibles à l'œil nu. Nous proposons donc de recourir à des objets et des événements de simulation. Ces entités permettent de donner une représentation des concepts en jeu, via la manipulation de ces concepts. Ces entités virtuelles, observables et manipulables ne sont ni des objets réels, ni des éléments du monde des théories/modèles. Elles servent d'intermédiaires, dans l'activité de résolution de problème, entre le monde des objets/événements et le monde des modèles, c'est-à-dire le monde de la simulation.

Dans le cadre d'une étude sur les potentialités de la simulation, Richoux et al. (2002) présentent les simulations comme appartenant à un plan intermédiaire entre le modèle théorique et la réalité. La simulation apparaît alors comme un espace intermédiaire, pouvant faciliter la mise en relation de la réalité et des théories ou modèles. Ces auteurs font une distinction entre les logiciels qui prennent comme référence la phénoménologie et les logiciels qui prennent comme référence le modèle. Ainsi les activités fondées sur les simulations sont conduites de telle manière que l'étudiant est censé renforcer ses connaissances relatives au modèle et/ou à la théorie ou renforcer ses connaissances factuelles et ses aptitudes à la reconnaissance de phénomènes (Richoux et al, 2002).

Par ailleurs, selon Beaufils et Richoux (2003), le plan intermédiaire que représente la simulation est constitué de trois plans permettant l'implémentation du modèle et la production de résultats :

- *Le plan de la mise en programme, de l'implémentation du modèle, où apparaissent les calculs qui sont effectués : équations de base de la théorie ou du modèle, méthode de résolution numérique pas à pas d'une équation différentielle, tirage aléatoire, etc.*

- *Celui de la représentation symbolique du modèle : celui où des objets « briques élémentaires » munis de propriétés sont mis en relation pour modéliser un système plus complexe dont on étudie le comportement. C'est dans ce plan également qu'apparaissent les courbes issues des calculs.*
- *Celui de représentation figurative ou imagée : où l'on peut mettre en scène le modèle de façon à évoquer l'espace de réalité. » (Beaufils et Richoux, 2003)*

Face aux risques de confusion des apprenants entre données, calculs et représentations, l'aspect numérique de la simulation est très important pour la compréhension de la tâche et pour les compétences nécessaires issues de l'utilisation d'un logiciel de simulation. Beaufils (2001) souligne aussi que la compréhension de l'activité proposée repose sur l'explicitation du fonctionnement de la simulation; la cohérence de l'activité impose donc l'explicitation du modèle. De plus, la compréhension et le contrôle des résultats obtenus dépendent également de la connaissance du principe des calculs.

6.2.6. Simulation et modélisation

6.2.6.1. Modèles et modélisation en enseignement des sciences

La question de la modélisation dans l'enseignement des sciences a été étudiée par plusieurs auteurs desquels nous avons tiré quelques définitions.

6.2.6.1.1. Définition

Les chercheurs Martinand (1992) et Tiberghien (1994) ont décrit l'importance de la modélisation dans l'enseignement scientifique; les modèles sont les fruits de l'activité scientifique permettant aux scientifiques de dépasser la simple description des faits et mettant en relation la perception des phénomènes et le recours aux formalismes théoriques.

Un modèle peut être défini comme étant une représentation mentale d'un être du monde réel et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler mentalement le comportement de cet être (Hebenstreit, 1992).

Selon Robardet et al. (1997), un modèle est un instrument théorique construit en vue d'interpréter et de prévoir des événements concernant des phénomènes. Il peut être mathématisé; il s'exprime alors sous forme d'équations qui peuvent être implémentées au moyen d'une application informatique permettant de manipuler ce modèle et de réaliser des simulations.

Gilbert et al. (1998) croient que la compréhension des modèles et de la modélisation est nécessaire pour la compréhension des phénomènes scientifiques.

6.2.6.1.2. Catégories de modèles

Les travaux sur la modélisation dans l'enseignement des sciences a conduit les auteurs à définir plusieurs catégories de modèles. Ainsi, Gilbert et al. (1998) distinguent entre :

- les modèles mentaux (Mental models) : ce sont des représentations personnelles et privées du système cible ou du phénomène modélisé;
- les modèles exprimés (Expressed models) : ce sont des modèles exprimés par un individu à travers une action, un discours ou un écrit;
- les modèles consensuels (Consensus models) : il s'agit de modèles exprimés qui ont été soumis à un groupe social, ces modèles pouvant être ceux de la communauté scientifique qui ont été approuvés par une personne compétente;
- les modèles d'enseignement (Teaching models) : ce sont des modèles spécialement construits pour aider, dans un contexte scolaire, à la compréhension de tel ou tel phénomène ou théorie scientifique.

Ces auteurs pensent que les modèles sont utilisés dès le plus jeune âge comme moyen pour mieux comprendre la réalité et qu'ils permettent de générer des prédictions qui pourront ensuite être testées de manière empirique et être transférées à d'autres contextes. Ces modèles contiennent les éléments correspondants aux éléments essentiels du modèle consensuel; ils permettent d'introduire le modèle consensuel que les étudiants reconnaissent comme important mais difficile à comprendre.

Grosslight et al. (1991) citent trois grands niveaux de modèles selon leur formation, leur nature et leur usage :

- les modèles sont pensés comme étant des copies de la réalité qui peuvent être incomplètes, parce que le concepteur du modèle l'a souhaité ainsi;
- les modèles sont pensés comme ayant été produits avec un objectif précis, spécifique, certains aspects ayant été omis, supprimés ou mis en valeur, et l'accent

étant mis plus sur la réalité et sa modélisation que sur les idées théoriques sous-jacentes à la description;

- le modèle est vu comme ayant été construit pour servir et développer des idées plus que pour copier la réalité. Le concepteur du modèle joue un rôle essentiel et actif dans le processus de modélisation, dans sa manipulation et les tests permettent le développement des idées.

Les étudiants conçoivent les modèles principalement aux deux premiers niveaux tandis que le troisième niveau reste du domaine exclusif des experts.

6.2.6.1.3. Fonctions des modèles

Johsua et Dupin (1993) identifient trois fonctions d'un modèle :

- le modèle explique la réalité; dans le mécanisme de cette explication interviennent les différentes sortes de causalité;
- le modèle prévoit l'évolution de la réalité qu'il décrit;
- le modèle prévoit l'émergence ou la production de réalités nouvelles.

Selon Giordan et Martinand (1987), les modèles peuvent faciliter la représentation du caché, comme le passage des représentations premières remplacées par des variables, des paramètres et des relations entre variables, à des représentations plus relationnelles et hypothétiques; ils peuvent également aider à penser le complexe, par exemple une description des variables d'état et d'interaction, des relations internes entre ces variables, des valeurs, des contraintes extérieures par l'identification et la manipulation de bons systèmes. En physique, ces deux aspects de la réalité sont associés à des modèles formels qui utilisent des variables symboliques et des relations analytiques.

Selon Jonassen et al. (1999), la modélisation est un outil très efficace qui favorise un apprentissage approfondi et une réflexion à propos des facteurs qui influencent un système ou un processus dynamique. De plus, en raison de complexité de la tâche, la modélisation favorise le travail d'équipe et par conséquent les élèves sont invités à s'entraider pour coconstruire le savoir.

*« Building model is among the most intentional intellectual processes that students can engage in. They constantly must reflect on the system components, test them, and revise them. »
(Jonassen et al., 1999)*

Selon Buty (2000), le processus de modélisation est décrit par quatre ensembles de choix :

- *« il faut choisir la théorie applicable au champ des phénomènes étudiés [...] »*
- *« Le phénomène traité doit être complexe et multiforme; sa modélisation oblige donc ensuite à désigner quels sont ses éléments pertinents, quels sont au contraire ceux qu'il faut négliger. En ce sens, le physicien construit son champ expérimental. »*
- *« Puis, il faut associer aux éléments retenus les représentations externes les plus commodes dans le cadre du modèle. »*
- *« Enfin, il faut préciser les relations qu'entretiennent les éléments du modèle les uns avec les autres. »*

Le processus de modélisation est ainsi considéré comme le moteur principal du fonctionnement de la physique comme discipline d'enseignement (Buty, 2003); Harrison et Treagust (2000) vont même jusqu'à définir la modélisation comme étant l'essence de la pensée et du travail scientifique. En distinguant plusieurs types des modèles d'enseignement scientifique, ces chercheurs notent deux points importants :

- Plusieurs conceptions scientifiques mettent en jeu des processus et non pas des objets, par exemple l'équilibre chimique ou le phénomène de l'effet photoélectrique. Si l'explicitation de ce caractère de processus n'est pas prise en compte dans l'enseignement, cela constitue une source de difficultés pour les apprenants.
- Les simulations dynamiques, qui peuvent articuler plusieurs types de modèles, permettent de modéliser des phénomènes aussi complexes que le réchauffement de la planète.

La modélisation peut nécessiter le recours à la simulation lors de la mise au point d'un modèle (Durey, 1987; Beaufils et al, 1987), tandis que l'utilisation pédagogique de la simulation repose souvent sur un modèle préétabli. En ce sens, la modélisation est donc l'élaboration d'un modèle en référence à un phénomène ou un système du monde réel. Il s'ensuit un ensemble de relations physico-mathématiques (représentation formelle du modèle) qui peuvent être transformées en un ensemble de lignes de programme (représentation informatisée du modèle), dont la mise en fonctionnement, produisant des résultats numériques et/ou graphiques, constitue la simulation.

6.2.6.1.4. Modélisation basée sur simulation : Activités et conditions

Comme nous l'avons indiqué ci-haut, la modélisation est un moyen fructueux pour interpréter le monde des choses, certes, mais surtout pour donner du sens aux grandeurs et aux concepts de la physique, dans leur articulation avec les objets et les événements. En conséquence, l'élaboration de séquences d'enseignement doit permettre à l'élève de mettre en relation les différents niveaux de modélisation.

Par contre, dans le cas de l'utilisation des environnements de simulation, l'activité de modélisation peut s'effectuer sans passage par l'explicitation des représentations informatiques du modèle et viser directement le plan intermédiaire des représentations. Selon Beaufils (2001), deux cas peuvent se présenter :

- *« La modélisation réside dans l'élaboration d'un modèle directement par la manipulation des objets représentés (réalisation « directe » du pendule simple avec Interactive Physique, par exemple).*
- *La modélisation consiste en la spécification de tout ou partie des équations du modèle permettant les calculs (écriture dans un logiciel tel que Graph'x ou Stella de l'équation différentielle d'un circuit RLC pour en étudier le comportement en régime libre). »*

Beaufils (2001) mentionne qu'un risque pédagogique peut se poser dans le cas où la relation entre la simulation et le modèle est complètement masquée à l'utilisateur. L'étudiant peut alors manipuler sans aucune référence au modèle théorique choisi. Il faut donc que l'enseignant puisse prévoir des questions, des activités permettant d'établir les liens, et qu'il procure les informations nécessaires, notamment l'explicitation du modèle et l'explication de la méthode de calcul.

Les activités de simulation présentent un avantage de même nature que les activités expérimentales sur paillasse : les élèves sont actifs et intellectuellement engagés. Cependant, cette implication intellectuelle des élèves n'est pas automatique en simulation. Elle doit être suscitée par une planification spécifique des activités par l'enseignant.

En se basant sur l'idée que la simulation est un état intermédiaire entre le monde réel et le monde des modèles et des théories, Richoux et al. (2002) envisagent deux types d'activités scientifiques :

- des activités centrées sur la mise en relation de la simulation avec le monde des modèles et des théories; ces activités viseront l'explication conceptuelle du

résultat, soit la résolution analytique permettant de retrouver de façon explicite le résultat obtenu par simulation.

- des activités centrées sur la mise en relation des résultats de la simulation et du monde réel. Il s'agit de retourner à l'expérience pour confronter, qualitativement ou quantitativement, les résultats rendus par le modèle.

Dans le cadre de l'enseignement par modélisation en physique, Beaufils (2001) propose le développement de deux catégories d'activités :

- Activités de modélisation ou construction d'un modèle, notamment l'utilisation de ces outils pour élaborer des modèles de phénomènes physiques. Cette activité permet d'étudier tel ou tel système, tel ou tel phénomène et un logiciel de simulation peut contribuer à la faciliter, l'importance de l'intervention du professeur étant modulée en fonction de la nature des logiciels et des modèles explicites ou implicites mis en jeu.
- Activités d'exploration et de manipulation de modèles visant la connaissance des propriétés de ces modèles et l'appropriation de leurs règles de fonctionnement; la manipulation du modèle issu de la théorie permet une investigation sur le fonctionnement du modèle. Cette activité repose sur l'obtention de résultats numériques ou graphiques avec lesquels il convient de se familiariser. La manipulation du modèle passe aussi par l'utilisation raisonnée des différentes représentations, en favorisant d'abord l'apprentissage de la maîtrise de ces représentations (vecteurs, courbes), et ensuite en utilisant cette maîtrise des représentations pour obtenir les résultats dans des situations plus complexes.

Dans l'activité d'investigation de modèle, ou l'expérimentation sur modèle, celui-ci est programmé et le logiciel permet d'en explorer les propriétés qui en découlent. C'est le cas d'une simulation de l'effet photoélectrique permettant l'exploration du modèle quantique de la lumière et les différentes propriétés qui en découlent. C'est dans cette orientation que nous souhaitons développer une activité de modélisation basée sur une simulation de l'effet photoélectrique.

6.2.7. Limite de l'utilisation des simulations

Notons que les simulations sur ordinateur ne peuvent pas remplacer complètement les leçons des sciences en salle de classe et les activités de laboratoire. Notons également un certain nombre d'inconvénients relatifs à l'utilisation des simulations : les simulations peuvent présenter une vision simpliste de la réalité, ou introduire des comportements erronés associés au modèle physique utilisé ou au modèle informatique du modèle physique. Le modèle doit être une représentation approximative de la réalité. Il est préférable de proposer plusieurs modèles explicatifs d'un phénomène donné. Pour éviter de dérouter l'apprenant, le modèle ne doit être ni trop réduit ni trop complexe. De même, une utilisation fréquente des simulations peut engendrer une dépendance à l'ordinateur (Richoux et al, 2002).

Les simulations sur ordinateur doivent être introduites au bon moment dans le déroulement du cours, en utilisant la bonne stratégie pédagogique (découverte guidée, vérification de certaines propriétés, vérification des limites de validité, exploration de certains aspects difficiles, etc.) et avec des objectifs pédagogiques précis (surmonter une difficulté théorique, montrer les limites d'une théorie naïve, etc.); l'enseignement des sciences dépend de la façon dont elles ont été incorporées aux programmes d'études et de la façon dont le professeur les utilise. Il est important de signaler la disparité de l'approche pédagogique dans ce domaine; en effet, non seulement la structure du cours ou de l'activité peuvent être différentes, mais aussi la méthode d'apprentissage peut s'avérer trop technique et même parfois dogmatique.

Hebenstreit (1992) mentionne que les utilisateurs risquent de confondre un phénomène réel et sa représentation en simulation. Pour éviter un tel risque, Richoux et al. (2002) insistent sur le fait qu'il est nécessaire de séparer clairement la réalité et les théories. Selon ces auteurs, la simulation peut être présentée comme état intermédiaire intéressant pour faciliter le passage entre la réalité et la théorie.

Mark (1982) note que les simulations omettent nécessairement certains facteurs; nous courons ainsi le risque que les étudiants oublient l'existence de ces facteurs connexes.

Thomas et Hooper (1991) ajoutent que dans certaines situations, l'apport des simulations est incertain, voire nul. En effet, lorsque l'étudiant ne parvient pas à trouver la solution, il ne peut pas savoir quels sont les aspects de son modèle du système qui sont inappropriés.

6.2.8. Récapitulation

La synthèse des avantages des simulations pour l'apprentissage des sciences, mis en évidence par les différents travaux de recherche auxquels nous venons de faire référence, nous permet de dire que la simulation sur ordinateur peut être considérée comme support de nouvelles activités dans le cadre de l'enseignement scientifique : l'accent est mis d'une part sur la manipulation des modèles et d'autre part sur le jeu des représentations, tant graphiques que mentales. Elle permet d'élaborer un environnement où les élèves peuvent mobiliser leurs connaissances en physique. De plus, les activités sur simulations reposent sur les possibilités de modification des variables du modèle et/ou de celle des représentations graphiques. Nous retenons que l'utilisation de la simulation nous fournit des opportunités :

- de modifier des variables (par exemple, l'intensité du courant électrique, la tension, la fréquence de la lumière et l'intensité lumineuse) et de manipuler des modèles scientifiques.
- d'explorer et de construire des modèles scientifiques comme dans le cas du modèle quantique de la lumière.
- de faire des représentations, tant graphiques que mentales. En enseignement de l'effet photoélectrique, nous pouvons ainsi construire les courbes correspondant aux variations des paramètres en temps réel sur l'écran pour l'intensité du courant électrique en fonction de la tension, pour l'intensité du courant électrique en fonction de l'intensité lumineuse ou la puissance lumineuse et pour l'énergie cinétique des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse.
- d'élaborer un environnement où les élèves peuvent mobiliser leurs connaissances en physique.

- de visualiser de phénomènes scientifiques. Prenons par exemple la visualisation du mouvement des électrons entre les deux électrodes, caractéristique qui ne peut être visible lors de l'expérimentation réelle; il s'agit d'un aspect particulièrement utile pour aider les sujets à visualiser l'effet du changement de la tension, de la fréquence ou de l'intensité lumineuse. Cette représentation visuelle dynamique du phénomène aide les sujets à surmonter les difficultés conceptuelles en électricité, par exemple celle de la mise en la relation entre la vitesse des électrons et le courant électrique, ou celle de la signification physique du potentiel d'arrêt.
- de faire des manipulations difficiles ou impossibles à réaliser dans un laboratoire conventionnel, dans le cas la réalisation de l'expérience des métaux différents (cuivre, sodium et zinc) ou dans le cas où le matériel est inaccessible à cause du coût élevé.
- d'observer une expérience réelle, d'interagir avec elle et de faire, visuellement, le lien entre les graphes et l'expérience, plus clairement que lorsqu'ils utilisent des images statiques.

Pour expliquer l'effet photoélectrique aux apprenants dans une approche socioconstructiviste, nous avons choisi de leur faire effectuer une expérimentation virtuelle avec la simulation de l'effet photoélectrique PhET de l'Université du Colorado à Boulder (PhET, 2007), disponible sur Internet (voir figure 1). Le choix de cette simulation est fondé sur un modèle simplifié de l'effet photoélectrique et constitue un véritable outil pédagogique pour introduire la dualité onde-particule de la lumière du fait qu'elle présente un grand nombre des avantages cités dans le paragraphe précédent. La simulation PhET peut apporter un renfort considérable à l'enseignement et à l'apprentissage de l'effet photoélectrique ; elle offre un soutien aux étudiants pour faire correctement leur prévision des résultats du changement des différents paramètres (McKagan et al., 2009).

7. Apprentissage mobile

Au cours des dernières années, il y a eu une augmentation rapide de l'utilisation de dispositifs mobiles tels que les ordinateurs de poche, les ordinateurs portables, les tablettes numériques, les assistants numériques personnels (PDA), les téléphones cellulaires, les

téléphones intelligents (ou Smartphones), les appareils GPS, les lecteurs DVD mobiles, les baladodiffuseurs (podcaster), les télévotants (clickers), les calculatrices graphiques et les dictionnaires électroniques, par les jeunes et dans tous les secteurs. Ces dispositifs peuvent engager les étudiants dans des activités riches d'apprentissage à travers la navigation sur Internet, la recherche sur le web, le « messaging », les forums de chat ou clavardage et des communautés en ligne. En effet, il y a un plus grand accès à l'information et au matériel didactique, à partir de n'importe quel endroit et en tout temps, au moyen de ces dispositifs mobiles. La portabilité et la mobilité de ces dispositifs nous offrent un apprentissage dans tous les lieux de vie.

Pour certains, c'est la première chance réelle de réaliser « un ordinateur pour chaque étudiant ». Cette idée est soutenue par les initiatives qui ont pour objectif de rendre cette technologie mobile plus abordable. Citons par exemple l'initiative du groupe OLPC (One Laptop Per Child ou « un portatif par enfant ») et l'initiative internationale G1:1. Pour d'autres, elle fournit aux éducateurs de nouveaux outils puissants pour créer des opportunités innovatrices d'apprentissages.

Toutefois si l'apprentissage mobile semble techniquement prêt à prendre son essor, les champs d'investigation pédagogiques restent encore à définir. Les recherches autour de l'apprentissage mobile ne cessent de se multiplier, en particulier dans les pays anglo-saxons et nordiques.

Dans ce travail, nous décrirons l'apprentissage mobile et citerons les potentialités et limites des dispositifs mobiles pour l'apprentissage et l'enseignement. Ensuite, nous passerons en revue la littérature sur les différentes recherches dans le domaine de l'apprentissage mobile. Finalement, nous tenterons de mettre en relief l'apprentissage collaboratif et m-learning pour identifier la problématique de conception des activités d'apprentissage en utilisant les dispositifs mobiles pour soutenir des pratiques éducatives innovatrices.

7.1. Définition de l'apprentissage mobile

L'apprentissage mobile ou m-learning est un concept relativement récent qui a émergé comme réponse à la croissance rapide des dispositifs mobiles. Le m-learning se

préoccupe de la nature de l'enseignement et de l'apprentissage qui surviennent lorsqu'on utilise ces appareils mobiles. Ce terme m-learning a été inventé pour couvrir un ensemble complexe de possibilités ouvertes par la convergence des nouveaux dispositifs mobiles, des infrastructures sans fil et des développements du e-learning.

Selon Winters (2006), l'apprentissage mobile est généralement défini en se basant sur quatre grandes perspectives :

7.1.1. M-learning et e-learning

La première perspective consiste à définir l'apprentissage mobile par rapport à l'apprentissage électronique. Ici, le m-learning est considéré comme une extension de e-learning. Nous allons tout d'abord définir l'apprentissage en ligne, ensuite nous situons l'apprentissage mobile par rapport au e-learning. Nous considérons la définition de l'apprentissage en ligne adoptée par « The Open and Distance Learning Quality Council » (2005) :

« E-Learning is the effective learning process created by combining digitally delivered content with (learning) support and services. »

Selon Paulsen et al. (2002) en revanche, l'apprentissage en ligne est caractérisé par la séparation des enseignants des apprenants, (différent de l'apprentissage face à face), l'influence d'une organisation éducative, l'utilisation d'un réseau informatique pour présenter ou distribuer un certain contenu éducatif et la livraison d'une communication bidirectionnelle par l'intermédiaire d'un réseau informatique.

Quinn (2000) définit l'apprentissage mobile par rapport à l'apprentissage en ligne :

« M-learning is the intersection of mobile computing and e-learning : accessible resources wherever you are, strong search capabilities, rich interaction, powerful support for effective learning, and performance-based assessment. E-Learning independent of location in time or space. »

Milrad (2004) considère que le e-learning est un apprentissage soutenu par les outils numériques « électroniques » et les médias; par analogie, il définit l'apprentissage mobile ou m-learning comme l'e-learning qui utilise des dispositifs mobiles et une transmission sans fil. Chabra et Figueiredo (2001) relie étroitement l'apprentissage mobile à l'éducation à distance : *« The ability to receive learning any time, any where and on any device »*

L'apprentissage mobile est généralement défini comme e-learning par l'intermédiaire des dispositifs mobiles (Trifanova et Ronchetti, 2003). Selon Brown (2003) :

« Mobile technologies have the power to make learning even more widely available and accessible than we are used to in existing e-learning environments » (p. 1).

Il propose un diagramme d'apprentissage flexible (figure 3) pour situer l'apprentissage mobile.

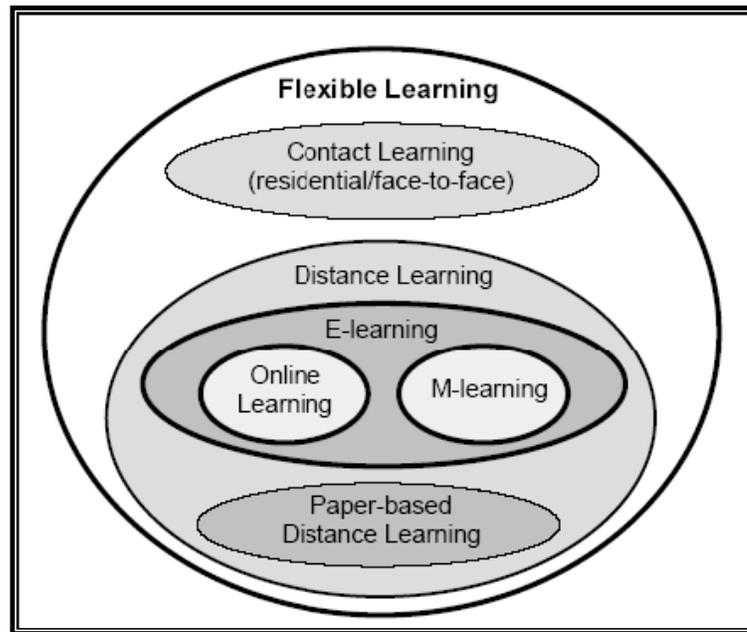


Figure 3. Les différents types d'un apprentissage flexible (Brown, 2003)

Ce diagramme montre que le m-learning est un sous-ensemble du e-learning et le e-learning est un sous-ensemble de l'apprentissage à distance. M-learning est considéré comme un apprentissage qui peut avoir lieu n'importe où et en tout temps avec l'aide d'un dispositif mobile. Le dispositif doit être capable de présenter un contenu d'apprentissage et de fournir une communication sans fil entre le professeur (s) et l'étudiant (s).

Au travers de ces différentes définitions, nous pouvons constater que définir le m-learning par rapport au e-learning pose un certain problème dans la mesure où, pour certains, le e-learning suppose nécessairement un apprentissage à distance et pour d'autres non.

7.1.2. Perspective « technocentrique » du m-learning

Du point de vue « technocentrique », l'apprentissage mobile est vu comme un apprentissage qui utilise les dispositifs mobiles tels que les PDA, les téléphones mobiles, les iPods, les stations des jeux portables, etc. Cette perspective est la plus dominante dans la littérature. Ces définitions n'aident pas à caractériser la nature unique de l'apprentissage mobile (Winters, 2006). Les définitions basées sur la technologie et sur le e-learning ne cherchent qu'à placer l'apprentissage mobile quelque part sur le spectre de portabilité du e-learning (Traxler, 2005).

7.1.3. M-learning complément de l'éducation formelle

La troisième perspective repose sur l'idée de la complémentarité et l'amélioration de l'éducation formelle. Selon Winters (2006), il n'est pas clair que ce point de vue soit totalement correct; des formes d'éducation à distance existent depuis plus de cent ans et cette perspective mène aux questions concernant la place de l'apprentissage mobile par rapport aux autres formes de l'éducation traditionnelle.

7.1.4. Perspective du m-learning centré sur l'apprenant

Dans la quatrième perspective, l'apprentissage mobile doit être focalisé sur la mobilité de l'apprenant plutôt que sur les dispositifs mobiles (Sharples, 2006). Dans cette perspective, O'Malley et al. (2003) définissent l'apprentissage mobile comme :

« Any sort of learning that happens when the learner is not at a fixed, predetermined location, or learning that happens when the learner takes advantage of learning opportunities offered by mobile technologies. »

Nous retenons que la définition du m-learning a évolué dans le temps partant de la technologie pour aller vers l'apprenant; c'est cette perspective qui nous paraît la plus prometteuse à explorer dans les recherches actuelles. Le m-learning peut être défini comme un apprentissage à travers un contexte focalisé sur l'apprenant qui peut utiliser une technologie fixe ou portable. C'est un apprentissage dans un monde où la mobilité est croissante.

7.2. Technologies mobiles : potentialités et limites

Les technologies mobiles présentent des avantages, mais elles ont aussi des inconvénients que nous allons montrer en résumé.

7.2.1. Avantages des technologies mobiles

Les dispositifs mobiles offrent des possibilités éducatives qu'on ne trouve pas facilement dans d'autres outils d'apprentissage. Ils permettent notamment à l'enseignant et aux étudiants d'accéder au contenu en tout temps et de vivre de nouvelles situations d'apprentissage dans différents lieux et non seulement à l'école. Ce point de vue est supporté par les technologies sans fil et par l'omniprésence des dispositifs mobiles.

Milrad (2004) note quelques caractéristiques des technologies mobiles qui peuvent être bénéfiques pour l'éducation :

- **Portabilité** : nous pouvons apporter les appareils mobiles à n'importe quel endroit. Les applications mobiles et sans fil permettent un apprentissage omniprésent. Les limites de l'apprentissage en classe peuvent être prolongées aux limites des réseaux sans fil.
- **Interactivité sociale** : comme les technologies mobiles et sans fil permettent la communication entre les pairs, les étudiants ont un moyen d'interagir directement, d'échanger des données et de collaborer face à face.
- **Individualité** : la technologie fournit un échafaudage qui peut être adapté au cheminement individuel de l'étudiant durant sa recherche.
- **Sensibilité du contexte** : les systèmes digitaux fournissent la capacité d'un enregistrement automatique et d'une utilisation globale.
- **Connectivité** : elle peut relier les dispositifs portables aux appareils de saisies données à d'autres dispositifs, et à un réseau commun qui crée un environnement réel de partage.
- **Fusion des mondes numériques et physiques** : le monde numérique et le monde physique peuvent être combinés dans des systèmes mobiles. Par exemple, les sondes saisissent l'information réelle et la représentent dans un format qui est utilisable dans le monde numérique.

Attewell et Savill-Smith (2003) pensent que les ordinateurs portables augmentent la motivation des étudiants et améliorent leurs compétences d'organisation; ils encouragent le sens de la responsabilité, aident à soutenir l'apprentissage collaboratif et indépendant et

agissent comme outils de référence; ils permettent également de suivre la trace du progrès des étudiants et de fournir l'évaluation.

7.2.2. Inconvénients des technologies mobiles

McLean (2003) identifie quelques limites et contraintes des technologies mobiles qui conditionnent les possibilités d'applications éducatives. En premier lieu, la mémoire et le stockage sont limités; en effet, les caractéristiques techniques comme les mémoires volatiles et permanentes ou les interfaces (écran, stylet, clavier, haut-parleur, micro...) de ces appareils posent de fortes contraintes. Elles imposent une réflexion approfondie sur le fond et la forme des sujets pédagogiques à présenter. De plus, les écrans sont généralement trop petits pour l'usage des applications sophistiquées; la qualité graphique des écrans varie selon le modèle; la taille de l'écran limite l'utilisation de texte ainsi que le recours aux illustrations. Ceci pose un problème particulier pour l'apprentissage des sciences qui utilise une grande partie du contenu sous forme d'équations mathématiques. Par ailleurs, les méthodes de saisie sont plus ou moins difficiles à manier et défavorisent l'interactivité en privilégiant les questions à réponses courtes et exactes par rapport aux analyses complètes et réfléchies. La connexion constitue aussi une barrière importante; la vitesse de connexion change rapidement selon les différents protocoles (infrarouge, Bluetooth, sans fil), la communication à travers les différents navigateurs et plateformes est encore difficile. Enfin à l'heure du travail de McLean, les coûts n'étaient pas encore abordables et le développement continu de la technologie milite contre la stabilité.

7.3. Apprentissage mobile et théories d'apprentissage

Un rapport, produit par Futurlab du National Endowment for Science Technology and the Arts (Nesta), propose une vision sur les développements actuels et futurs de l'apprentissage mobile. Dans ce rapport, Nasmith et al. (2005) présentent six larges catégories d'activités avec de tels dispositifs, basées sur des théories d'apprentissage :

1) Théories behavioristes : Ces activités favorisent l'apprentissage comme un changement d'actions observables des étudiants. En appliquant ce paradigme à la technologie éducative, l'usage des technologies mobiles est caractérisé par la présentation d'un problème (stimulus)

suivi de la contribution de la part de l'étudiant à la solution (réponse). La rétroaction du système fournit alors le soutien. Citons deux exemples :

- BBC Bitesize (2003-2004) est une initiative qui fournit du matériel de révision via les téléphones mobiles au moyen d'un jeu téléchargeable et des messages texte SMS.
- Dans le projet « Classtalk », Dufresne et al. (1996) ont examiné l'utilisation d'un système de réponse en classe (Télévotants ou Clickers) où des étudiants de la première année en physique à l'Université du Massachusetts peuvent répondre aux questions du professeur immédiatement avec un dispositif mobile et le système affichera alors le résultat total. Selon ce résultat, le professeur peut situer le niveau de compréhension de chaque étudiant du contenu du cours. Classtalk a aidé les étudiants à clarifier leur compréhension conceptuelle de la matière en leur permettant d'articuler et d'élaborer leurs idées, de mener des réflexions en tenant compte à la fois de leurs propres idées, des idées des autres, et d'évaluer l'utilité d'un nombre de perspectives différentes. L'avantage d'un tel système est qu'il accorde à tous les étudiants la possibilité de présenter leur point de vue, s'ils étaient à l'aise ou non, et de présenter leurs idées à toute la classe. Cette technologie permet en plus d'engager les élèves dans un apprentissage actif dans un cours, Classtalk renforçant la communication globale en classe.

2) Théories constructivistes : dans cette approche, les étudiants construisent de nouvelles connaissances à partir des connaissances actuelles et antérieures. Les étudiants sont encouragés à être des constructeurs actifs de la connaissance; les dispositifs mobiles les engageant dans un contexte réaliste par l'accès en même temps aux outils de soutien. Nous pouvons prendre l'exemple des simulations participatives : ce sont des simulations qui soutiennent les étudiants pour mieux comprendre le contenu du cours à travers la participation et la pratique. Les étudiants utilisent les dispositifs mobiles pour prendre part à une simulation participative commune. À travers cette participation active, les étudiants peuvent discuter et obtenir les réponses correctes; par conséquent, ils comprennent mieux ce qu'ils ont appris. Par exemple, le jeu de virus a été développé par le MIT (Colella, 2000)

pour expliquer le processus de dégagement d'un virus. Colella (2000) décrit une étude où les apprenants ont pris part à une simulation participative de la propagation d'un virus. Chaque étudiant est invité à simuler et à observer la propagation d'un virus dans une population, en se déplaçant en classe et en rencontrant les autres étudiants face à face. Les étudiants ont pu prendre part à une simulation sans devoir se préoccuper des règles sous-jacentes à cette simulation. Les étudiants ont ainsi pu se concentrer sur les questions importantes : D'où vient la maladie ? Comment se propage-t-elle ? Qui peut l'attraper ? Les principaux résultats de cette étude sont :

- les élèves ont participé aisément à la simulation, et ont estimé qu'il s'agissait d'une expérience enrichissante et stimulante;
- les étudiants ont collaboré avec succès en répondant aux questions sur la simulation;
- La technologie a facilité les interactions entre les étudiants et a renforcé les canaux habituels de la communication.

3) Théories situées : l'apprentissage situé suppose que l'apprentissage peut être amélioré en s'assurant qu'il aura lieu dans un contexte authentique. Les dispositifs mobiles sont particulièrement bien placés pour offrir des applications dans des contextes différents situés sur le terrain. Ils permettent la collecte d'informations à partir de l'environnement et peuvent donc s'appuyer sur ces contextes afin d'améliorer les activités d'apprentissage. La sensibilité au contexte des appareils mobiles peut aider les apprenants en permettant d'avoir accès à un soutien personnalisé. Ce type de soutien approprié peut être considéré comme une forme d'échafaudage. Le projet Ambient Wood (Rogers et al., 2004) constitue un exemple où l'information numérique, couplée avec le nouvel environnement des objets physiques imbriqués électroniquement, peut être la source des autres formes d'interactions plus intuitives et permettant aussi la juxtaposition des actions avec leurs effets, ce qui encourage les étudiants à réfléchir et à penser au-delà de leurs actions, à des niveaux supérieurs d'abstraction.

4) Théories collaboratives : Les dispositifs mobiles peuvent aussi soutenir l'apprentissage collaboratif basé sur l'ordinateur de poche en fournissant une autre signification à la coordination sans remplacer les interactions humaines. On montre en effet que les

dispositifs mobiles peuvent soutenir l'apprentissage collaboratif et fournir un autre moyen d'assurer la coordination sans chercher à remplacer les interactions humaines. L'ordinateur de poche mémorise toutes les informations nécessaires à l'organisation des activités et l'interface utilisateur facilite la coordination, en forçant les participants à accomplir une tâche à la fois dans une séquence spécifique. La communication est appuyée par l'envoi des messages sur le statut de l'activité, des données, des erreurs ou les résultats disponibles pour tous les participants. La synchronisation est soutenue puisque chaque étudiant doit attendre l'action de l'autre avant de passer à l'étape suivante de l'activité. En exigeant que tous les participants s'entendent sur une réponse avant de procéder, l'application facilite l'interactivité et offre un espace de négociation. Enfin, les dispositifs mobiles favorisent la mobilité, en permettant aux participants d'utiliser la technologie partout et en favorisant les interactions sociales naturelles.

5) Théories informelles et perpétuelles (à vie) : il s'agit des activités qui soutiennent l'apprentissage en dehors d'un environnement d'apprentissage formel. L'apprentissage peut avoir lieu en dehors de la salle de classe et, par défaut, dans la vie quotidienne. De ce fait, les technologies mobiles présentent une opportunité pour soutenir ce type d'apprentissage.

Notons également que les dispositifs mobiles peuvent être employés par les professeurs pour apporter l'assistance immédiate, passer en revue les notes obtenues par les étudiants, accéder aux données centrales de l'école, et contrôler leurs programmes plus efficacement. Au niveau universitaire, les dispositifs mobiles peuvent fournir le matériel de cours aux étudiants, y compris les dates de remise des tâches ou des travaux et les informations sur des changements d'horaire et des locaux.

7.4. Apprentissage mobile : problématiques et défis

Jusqu'à présent, la plupart des chercheurs se sont penchés sur le côté technologique plutôt que sur le côté pédagogique de l'apprentissage mobile. Il est alors difficile de discerner une problématique distincte dans ce domaine. Nous présentons dans ce paragraphe les différents problèmes ou questions que nous avons identifiés dans la littérature.

Les travaux de recherches existants et les projets dans le domaine du m-learning montrent qu'il est probablement plus adapté à l'apprentissage des processus, dans le cas où une connaissance spécifique devrait être recherchée/proposée à un certain moment, ou bien dans une séance de réflexion où on est face à des discussions entre les membres d'un même groupe distribué. De même, le m-learning semble être bénéfique dans le cas où des données sont rassemblées ou utilisées « sur le champ » et où l'information dans un contexte est fortement liée au contenu d'apprentissage.

Nous pouvons constater que l'étude de l'apprentissage mobile s'éloigne peu à peu de son état embryonnaire, les chercheurs évoluent rapidement pour explorer plusieurs aspects de l'apprentissage mobile. Sharples (2006) identifie ainsi les trois premières phases de l'apprentissage mobile comme suit : la première phase où les systèmes de réponse (clickers), les ordinateurs portables en classe, les livres électroniques et l'enregistrement de données sont utilisés; cette phase est focalisée sur la technologie portable pour l'enseignement conventionnel et la formation. La seconde phase est caractérisée par des études sur le terrain et des visites de musées, des mises à jour professionnelles; les dispositifs mobiles sont utilisés comme des organisateurs d'apprentissage personnel et comme support aux étudiants nomades. La troisième phase comprend l'apprentissage contextuel, l'apprentissage en réalité mixte (projet Ambient Wood). Cette phase est focalisée sur l'apprentissage dans un contexte donné, la mise en œuvre de l'apprentissage à vie et la conception d'espaces d'apprentissage.

Un contenu mobile peut prendre la forme d'un message court (sms) (Stone et al., 2002) jusqu'à celle d'un message sophistiqué en vidéo; cependant, le contexte de la situation d'apprentissage et la pédagogie doivent être les facteurs de guidage. Notons qu'aucune recherche n'a étudié les applications des animations graphiques multimédias ni l'impact de la simulation sur les dispositifs mobiles.

7.4.1. Problématique de l'apprentissage contextuel

La question qui, selon nous, se dégage clairement est que l'apprentissage mobile se définit non seulement à travers l'usage des dispositifs mobiles, mais aussi à travers des contextes spécifiques d'apprentissage. Il s'agit d'« une société en mouvement ». Grâce à la

technologie qui devient plus petite, plus personnelle, omniprésente et puissante, la société mobile sera mieux soutenue.

Jusqu'à présent, la plupart des applications éducatives à l'aide de la technologie mobile se situent principalement dans un contexte d'apprentissage informel ou d'apprentissage à vie (lifelong learning). L'apprentissage mobile se réalise beaucoup plus en dehors des environnements éducatifs traditionnels. Des chercheurs suggèrent qu'il est nécessaire d'élaborer de nouvelles théories d'apprentissage pour expliquer ce que nous voyons dans ces contextes. Par exemple, Sharples, Taylor et Vavoula (2005) avancent que les théories existantes de l'apprentissage ne sont pas suffisantes pour prendre l'apprentissage mobile en considération, car elles tendent à supposer que l'apprentissage se fait soit en classe, soit à la maison; de plus, même les théories existantes, qui considèrent l'apprentissage en dehors de la classe, ne considèrent pas la mobilité des étudiants. Trois facettes de l'apprentissage mobile sont particulièrement significatives : d'abord, les étudiants sont en mouvement, puisqu'ils se déplacent physiquement; deuxièmement, une vaste quantité d'apprentissage a lieu en dehors des situations d'apprentissage formel; troisièmement, il y a une mise en évidence de la nature omniprésente de l'apprentissage.

7.4.2. Problématique de conflit entre apprentissage informel personnalisé et l'apprentissage traditionnel en classe

Nous considérons que la problématique du conflit entre l'apprentissage informel personnel et l'enseignement traditionnel en classe nécessite une attention particulière. En effet, nous faisons face à deux systèmes physiquement séparés : l'un est le système de l'éducation à l'école, influencé par les programmes d'études et les examens et organisé par un professeur; l'autre système est réglé par le réseautage social, négocié par le profil personnel et les logiciels d'interaction avec les pairs. En ce sens, nous citons Sharples (2006) :

« The classroom is becoming the arena in which two domains of learning and communication are enacted and opposed : the child-led, commercially mediated, subversive, peer collaborations of social networking, and the teacher-led, curriculum mediated, institutional teaching. »

Nous pensons qu'il y a donc un besoin crucial de mener davantage de recherches pour établir la relation entre ces deux formes d'apprentissage formel et informel.

7.4.3. Problématique de conception des activités sur des dispositifs mobiles

Les dispositifs mobiles nous offrent l'opportunité de concevoir l'apprentissage différemment : pour créer les communautés d'apprentissage prolongé ou étendu, pour lier les personnes dans les deux mondes réel et virtuel, pour fournir l'expertise sur demande et pour soutenir un apprentissage à vie. La conception des activités qui utilisent les dispositifs mobiles pour soutenir des pratiques éducatives innovatrices devient alors un défi critique. Le rapport entre les théories d'apprentissage, la conception pédagogique et l'utilisation des technologies éducatives joue un rôle important pour l'adoption des technologies mobiles dans les lieux éducatifs. Afin de concevoir des pratiques éducatives innovatrices, nous croyons qu'il est nécessaire d'adopter une perspective intégratrice à l'apprentissage enrichi par la technologie où la pédagogie et la théorie de l'apprentissage sont les forces d'une formation plutôt que les technologies mobiles. Dans cette perspective, les technologies mobiles peuvent être employées en tant que « mindtools » de collaboration qui aident les étudiants dans les deux environnements, informels et formels, à conduire des activités et à compléter des tâches impossibles à réaliser sans ces technologies. Milrad et al. (2006) proposent l'utilisation d'une conception basée sur les scénarios, en utilisant les recommandations de Carroll (2000). Dans cette perspective, les scénarios sont caractérisés par l'environnement, les acteurs, les objectifs, les actions et les événements. Milrad et al. (2006) considèrent qu'il est nécessaire d'élaborer un modèle ou une taxonomie pouvant aider les concepteurs à identifier les situations et les conditions éducatives avec lesquelles les technologies mobiles complètent un rôle unique tout en essayant de soutenir la pratique éducative innovatrice.

7.4.4. Problématique de l'efficacité des dispositifs mobiles

Une autre question, qui nécessite plus de recherches, est celle de la mesure efficace de l'apprentissage dans les environnements mobiles et les méthodes appropriées pour cette évaluation.

Bien qu'il existe des méthodes éprouvées d'évaluation des applications spécifiques de la technologie pour l'apprentissage, Josie Taylor (2006) note l'absence d'un cadre plus large pour l'évaluation formative dans des environnements mobiles, principalement en

raison de sa nouveauté. En effet, relativement peu d'enseignants et d'apprenants ont une expérience de travail dans ce sens et une question se pose : comment peut-on introduire des manières de s'engager dans l'apprentissage avec de nouveaux artefacts ? Et comment peut-on évaluer l'efficacité technique ou pédagogique d'un dispositif mobile ? Selon Josie Taylor (2006), l'évaluation a besoin de répondre aux défis de l'apprentissage mobile, et l'accent doit être mis sur l'analyse de l'activité, quelle qu'en soit la perspective théorique. Le fait que les apprenants soient de plus en plus indépendants signifie que les évaluateurs doivent faire preuve de plus d'adaptativité et de réactivité. Cependant, il est également possible pour les évaluateurs eux-mêmes de tirer profit de la mobilité dans la collecte de données sur le terrain, et si possible, grâce à l'instrumentation des dispositifs.

7.4.5. Problématique de l'intégration des connaissances

La problématique de l'intégration des dispositifs mobiles dans des situations éducatives et particulièrement en classe nous paraît capitale. Selon Ulrich (2006), trois types d'intégration sont distingués : d'abord l'intégration de médias, en termes de circulation de l'information et de conservation des résultats à travers différents médias utilisés dans l'apprentissage; puis l'intégration des processus pour la facilitation et le soutien technique du processus d'apprentissage des apprenants impliqués dans différents rôles; à ce titre, le projet de Nussbaum au Chili exemplifie le processus d'intégration en utilisant le PDA avec les différentes fonctions pour le professeur et pour les groupes d'apprentissage; et enfin, l'intégration des connaissances, dans le sens d'une structuration plus large, d'une systématisation et d'une « défragmentation » de la connaissance. L'intégration des connaissances est vue comme un défi pour les environnements d'apprentissage orchestrés par les dispositifs mobiles pour les deux formes d'apprentissage, formel et informel.

7.4.6. Problématique de l'usage des dispositifs mobiles en classe en situation de collaboration

Selon Sharples (2003), la technologie mobile peut fournir aux étudiants un « espace d'apprentissage conversationnel dominant ». Cet auteur rapporte que les dispositifs mobiles d'apprentissage individuel sont portatifs, s'adaptent aux capacités d'un individu, sont

disponibles quel que soit le lieu et se prêtent à une utilisation intuitive. Ces avantages correspondent aux besoins des apprenants pour l'apprentissage des sciences. La mobilité et la portabilité ont le potentiel de favoriser des changements quant à l'accès et aux interactions dans l'apprentissage des sciences. Ces changements ont posé de nouvelles difficultés dans l'enseignement de la science dans deux domaines distincts : 1) l'accroissement de la communication au sujet de la science et 2) la collaboration dans des activités pratiques où dans des travaux sur le terrain en science.

En ce qui concerne le domaine de communication scientifique, la tendance principale des curricula actuels est d'engager les étudiants dans une perspective où les problèmes de la science moderne sont considérés d'intérêt public. Dans ces curricula, généralement au niveau de l'école, une nouvelle emphase est mise sur la connaissance scientifique comme moyen d'accès à la citoyenneté, en plus d'être, selon le point de vue traditionnel, un atout pour la science et pour la vie professionnelle future de scientifique. La science telle qu'on en parle dans les médias et la science vue sous l'angle des visites de musées présentent des exemples de communication scientifique vulgarisée. Des études se sont penchées sur l'apprentissage de la science dans les musées (Proctor et Tellis, 2003) et aux musées des sciences, dont l'Exploratorium (Fleck et al., 2002). Dans ce cas, les technologies mobiles sont utilisées en situation de collaboration et comme moyen de communication scientifique.

Par ailleurs, la collaboration dans l'apprentissage des sciences implique l'engagement des étudiants dans une activité significative. La nature de la participation des étudiants aux travaux pratiques et le rôle que cette participation peut jouer en apprentissage des sciences ont été beaucoup discutés. La question qui se pose alors est de savoir si l'ensemble des tâches constitue un réel travail scientifique, en particulier en biologie ou en sciences de la terre, des disciplines où les travaux sur le terrain jouent un rôle essentiel dans le développement des compétences des étudiants et de leur compréhension. Toutefois, de nombreuses possibilités nouvelles s'ouvrent au moyen des dispositifs mobiles, par exemple, il y a des avantages en termes d'enregistrement de données ou d'observation au moment où les élèves sont en mouvement sur le terrain.

Dans notre recherche, nous accordons une attention particulière à cette deuxième opportunité offerte par ces technologies mobiles, car nous savons que la collaboration et la discussion peuvent soutenir les étudiants dans leur apprentissage. En effet, la plupart des éducateurs contemporains de la science soulignent l'efficacité de la collaboration et du dialogue dans l'apprentissage. L'apprentissage collaboratif supporté par ordinateur (CSCL) offre la possibilité de fournir les conditions essentielles au succès de l'apprentissage collaboratif, et comme le soulignent Zurita et Nussbaum(2004), ces conditions sont :

« l'interactivité exigée pour réaliser les buts partagés; la possibilité des discussions au sujet des buts; le soutien de l'exécution des résultats pour l'individu et pour le groupe; la coordination des rôles des participants et des règles; la synchronisation et le partage des tâches ».

Les dispositifs mobiles offrent la possibilité d'un environnement mobile naturel de collaboration avec des interactions face à face. De plus, chaque étudiant, en ayant son propre dispositif, a le contrôle physique du matériel, à la différence des étudiants qui attendent leur tour sur un même PC; ce qui contribue à une synchronisation des tâches et fournit l'interactivité nécessaire aux apprentissages.

7.5. Apprentissage collaboratif et dispositifs mobiles

L'apprentissage collaboratif est souvent couplé à l'utilisation de la technologie éducative et s'emploie davantage au niveau collégial et universitaire (Brufee, 1993). Des systèmes informatiques sont souvent conçus pour le soutenir. Un effort reste à faire pour l'exploration de la façon dont la technologie peut augmenter et améliorer les interactions face à face des utilisateurs en apprentissage collaboratif. L'utilisation des ordinateurs personnels (PC) fixes pour soutenir l'apprentissage collaboratif est nommée CSCL (Computer supported collaborative Learning). Le but principal des environnements d'apprentissage collaboratif (CSCL) est de fournir aux étudiants les outils avancés pour la construction de la connaissance ayant lieu dans une interaction entre les utilisateurs. Dans la plupart des applications de CSCL, la coconstruction de la connaissance se produit dans un espace partagé de travail où les étudiants extériorisent et rapportent leurs idées. Plusieurs expériences mentionnent des effets extrêmement positifs sur l'apprentissage et sur l'interaction sociale des pairs en utilisant les ordinateurs; une bonne conception des activités d'apprentissage collaboratif basé sur l'ordinateur (CSCL) peut offrir le soutien pour la

coordination, la communication, la négociation et l'interaction des membres du groupe (Gutwin et al, 1996). Cependant, Kreijns et al. (2002) notent le fait qu'il y a des évaluations de la conception des environnements du CSCL qui ne réalisent pas complètement les espérances pédagogiques quant au support interactif, à l'apprentissage coordonné du groupe et à la construction sociale de la connaissance. En effet, la technologie des ordinateurs personnels (PC) peut présenter une contrainte dans le cas où l'utilisation des environnements CSCL tente de soutenir les activités en face à face. Dans la plupart des salles de classe, la collaboration en face à face entre des étudiants est soutenue par des paradigmes traditionnels d'interaction. Scott et al. (2000) expliquent que lorsque l'apprentissage collaboratif utilise l'ordinateur personnel, les apprenants sont limités par le paradigme fondamental de l'ordinateur qui est celui d'une personne pour un ordinateur. D'autres chercheurs (Curtis et Lawson, 1999) ont rapporté que certains membres du groupe ont des difficultés à communiquer, à coordonner et à interagir avec d'autres et que le manque de contact visuel et l'absence du langage non verbal est un des facteurs pouvant causer ces difficultés.

Dans ce contexte, l'utilisation des dispositifs mobiles pour soutenir l'apprentissage collaboratif, que l'on désigne par MCSCL (Mobile Computer supported collaborative Learning), s'avère donc prometteuse. En effet, les dispositifs mobiles donnent l'occasion de fournir à chaque étudiant son propre ordinateur. Leur petite taille et leur aspect personnel présentent des possibilités de combiner ces techniques, de façon nouvelle et unique, afin de rendre plus efficace l'enseignement. La mobilité, la flexibilité et l'accès instantané offerts par les dispositifs mobiles sont des caractéristiques des technologies actuelles appréciées par les étudiants, qui leur permettent de s'engager dans des activités fortement collaboratives, en tout lieu et en tout temps.

Selon Luchini et al. (2002), les ordinateurs portatifs ont un impact positif sur le travail collaboratif en classe. La facilité de faire communiquer simplement votre portatif avec celui de votre collègue pour circuler (recevoir ou émettre) l'information, a transformé quelques activités typiques individuelles en opportunités d'apprentissage avec des discussions constructives et l'apprentissage en face-à-face. Les membres de groupe

emploient leur propre mobilité et la mobilité de leurs dispositifs pour coordonner la collaboration entre eux, alors qu'ils échangent l'information par l'intermédiaire du réseau sans fil qui les relie ensemble (Stanton et Neale, 2002).

En outre, Jipping et al. (2001) croient que les ordinateurs portatifs peuvent être utilisés avec des méthodes traditionnelles d'enseignement en classe et qu'ils peuvent représenter de nouvelles plateformes pour des méthodes d'enseignement audacieuses et uniques. Ils ont également rapporté que la collaboration et l'apprentissage se produiront si et seulement si, la technologie est conçue pour s'adapter au contexte prévu de son utilisation. Avec une conception inadéquate, une interface mobile peut également s'avérer être une barrière à l'apprentissage.

En ce sens, même si les technologies mobiles semblent prometteuses pour favoriser l'apprentissage collaboratif, plusieurs questions se posent : Comment peut-on coordonner l'apprentissage d'un petit groupe en classe en utilisant les dispositifs mobiles ? Quel est l'impact de ces dispositifs sur les différentes composantes de l'apprentissage collaboratif ? Comment peut-on concevoir des activités pour favoriser une collaboration plus efficace ?

La conception des activités d'apprentissage en utilisant les dispositifs mobiles pour soutenir des pratiques éducatives innovatrices devient donc une problématique critique, en raison notamment de l'abondance des dispositifs mobiles et de la croissance rapide de leur utilisation.

Nous portons une attention particulière à cette problématique, car nous nous intéresserons à la conception d'une activité de MCSCL basée sur une simulation comme outil de modélisation scientifique et comme exemple d'intégration de connaissances via des dispositifs mobiles. Dans ce qui suit, nous adoptons, dans ce travail, la théorie de l'activité (Activity theory ou en mot abrégé AT) qui nous fournit un cadre conceptuel pour l'analyse des besoins, les tâches et les résultats pour la conception des activités MCSCL.

7.6. Cadre théorique de l'apprentissage mobile

Rappelons que Vygotsky (1978) annonçait que les interactions des apprenants avec leur environnement ne sont pas directes, mais médiatisées par l'utilisation des outils et des signes. Ces outils peuvent être physiques, par exemple, les ordinateurs de poche en réseaux

sans fil, ou intellectuels, par exemple, les règles et les rôles affichés sur les ordinateurs de poche. Les outils physiques sont utilisés pour traiter ou manipuler des objets tandis que les outils intellectuels peuvent être utilisés pour influencer un comportement. Cette idée a été développée par Leont'ev (1981) en proposant un modèle hiérarchique pour l'analyse d'une activité. Inspiré par cette analyse, Engeström (1987) a étendu la conceptualisation originale de Vygotsky sur la relation médiatisée entre le sujet et l'objet, en introduisant une version élargie du modèle de triangle d'activité qui intègre également les concepts de Leont'ev. Ainsi, Engeström propose un modèle général de l'activité appelé « *Activity theory* » (AT) pour analyser les pratiques humaines en tant que processus de développement à la fois individuel et social (Kuutti, 1996) et qui reflète sa nature collaborative. Le modèle AT apporte des contributions importantes aux domaines de la CSCL (Bodker, 1997; Mwanza, 2001; Nardi, 1996); il ne peut être ni compris ni analysé en dehors du contexte dans lequel il se produit. Les composants du modèle, illustrés dans la figure 4, sont : 1) l'objet de l'activité, c'est-à-dire les buts et les intentions; 2) les participants à l'activité, à savoir les personnes engagées; 3) les outils de médiation de l'activité, physiques comme les ordinateurs de poche, ou mentales, comme les modèles; 4) les règles, notamment les normes qui limitent l'activité; 5) la répartition du travail, par exemple, les actions des membres au sein du groupe par rapport aux tâches qui relèvent de la responsabilité du groupe; 6) la communauté, c'est-à-dire les personnes impliquées directement ou indirectement, dans l'activité; et 7) le résultat, plus précisément les résultats et les produits finaux des objectifs définis.

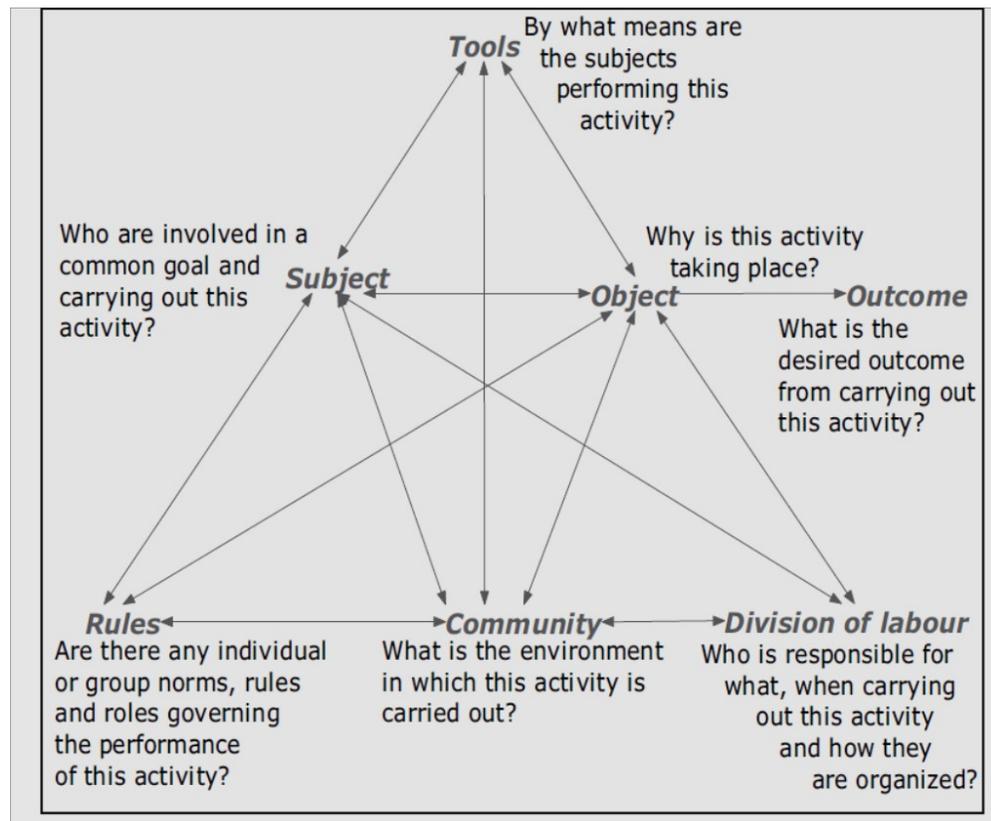


Figure 4. Modèle de la théorie de l'activité (AT) (Engeström, 1987)

Puisque le modèle AT est un outil descriptif, il est orienté vers la pratique. Il incarne une approche qualitative qui offre un angle différent pour l'analyse d'un processus d'apprentissage et de ses résultats, en se concentrant sur les activités de personnes engagées.

Pour étudier une situation d'apprentissage utilisant une analyse basée sur le modèle AT, les conditions suivantes doivent être remplies (Jonassen et Rohrer-Murphy, 1999) : 1) l'analyse doit être appliquée dans une période de temps suffisante pour que les activités pratiques du sujet puissent être examinées d'une manière appropriée; 2) les chercheurs devraient d'abord chercher les grandes tendances et ensuite chercher les fragments épisodiques étroits; 3) un ensemble varié de méthodes de collecte de données (entretiens, observations et enregistrements vidéo) et de points de vue (le sujet, la communauté et les outils) doit être inclus.

Jonassen et Rohrer-Murphy (1999) ont proposé un cadre théorique basé sur le modèle AT pour la conception des activités collaboratives. En se basant sur l'expérience de Jonassen et Rohrer-Murphy (1999), Zurita et Nussbaum (2007) proposent un cadre conceptuel pour les applications mobiles en apprentissage collaboratif (figure 5), en utilisant comme base le modèle théorique descriptif AT, pour spécifier les composantes du cadre et leurs relations. Ce cadre, comme le montre la figure 5, est constitué de trois grandes composantes : « réseau », « rôles et règles », « activité de collaboration ».

- Dans la composante « réseau », nous faisons la distinction entre les composantes sociale et technologique. La première est composée de la communication face à face entre les membres, tandis que la seconde se compose de communications entre les membres et leurs ordinateurs de poche et/ou seulement entre les ordinateurs de poche des membres. La mobilité offerte par les ordinateurs de poche et l'utilisation de communication sans fil renforcent les interactions sociales de type face-à-face.
- La composante « rôles et règles » contient toutes les normes individuelles ou collectives qui gouvernent l'activité : définir les règles, analyser les règles et les rôles de médiateurs et de médiation. Elle est divisée en composantes sociale et technologique. La composante sociale définit les relations collaboratives entre les membres, tandis que la composante technologique détermine les règles gouvernant le réseau sans fil des ordinateurs de poche qui établit les relations collaboratives entre les membres. La composante des rôles et des règles fournit la responsabilité individuelle et les facteurs de soutien mutuel nécessaire à un apprentissage collaboratif efficace.
- La composante « activité de collaboration » définit notamment les activités éducatives d'apprentissage collaboratif. L'objectif est l'activité qui est l'équivalent de l'objet dans le modèle AT. Les tâches définissent la division du groupe de travail en attribuant la responsabilité des tâches de l'activité et en décrivant la façon dont le groupe sera organisé. Enfin, notons trois types d'activités d'apprentissage collaboratif face à face qui encouragent l'interaction sociale : la gestion, la construction et l'échange. La composante de l'activité de collaboration remplit la responsabilité individuelle, le soutien mutuel et les facteurs d'interdépendance positive pour l'efficacité d'apprentissage collaboratif.

L'élément distinctif du cadre représenté dans la figure 5 est qu'il intègre les pratiques des apprenants et leur interaction avec les objets technologiques à partir du point de vue du modèle AT. Il spécifie également les composantes de la structure. Les deux principales caractéristiques de ce cadre sont: 1) de permettre l'analyse des pratiques humaines avec ces objets, par exemple, la conception de logiciels et les caractéristiques des ordinateurs de poche à partir du point de vue du modèle AT et 2) de préciser la structure, les composantes et les interrelations entre les activités de collaboration, en utilisant les ordinateurs de poche sans fil connectés en mode réseau, pour soutenir les interactions face-à-face entre les membres du groupe.

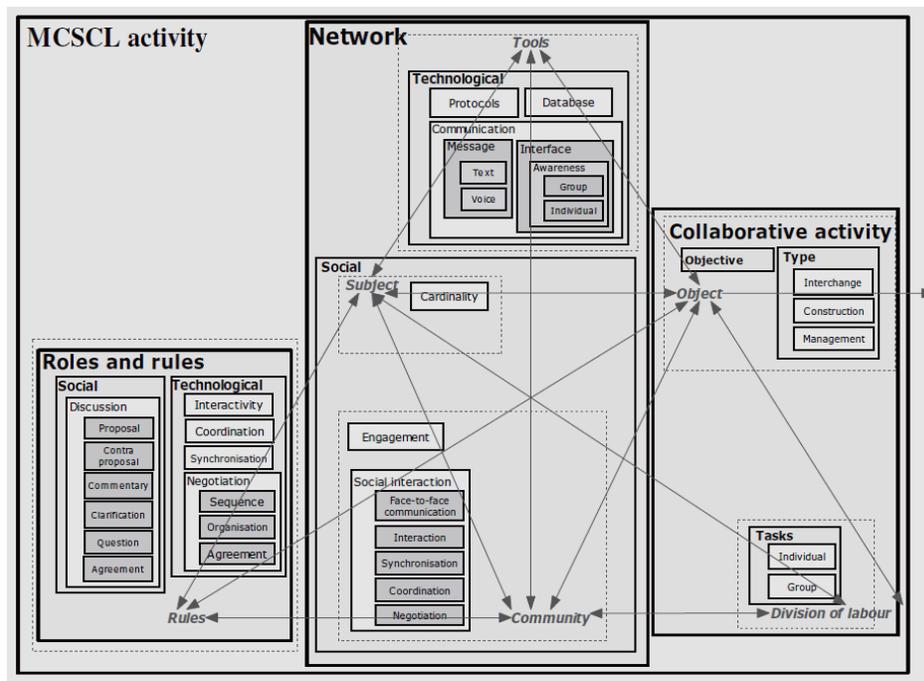


Figure 5. Cadre théorique basé sur le modèle de la théorie de l'activité d'Engeström (Zurita et Nussbaum, 2007)

7.7. Récapitulation

Dans ce travail, nous avons défini l'apprentissage mobile comme un apprentissage à travers un contexte centré sur l'apprenant et utilisant une technologie fixe ou mobile. Notons également les nombreux avantages de l'utilisation de ces dispositifs. Citons par exemple l'accès à l'information ou aux connaissances, quels que soient le lieu et le moment. La mobilité et la portabilité nous offrent de nouvelles opportunités pour planifier

des activités beaucoup plus efficaces; en effet, elles permettent un apprentissage omniprésent, une interaction sociale en face à face. Les étudiants auront un moyen pour interagir directement, échanger des données et collaborer face à face. En revanche, nous avons identifié quelques limites de l'usage de ces technologies, par exemple la taille de l'écran, la limite de la mémoire, la connexion et les coûts. Nous avons passé en revue les différentes théories pédagogiques utilisées comme supports à des activités d'apprentissage avec des dispositifs mobiles. Nous avons ensuite identifié quelques problématiques distinctes dans le domaine de l'apprentissage mobile : problématique de l'apprentissage contextuel, problématique du conflit entre apprentissage informel personnalisé et l'apprentissage traditionnel en classe, problématique de conception des activités sur des dispositifs mobiles, problématique de l'évaluation de l'apprentissage, problématique de l'intégration des connaissances, problématique de l'usage des dispositifs mobiles en classe en situation de collaboration. Les dispositifs permettent une meilleure communication en face à face et une discussion plus efficace entre les étudiants. C'est dans ce contexte que nous souhaitons explorer l'apport de ces technologies pour l'apprentissage en physique. En effet, nous allons élaborer une activité basée sur une simulation pour créer un déséquilibre cognitif chez l'étudiant et ensuite nous examinons l'apport de technologies mobiles pour soutenir une discussion plus efficace dans le but d'aider les étudiants à mieux gérer ce déséquilibre. La résolution de ce conflit peut mener à une construction de nouvelles connaissances. Pour concevoir des activités MCSCL et pour analyser les besoins, les tâches et les résultats, nous optons pour le modèle AT en nous basant sur le cadre conceptuel de Zurita et Nussbaum (2007).

Plusieurs questions de recherche se posent maintenant pour définir des activités pédagogiques qui favorisent l'apprentissage, en tenant compte des nouvelles possibilités offertes par les technologies mobiles. Aucune recherche n'a abordé la question de l'usage d'une simulation comme outil de modélisation scientifique dans des environnements mobiles d'apprentissage collaboratif. De plus, l'intégration des connaissances est vue comme un défi pour un environnement d'apprentissage orchestré par les dispositifs mobiles.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les éléments de réflexion qui nous paraissent indispensables dans un projet d'amélioration de l'enseignement de l'effet photoélectrique, et plus généralement de la physique moderne dans une perspective où les théories de Piaget et de Vygotsky sont utilisées de façon complémentaire. L'apprentissage des sciences dans ce cadre incite les étudiants à donner un sens au monde, à travers des processus à la fois individuels et sociaux (Driver et al, 1994). L'apprentissage est une activité sociale dans laquelle les apprenants sont impliqués dans la construction consensuelle du sens à travers des discussions, des négociations et des interactions avec les pairs et les enseignants. Ces interactions mettent en jeu le langage et plus largement la médiation. Ces situations d'interaction jouent un rôle essentiel dans l'apprentissage. Ils permettent la formation des concepts et des connaissances interpersonnelles, même s'il ne s'agit pas d'une reproduction du plan social externe. Cependant, pour une restructuration du plan intrapsychologique, nous trouvons plus opérationnel le constructivisme de Piaget repris dans les travaux sur le changement conceptuel menés dans le cas de l'apprentissage des sciences.

Nous croyons que la collaboration fournit un moyen riche de découvertes mutuelles, de rétroaction et de partage d'idées et elle est particulièrement utile pour des tâches qui nécessitent de nouvelles idées et le développement d'une connaissance approfondie (Damon et Phelps, 1989). L'approche collaborative valorise davantage une interdépendance à caractère associatif. Ce qui importe surtout pour les membres, c'est de mettre en commun leurs idées, de faire part de leurs réalisations et de trouver auprès du groupe une inspiration, un soutien et un appui (Henri et Lundgren-Cayrol, 2001). Récapitulons que l'apprentissage collaboratif développe les habiletés cognitives et sociales des apprenants, les introduit à une communauté d'apprenants, développe la pensée critique et aboutit à des formes d'interactions qui peuvent conduire à la stimulation des mécanismes de collaboration : clarification/explication, partage du travail collaboratif, recherche des informations, construction de connaissances, gestion de groupe/équipe, conflit, compromis, encouragement et socialisation (Adam et al, 1990). Dans une activité d'apprentissage

collaboratif, l'apprenant participe activement à son apprentissage, discute et négocie des solutions, partage ses connaissances avec ses pairs, se motive et motive ses collègues, interagit positivement avec ses pairs, fait preuve de leadership partagé, clarifie ou élabore des informations et analyse des informations. L'enseignant gère le milieu éducatif (évaluation, etc.), établit les paramètres de l'environnement pédagogique pour maximiser les interactions, explique le processus collaboratif aux apprenants, clarifie les objectifs de la matière, donne des directives selon les besoins et agit comme guide et animateur lors des discussions.

Rappelons également qu'au cours de l'apprentissage, l'élève est en interaction avec les pairs et avec les objets/événements du monde matériel. L'interprétation de ces événements est fortement influencée par les conceptions antérieures des élèves. Nous avons brossé, dans ce chapitre, un panorama des travaux sur la notion de changement conceptuel, de même que sur les principaux modèles de changement conceptuel dans le cas l'apprentissage des sciences. Le modèle de Posner et al. (1982), qui prend les conceptions comme entités indivisibles, systématise généralement l'apprentissage des conceptions scientifiques comme une rupture. Le modèle de Carey se contente de décrire la restructuration conceptuelle en accordant une place importante à l'étude des concepts qui sont à la base des théories intuitives très organisées. Notons également le modèle allostérique de Giordan qui préconise « faire avec pour aller contre » et l'approche par modèles scientifiques (Chinn et Samapungavan, 2008) qui s'avèrent très importants du fait qu'elle relie les modèles scientifiques et les modèles mentaux et propose de multiples niveaux d'analyse. Pour Vosniadou, le changement conceptuel est considéré comme un processus graduel dans lequel les structures conceptuelles initiales sont continuellement enrichies et restructurées. Le processus de changement conceptuel fait alors face à deux grandes perspectives : une de rupture et l'autre de continuité. Legendre (2002) classe notamment dans la perspective de la rupture l'approche de Vosniadou (1994), de Carey (1985) et de celui de Posner (1982). En contrepartie, elle classe l'approche de diSessa dans la perspective de la continuité.

Nous retiendrons de cette revue bibliographique :

- l'approche phénoménologique de diSessa à prendre en compte, même si elle ne décrit pas de théories naïves et ne fournit pas un cadre d'étude théorique; cependant il est difficile d'avoir un point de vue clair sur le changement conceptuel, puisque ses propositions ne sont pas centrées sur les concepts en tant que tels;
- la hiérarchie et la structuration des connaissances de Vosniadou et de Carey pour leur capacité à rendre compte de processus d'apprentissage et des difficultés variables de ces apprentissages, ainsi que des différences de structures conceptuelles entre novices et experts.

Selon Vosniadou et Ioannides (1998), il est important de fournir aux étudiants un environnement d'apprentissage qui encourage l'expression de leurs conceptions et croyances, puis de leur faire vivre des expériences significatives qui leur permettent de comprendre les limites de ces conceptions et croyances et conséquemment, d'être motivés à les réviser. Vosniadou et al. (2001) proposent quelques principes directeurs du design d'un environnement d'apprentissage ou de l'élaboration d'une séquence d'apprentissage en enseignement des sciences :

- Prendre en compte l'ordre d'acquisition des concepts d'un domaine.
- Prendre en compte les conceptions antérieures des étudiants.
- Faciliter la conscience métaconceptuelle.
- Dresser le profil des conceptions antérieures des étudiants.
- Motiver pour le changement conceptuel.
- Favoriser un conflit cognitif.
- Fournir des modèles et des représentations externes.
- Encourager la discussion et les interactions sociales des étudiants, notamment les interactions face à face.

Puisque le changement conceptuel passe obligatoirement par l'identification des conceptions des étudiants, nous tentons de présenter dans la partie suivante les différentes conceptions des étudiants au sujet du phénomène photoélectrique et au sujet de la lumière. Nous avons ainsi repéré des difficultés conceptuelles d'apprentissage dépistées par Ambrose et al. (1999), McKagan et al. (2009) et Steinberg et al (1996) :

- une croyance que la loi d'Ohm ($V = IR$) s'applique à l'expérience de l'effet photoélectrique;
- une incapacité à différencier entre l'intensité de la lumière, et par conséquent le flux de photons, et la fréquence de la lumière, et par conséquent l'énergie de photon;
- une croyance qu'un photon est un objet chargé;
- une incapacité de faire toute prévision d'un graphique d'intensité électrique en fonction de la tension (I-V) pour l'expérience photoélectrique;
- une incapacité à donner toute explication reliant des photons à l'effet photoélectrique.
- une difficulté à tracer un graphique Intensité-Tension qualitativement correct;
- une incapacité à interpréter le schéma de circuit, particulièrement celui à tension variable;
- une difficulté à comprendre que c'est la lumière et non la tension qui cause l'émission d'électron;
- une lacune à comprendre significativement l'expérience de l'effet photoélectrique.

Nous avons parcouru rapidement les principales approches d'enseignement de l'effet photoélectrique, des plus traditionnelles aux plus novatrices. Nous retenons ainsi l'importance de :

- guider les étudiants pour focaliser la discussion et confronter leurs conceptions aux différents modèles proposés (Calvin, 2004).
- visualiser pour comprendre les phénomènes; en effet, les étudiants peuvent comprendre mieux l'effet photoélectrique lorsqu'ils le relient au monde mécanique auquel ils sont habitués et à leur expérience visuelle (Kovacevic et Djordjevich, 2006).
- proposer des activités d'enseignement où l'on montre que la physique quantique constitue un nouveau paradigme et éviter la référence à la physique classique (Fischler et Lichtfeldt, 1992).

Nous avons constaté que l'utilisation des technologies se manifeste de plus en plus en enseignement de l'effet photoélectrique. Les performances des étudiants ayant suivi les approches basées sur les technologies nous paraissent encourageantes. Nous croyons ainsi que les technologies peuvent apporter un renfort considérable à l'enseignement et l'apprentissage de l'effet photoélectrique pour :

- La collecte de données, l'affichage graphique en temps réel des résultats, pour la modélisation théorique et également pour l'illustration des caractéristiques qualitatives de la mécanique quantique (Hasson et Manners, 1995)
- L'utilisation des simulations comme méthodes d'enseignement de la physique (interaction, flexibilité, visualisation et représentations dynamiques des phénomènes).
- La stimulation de l'attention de l'étudiant par l'interaction, par l'environnement et par l'engagement intellectuel requis pour améliorer la compréhension de l'effet photoélectrique auprès des élèves (Steinberg et al, 1996).
- Les activités manuelles et les programmes de visualisation sur ordinateur qui soutiennent les étudiants à construire des modèles mentaux pour expliquer leur observation (Rebello et Zollman, 1999).
- L'aide aux étudiants à faire correctement leur prévision des résultats du changement des différents paramètres (McKagan et al, 2009).

Les performances prometteuses des étudiants ayant suivi les approches basées sur les technologies utilisant les simulations nous ont incité à faire une synthèse des apports et des limites du recours à la simulation dans l'apprentissage des sciences et à identifier les caractéristiques des simulations qui ont un potentiel contributif à l'apprentissage de l'effet photoélectrique. Dans le cadre de notre travail, nous retenons que l'utilisation de la simulation nous fournit des opportunités :

- de modifier des variables, par exemple : l'intensité du courant électrique, la tension, la fréquence de la lumière et l'intensité lumineuse, et de manipuler des modèles scientifiques.

- d'explorer et de construire des modèles scientifiques comme le modèle quantique de la lumière.
- de faire des représentations, tant graphiques que mentales, en enseignement de l'effet photoélectrique. Nous pouvons ainsi construire les courbes correspondant aux variations des paramètres en temps réel sur l'écran pour l'intensité du courant électrique en fonction de la tension, pour l'intensité du courant électrique en fonction de l'intensité lumineuse (ou la puissance lumineuse) et pour l'énergie cinétique des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse.
- d'élaborer un environnement où les élèves peuvent mobiliser leurs connaissances en physique.
- de visualiser de phénomènes scientifiques, par exemple la visualisation du mouvement des électrons entre les deux électrodes, caractéristique qui ne peut être visible lors de l'expérimentation réelle; il s'agit d'un aspect particulièrement utile pour aider les sujets à visualiser l'effet du changement de la tension, de la fréquence ou de l'intensité lumineuse. Cette représentation visuelle dynamique du phénomène aide les apprenants à surmonter les difficultés conceptuelles en électricité, comme celle de la mise en la relation entre la vitesse des électrons et le courant électrique, ou celle de la signification physique du potentiel d'arrêt.
- de faire des manipulations difficiles ou impossibles à réaliser dans un laboratoire conventionnel, par exemple, la réalisation de l'expérience des métaux différents (cuivre, sodium et zinc), ou lorsque le matériel est inaccessible à cause du coût élevé.
- d'observer une expérience réelle, d'interagir avec elle et de faire, visuellement, le lien entre les graphes et l'expérience, plus clairement qu'avec des images statiques.

Pour expliquer l'effet photoélectrique aux sujets dans une approche socioconstructiviste, nous avons choisi de leur faire effectuer une expérimentation virtuelle avec la simulation de l'effet photoélectrique PhET de l'Université du Colorado à Boulder (PhET, 2007), disponible sur Internet (voir figure 1). En effet, cette simulation est basée sur

un modèle simplifié de l'effet photoélectrique et peut aider les étudiants à mieux comprendre le phénomène du fait qu'elle présente plusieurs avantages cités dans le paragraphe précédent.

Dans ce travail, nous avons également défini l'apprentissage mobile comme un apprentissage à travers un contexte centré sur l'apprenant et utilisant une technologie fixe ou mobile. Nous avons repéré quelques avantages de l'utilisation de ces dispositifs. Citons l'accès à l'information ou aux connaissances quels que soient le lieu et le moment. La mobilité et la portabilité nous offrent des nouvelles opportunités pour planifier des activités beaucoup plus efficaces; en effet, elles permettent un apprentissage omniprésent, une interaction sociale en face à face. Les étudiants auront un moyen pour interagir directement, échanger des données et collaborer face à face. Nous avons ensuite identifié la problématique de l'usage des dispositifs mobiles en classe et en situation de collaboration. En effet, les dispositifs permettent une meilleure communication en face à face et une discussion plus efficace entre les étudiants. C'est dans ce contexte que nous souhaitons explorer l'apport de ces technologies pour l'apprentissage en physique. En effet, nous allons élaborer une activité basée sur une simulation pour créer un déséquilibre cognitif chez l'étudiant et ensuite, nous essayons d'explorer l'apport de technologies mobiles pour soutenir une discussion plus efficace dans le but d'aider les étudiants à mieux gérer ce déséquilibre. La résolution de ce conflit peut mener à une construction des nouvelles connaissances.

Enfin, nous avons opté pour le modèle de la théorie d'activité (AT) en se basant sur le cadre conceptuel de Zurita et Nussbaum (2007) du fait qu'il permet de concevoir des activités de l'apprentissage collaboratif supporté par des technologies mobiles (MCSCCL) et qu'il offre des éléments de base pour analyser les besoins, les tâches et les résultats.

En somme, ce chapitre a fourni les éléments de base pour la conception d'un scénario d'apprentissage relatif à un phénomène aussi complexe que celui de l'effet photoélectrique, tout en respectant de nombreux critères (collaboration, simulation, dispositifs mobiles...) qui nous paraissaient à priori extrêmement difficiles de réunir dans une situation d'apprentissage en classe. Nous nous servons des repères théoriques et des

éléments de réflexion que nous avons exposés dans ce chapitre pour reformuler plus clairement nos questions de recherche dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3. QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Introduction

Compte tenu de notre problématique générale qui porte sur l'évolution conceptuelle des étudiants sur l'effet photoélectrique, le chapitre précédent a permis de mettre en évidence les éléments de réflexion qui nous paraissent indispensables dans un projet d'amélioration de l'enseignement de l'effet photoélectrique et plus généralement de la physique moderne.

Nous exposons dans ce chapitre les questions de recherche auxquelles nous essaierons de répondre. La source de ces questions réside bien évidemment en grande partie dans les remarques, réflexions, ou manques de connaissances révélés par le chapitre précédent. Elles sont également construites sur quelques hypothèses de recherches que nous évoquons ici quand elles n'auront pas déjà été mentionnées.

2. Objectif de la recherche

Notre recherche vise à explorer le potentiel des technologies mobiles pour l'amélioration de l'apprentissage des sciences et à étudier, en particulier, l'apport d'une simulation de l'effet photoélectrique, en utilisant des dispositifs mobiles et en situation de collaboration pour une meilleure compréhension de la nature quantique de la lumière chez les étudiants au niveau collégial. Nous cherchons spécifiquement à étudier :

- l'impact sur l'apprentissage et le changement conceptuel d'une situation d'apprentissage basée sur la simulation, la collaboration et les technologies mobiles. Rappelons que, dans cette recherche, nous prenons comme point de départ, outre les difficultés liées au matériel et au problème du temps consacré, les difficultés rencontrées par les étudiants, les difficultés conceptuelles à comprendre l'effet photoélectrique et le modèle quantique de la lumière (Knight, 2004; McKagan et al., 2009; Steinberg et al., 2000);

- la nature et l'importance de la collaboration, notamment des interactions, entre les étudiants, dans la situation d'apprentissage créée;
- le rôle de la technologie (simulateur et ordinateur de poche) dans cette situation d'apprentissage. Par ailleurs, l'ubiquité des technologies mobiles nous présente une occasion et un défi pour découvrir une manière de construire et de déployer des environnements de support à l'apprentissage.

L'effet du simulateur dans le processus de changement conceptuel et le protocole d'apprentissage collaboratif ont déjà été évalués en classe, de façon plus traditionnelle, avec des ordinateurs PC; nous tentons d'explorer spécifiquement l'usage de l'ordinateur de poche avec connectivité WiFi, dans un tel contexte. Plus particulièrement, nous voulons préciser les comportements et les besoins des étudiants : Comment les étudiants se comportent-ils en face à face avec leur PDA ?

3. Questions de recherche

Lorsque nous avons abordé la problématique, nous avons formulé la question de recherche comme suit :

Peut-on tirer parti des technologies de simulation et des dispositifs mobiles pour développer des activités d'apprentissage collaboratif plus significatives en physique moderne, et plus particulièrement en enseignement de l'effet photoélectrique ?

Nous pouvons nous attendre à un poids accentué des situations familières et des faits bruts dans la description des objets et des événements par l'apprenant. Ces réflexions nous permettent de formuler un premier groupe de questions sur les situations propices à l'enseignement :

Existe-t-il des activités d'apprentissage en physique moderne qui favorisent le changement conceptuel de l'aspect ondulatoire de la lumière au profit de l'aspect quantique de la lumière faisant intervenir les conceptions des étudiants au sujet du phénomène photoélectrique et de concepts connexes ? Dans ce cas, qu'est-ce qui caractérise ces situations ?

Rappelons que cette recherche vise à mettre en évidence le rôle d'un simulateur de l'effet photoélectrique sur la compréhension du modèle quantique de la lumière, lors d'un apprentissage collaboratif dans un cours de physique de niveau cégep. Selon une approche constructiviste en didactique des sciences, il est important de partir des conceptions

antérieures des apprenants pour les amener à un changement conceptuel, permettant un meilleur ancrage des connaissances scientifiques acquises ou favorisant la construction de nouvelles connaissances (Duit, 1991). Nous formulons ainsi la première question issue de la question générale de recherche comme suit :

Quelles sont les conceptions présentes chez les étudiants du cégep sur la lumière et sur l'effet photoélectrique avant et après l'expérimentation ?

D'une part, les nouvelles technologies ont un grand potentiel en enseignement des sciences. Elles nous fournissent des occasions de créer des environnements d'apprentissage plus efficaces. La simulation permet plus particulièrement les manipulations difficiles ou impossibles à réaliser dans la classe. La simulation permet précisément de manipuler des modèles et de construire des représentations, tant graphiques que mentales. Elle constitue une aide à l'appropriation et à la compréhension des modèles qui la sous-tendent, à condition que les modèles soient clairement explicités avec un tel statut et que la nature de ce qui est représenté dans la simulation soit clairement explicitée (Robles, 1997).

La simulation constitue un lien privilégié entre le théorique et l'expérimental; en mettant par exemple en scène des représentants d'objets non observables réellement, elle peut favoriser l'activité de modélisation, mais aussi permettre la prévision (Beaufils et al., 1987). Nous sommes alors en mesure de formuler les questions de recherche suivantes :

Quel est l'apport didactique de la simulation pour décrire et interpréter des phénomènes « invisibles » ? L'utilisation d'une simulation de l'effet photoélectrique permet-elle de générer des conflits cognitifs chez les étudiants ? Permet-elle de créer une insatisfaction chez les étudiants ? A quel point la simulation permet-elle aux étudiants de construire des modèles mentaux plus scientifiques sur la nature de la lumière ? Dans le cas échéant, la simulation introduit-elle des conceptions erronées auprès des étudiants ?

D'autre part, dans un environnement d'apprentissage constructiviste supporté par une simulation, l'insatisfaction surgit lorsque l'étudiant se trouve confronté à des résultats en conflit avec ses propres prédictions. En demandant aux étudiants de faire et d'expliquer ces prévisions, on peut activer leurs connaissances antérieures et les forcer à élaborer des explications. La prédiction, la manipulation et la vérification font une place importante au « discours interne » dans l'esprit de l'étudiant (Perkins et Simmons, 1988); en stimulant la vérification de l'hypothèse par l'étudiant, la simulation sur ordinateur permet de mettre en

évidence un conflit conceptuel (Osborne et Squires, 1987) entre les hypothèses initiales et les observations (confrontation empirique), source d'insatisfaction intellectuelle. La résolution de ce conflit peut alors mener à une construction des nouvelles connaissances. Dillenbourg et Schneider (1995) décrivent trois éléments qui peuvent entraver le processus de collaboration : la composition des groupes, la conception des activités collaboratives et les médias utilisés. Ainsi, si les conditions sont bonnes, ces éléments doivent faciliter le processus de la collaboration, mais si elles sont mauvaises, ils l'entravent, semble-t-il.

Donc, comment pouvons-nous assurer une collaboration efficace parmi les apprenants ? Quels sont les parcours pris par les apprenants pour compléter les tâches collaboratives ? Quel genre d'interaction favorise l'apprentissage collaboratif ? Est-ce que l'activité basée sur la simulation favorise ou non une collaboration entre étudiants ?

Par ailleurs, l'ubiquité des technologies mobiles nous présente une occasion et un défi pour découvrir une manière de construire et déployer des environnements de support à l'apprentissage. Les dispositifs mobiles nous offrent la possibilité d'un environnement mobile naturel de collaboration avec des interactions face à face. Selon Zurita et Nussbaum (2004), les dispositifs mobiles permettent l'interactivité exigée pour réaliser les buts partagés, la possibilité des discussions au sujet des buts, le soutien de l'exécution des résultats pour l'individu et pour le groupe, la coordination des rôles des participants et des règles, la synchronisation et le partage des tâches. Des questions se posent :

En quoi les dispositifs mobiles facilitent-ils ou entravent-ils la collaboration entre apprenants ? Permettent-ils d'établir une communication (discussion, négociation) efficace entre étudiants durant l'activité ? Quel est l'effet de ces dispositifs sur l'engagement des étudiants à travailler ensemble ? Que se passe-t-il lorsqu'on met les étudiants en présence d'un tel environnement, quant à l'usage de la simulation, quant à la nature des échanges et interactions entre les étudiants et quant à l'utilisation des dispositifs mobiles ?

Enfin, nous essayons d'examiner l'influence des trois facteurs (mobilité, collaboration, simulation) sur l'évolution conceptuelle de la notion de la lumière chez les étudiants au Cegep.

La simulation de l'effet photoélectrique, l'utilisation des dispositifs mobiles et en situation de collaboration favorisent-elles une évolution des conceptions des étudiants au sujet de la lumière ?

CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons les aspects méthodologiques de la présente recherche sur les effets de l'utilisation d'une simulation dans des dispositifs mobiles et en situation de collaboration relativement à l'évolution des conceptions chez les étudiants en physique moderne. Nous expliquons comment les sujets ont été choisis, les principales caractéristiques de la simulation utilisée, le déroulement des entrevues et la collecte des données et finalement comment les données ont été analysées ?

2. Démarche d'ensemble et modes d'investigation

Dans le but de compléter et de valider le scénario d'apprentissage, la plateforme et l'interface du simulateur utilisés dans notre expérimentation, deux études préliminaires ont été menées : la première a été effectuée avec 17 étudiants dans le cadre du cours « DST1055 » donné au Département de Didactique à l'Université de Montréal et la seconde a été réalisée avec un groupe de huit étudiants à la Maison des technologies de formation et d'apprentissage Roland-Giguère (MATI Montréal), un centre de recherche tripartite de l'Université de Montréal, de HEC Montréal et de l'École polytechnique.

Puisque l'effet photoélectrique ne se traite qu'après les deux cours de physique au collégial (cours de Mécanique et cours d'Électricité et Magnétisme), 14 sujets ont alors été choisis parmi ceux qui avaient déjà complété ces deux premiers cours ou l'équivalent au collégial.

Afin de comparer les résultats de notre expérience avec ceux d'un groupe témoin recevant un enseignement traditionnel en classe sur l'effet photoélectrique, nous avons choisis une trentaine d'étudiants du cégep poursuivant leurs études dans le cadre du programme « science de la nature » et considérés comme membres du groupe contrôle. Les participants sélectionnés ont suivi le cours traitant l'effet photoélectrique d'une manière

traditionnelle, c'est-à-dire un cours magistral suivi d'exercices d'application. Les résultats des sujets au prétest et au post-test sont alors comparés avec ceux du groupe expérimental.

Enfin, tous les sujets provenant du groupe expérimental ont passé une entrevue afin d'éclaircir certaines informations recueillies avec le questionnaire. Nous avons appuyé les entrevues par l'enregistrement vidéo de toutes les activités individuelles et collaboratives et des traces des mises en commun. Nous avons également récupéré les traces des sujets sur papier : prévisions, résultats de simulations, essais de rédaction du rapport final. Toutes les actions de chaque sujet ont été enregistrées lors de la manipulation de la simulation dans le but de suivre le cheminement d'apprentissage du sujet.

Il importe de noter que les sujets qui ont participé à l'étude ont tous rempli et ont signé un consentement écrit (Annexe X). Par ailleurs, les renseignements fournis sont gardés confidentiels, c'est pourquoi nous avons attribué à chaque participant un numéro associé à une liste des sujets, connu uniquement du chercheur principal. Les renseignements associés à chaque sujet seront détruits selon les règlements sur l'éthique de la Faculté des sciences de l'éducation, soit sept ans après la fin du projet.

Nous présentons dans ce qui suit la méthode conduite pour concevoir l'activité utilisée dans notre expérimentation et pour élaborer un scénario d'apprentissage collaboratif en utilisant les dispositifs mobiles. Nous exposons plus loin les outils de diagnostic et le modèle d'entrevue individuelle choisis pour ce projet de recherche ainsi que les méthodes de recueil et de traitement des données.

3. Laboratoire élaboré pour le projet de recherche (MobileSIM)

Dans un cadre socioconstructiviste, notre recherche vise donc à explorer le potentiel des technologies mobiles pour améliorer l'apprentissage des sciences et mettre en évidence le rôle d'un simulateur de l'effet photoélectrique sur la compréhension du modèle quantique de la lumière, lors d'un apprentissage collaboratif dans un cours de physique de niveau cégep. Nous décrivons tout d'abord la simulation utilisée, puis nous présentons les étapes de conception des activités MCSCL selon Zurita et Nussbaum (2007) et enfin, la

démarche suivie pour élaborer un scénario d'apprentissage et pour valider la plateforme et le simulateur employé.

3. 1. Description de la simulation

Pour expliquer l'effet photoélectrique aux sujets dans une approche socioconstructiviste, nous avons choisi de leur faire effectuer une expérimentation virtuelle avec la simulation de l'effet photoélectrique PhET de l'Université du Colorado à Boulder (PhET, 2007), disponible sur Internet (voir figure 1).

Cette simulation, basée sur un modèle simplifié de l'effet photoélectrique et sur les travaux de Lenard (1902) pour étudier l'effet photoélectrique, représente un montage formé d'un tube en quartz, vidé d'air afin d'éviter le choc des électrons émis sur des molécules. Un tel appareillage s'est révélé très efficace pour l'analyse de l'effet photoélectrique. Ce tube contient deux électrodes : une plaque de métal sensible à la lumière, appelée photocathode et une électrode métallique, appelée anode, destinée à collecter les électrons émis. La plaque est éclairée par une lumière monochromatique émise par une source lumineuse dont la puissance, ou l'intensité lumineuse, et la longueur d'onde sont réglables à l'aide des curseurs. Une batterie permet d'appliquer entre la photocathode et l'anode une tension réglable V . Le courant d'intensité I , détecté par l'ampèremètre, ne peut provenir que d'une circulation d'électrons émis par la plaque (effet photoélectrique) et attirés par l'anode. Les courbes correspondant aux variations des paramètres se construisent en temps réel sur l'écran : 1) pour l'intensité du courant électrique en fonction de la tension et en fonction de l'intensité lumineuse ou de la puissance lumineuse, et, 2) pour l'énergie cinétique des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse. Le simulateur nous offre la possibilité de faire l'expérience avec des métaux différents (cuivre, sodium et zinc) et de visualiser le mouvement des électrons entre les deux électrodes, caractéristique qui ne peut être visible lors de l'expérimentation réelle; il s'agit d'un aspect particulièrement utile pour aider les sujets à visualiser l'effet du changement de la tension, de la fréquence ou de l'intensité lumineuse. Cette représentation visuelle dynamique du phénomène aide les sujets à surmonter les difficultés conceptuelles en électricité, par exemple celle de la mise

en la relation entre la vitesse d'électrons et le courant électrique, ou celle de la signification physique du potentiel d'arrêt. La simulation du phénomène de l'effet photoélectrique fournit aux sujets l'opportunité d'observer une expérience réelle et d'interagir avec elle, et de construire, en temps réel, les graphes correspondants à la variation des paramètres de l'expérience. Cela leur permet de comprendre, visuellement, la relation entre les graphes et l'expérience, plus clairement que lorsqu'ils utilisent des images statiques. En effet, des chercheurs (Knight, 2004; Steinberg et al., 2000) ont montré que les sujets ont des difficultés à comprendre le diagramme du circuit utilisé dans le manuel scolaire pour représenter l'effet photoélectrique. L'expérimentation virtuelle, avec le simulateur comme matériel didactique, nous paraît un moyen efficace de faire comprendre l'effet photoélectrique à des sujets, car nous ne pouvons pas vraiment réaliser une expérimentation conventionnelle en laboratoire dans ce cas.

Cette simulation PhET a été adaptée, avec la collaboration de l'équipe du laboratoire LARIM à l'École Polytechnique, sur un dispositif mobile (PDA) et en utilisant la plateforme MobileSIM que nous allons décrire plus loin dans ce chapitre.

3.2. Conception d'une activité MCSCL (Mobile Computer Supported Collaborative Learning)

Pour concevoir et mettre en œuvre des activités d'apprentissage collaboratif soutenu par des dispositifs mobiles MCSCL, nous proposons de suivre la méthodologie élaborée par Zurita et Nussbaum (Figure 6). Cette méthodologie a été adaptée et étendue à partir du diagramme des structures d'activité d'apprentissage collaboratif décrit dans Johnson et Johnson (1999).

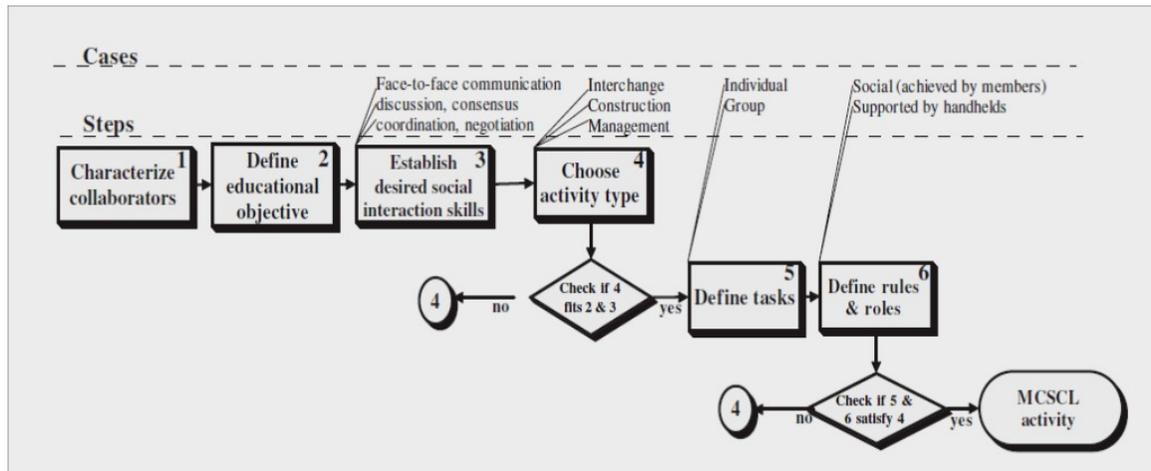


Figure 6. Étapes de la conception d'une activité MCSCL (Zurita et Nussbaum, 2007)

Dans ce qui suit, nous expliquons les six étapes de la méthodologie :

- 1) **Identifier les sujets.** Les participants, comme il est mentionné ci-haut, ont été choisis parmi les sujets qui ont déjà complété les deux cours de physique du collégial (cours de Mécanique et cours d'Électricité et Magnétisme).
- 2) **Définir l'objectif d'apprentissage.** L'objectif global de l'activité d'apprentissage est d'explorer le modèle quantique de la lumière.
- 3) **Mettre en place les compétences souhaitées d'interaction sociale.** L'un des objectifs de l'apprentissage collaboratif est de stimuler l'interaction sociale entre les membres. Ceci peut être réalisé grâce à des activités qui exigent des compétences sociales (Dillenbourg, 1999) telles que la communication en face à face, la discussion, le consensus, la coordination et la négociation. Les composantes d'interaction sociale et d'engagement montrées dans la figure 5 conceptualisent ces compétences. L'objectif d'ordre social est d'achever une communication face-à-face, des interactions, une coordination et une négociation entre les membres du groupe.
- 4) **Choisir le type d'activité de collaboration.** L'interaction sociale est favorisée par les activités d'échange, de construction et de gestion. Le type du composant, sous le volet des composantes d'activités collaboratives à la figure 5, précise les activités qu'on peut choisir :

- **Échange.** Les membres doivent échanger des objets, des informations ou des données à travers un ensemble donné de règles pour atteindre leurs objectifs. Pour mener à bien l'activité d'échange, le sujet doit non seulement atteindre son propre objectif, mais il doit également veiller à ce que tous les autres membres du groupe atteignent le leur.
- **Management.** L'activité exige que chaque membre choisisse le même sujet. Un espace de négociation pour un accord de construction doit être élaboré entre les membres. Une activité typique serait celle dans laquelle tous les membres du groupe répondent à une série de questions et doivent obligatoirement aboutir à un accord avant de passer à la question suivante (Cortez et al, 2004).
- **Construction.** Les membres construisent un modèle explicatif d'un phénomène physique, entre autres, en suivant des règles de construction définies. Ces règles permettent aux sujets de combiner les différentes connaissances pour former un modèle, composer un nouveau modèle à partir d'autres modèles, reconstruire un modèle à partir des éléments prédéfinis et ordonner des idées ou des modèles selon des critères logiques. L'exercice crée une interaction sociale, puisque chaque membre du groupe doit élaborer un modèle explicatif et le discuter avec les autres membres pour accomplir sa tâche. Ce n'est que lorsque tous les membres se sont mis d'accord sur le résultat final que leur tâche est considérée comme complète (Zurita et Nussbaum, 2004). Dans la vision socioconstructiviste que nous avons adoptée dans le cadre conceptuel, nous avons choisi une activité d'apprentissage collaboratif de construction. Chaque membre commence par identifier les variables qu'il juge pertinentes et par équipe, les sujets sont invités à faire leurs prédictions des résultats attendus; ensuite chaque sujet fait individuellement ses propres expériences sur son PDA. D'autres étapes de comparaison, de discussion des résultats, de proposition d'une explication et d'un modèle et de mise en commun finale suivront dans le but d'élaborer une explication et un modèle complet. Nous détaillerons plus loin le protocole expérimental de l'activité choisie.

5) Définir les tâches d'une activité. Les groupes de collaboration impliquent des responsabilités partagées. Les membres de l'équipe doivent exécuter des tâches (missions) variées, soit individuellement, soit en équipe (volet tâches de la figure 5).

- **Les tâches individuelles.** Chaque membre doit atteindre un objectif particulier en conjonction avec l'objectif du groupe et en accord avec les autres membres du groupe. Les tâches peuvent être soit identiques ou différentes pour chacun des membres. Si les tâches sont différentes, elles doivent avoir des degrés de complexité et d'importance équivalents. Chaque membre doit être conscient de sa tâche individuelle avant de commencer l'activité de collaboration. Dans notre cas, chaque sujet doit individuellement vérifier l'influence des différents paramètres (l'intensité lumineuse, la fréquence de la lumière et la tension électrique) sur le courant photoélectrique en effectuant ses propres expériences sur son ordinateur de poche.
- **Les tâches en équipe.** Dans les activités de collaboration, les tâches de l'équipe sont les fonctions qui doivent être effectuées de manière synchronisée et coordonnée par les membres de l'équipe et comprennent les tâches d'échange, de construction et de gestion. Ces tâches encouragent la discussion entre les membres et créent des espaces de communication et de négociation. Dans cette expérimentation, les sujets sont contraints à collaborer pour faire des prévisions et discuter les résultats obtenus dans le but de construire un modèle explicatif de l'effet photoélectrique.

6) Définir les rôles et les règles. Les rôles et les règles précisent les conventions et les règlements qui aident à créer des interactions sociales productives (voir figure 5).

- **La composante sociale du rôle et des règles.** Zurita et Nussbaum (2007) identifient trois types de relations qui peuvent surgir entre les membres lors d'une interaction sociale : le soutien d'un membre par un autre (R1), le conflit cognitif issu des divergences des points de vue entre deux membres (R2) et l'interdépendance sociale, dans laquelle les membres partagent l'objectif du groupe et chaque contribution individuelle affecte les actions de l'autre membre (R3). Selon les mêmes auteurs, les rôles et les règles doivent passer d'une relation (R1) à une relation (R2) ou (R3); dans

le cas de (R2), la relation doit converger vers une (R3). Les rôles des membres et les règles permettent la création des unités de conversation comme indiqué dans le cadre de la figure 5 (proposition, contre-proposition, commentaire, clarification et accord). Ces unités de conversation permettent une description graphique des relations (R1) ou (R2) par rapport à la relation (R3).

- **Rôles et règles pris en charge par la technologie.** Les relations (R1) et (R2) peuvent être identifiées et transformées en une relation (R3) à travers la technologie. La technologie offre un espace pour concilier et négocier les conflits potentiels et elle est particulièrement utile lorsque les membres ont des opinions assez robustes. Il convient de promouvoir les éléments suivants de collaboration : 1) l'interaction : les interactions entre les membres dans l'activité de collaboration telles qu'elles ont été mesurées par l'influence de l'interaction sur leur processus cognitif plutôt que par la fréquence; 2) la synchronisation et la coordination : la technologie permet de synchroniser la communication face à face entre les membres et de favoriser la coordination au sein du groupe; 3) la négociation : prendre une décision fait partie de tout processus.

La technologie fournit un espace de négociation pour soutenir le travail de collaboration. Les rôles d'activité suivants sont soutenus par la technologie : 1) le travail en groupe pour maximiser l'interdépendance positive et pour organiser et répartir les tâches au sein du groupe, 2) un espace de négociation, d'interactions et d'échange d'informations.

Nous nous sommes inspirées des grandes lignes issues du modèle de Zurita et Nussbaum (2007) pour concevoir notre activité expérimentale. Pour l'élaboration d'un protocole expérimental adapté spécifiquement à notre recherche, nous avons procédé à deux études exploratoires que nous décrivons dans la section suivante.

3.3. Élaboration d'un scénario d'apprentissage

Dans le but d'élaborer et de valider un scénario d'apprentissage collaboratif en utilisant les dispositifs mobiles, nous avons effectué deux études exploratoires comme

étapes préliminaires d'expérimentation : une première étape en utilisant les ordinateurs PC puis une deuxième en utilisant les ordinateurs de poche.

3.3.1. Étape 1 : Étude exploratoire avec simulation sur ordinateur PC

Cette première étape fait partie du processus d'analyse et de conception qui devrait mener à l'élaboration et à la validation du scénario d'apprentissage préalablement élaboré selon les théories constructivistes de l'apprentissage, à savoir simulation pour susciter le conflit cognitif et favoriser le changement conceptuel. Nous avons conservé les cinq premières étapes tel qu'il est indiqué dans le paragraphe 3.2 (figure 6); la technologie (simulation sur un ordinateur PC) est utilisée comme espace de négociation, d'interaction et d'échange d'informations pour soutenir le travail de collaboration. L'activité a été réalisée avec 17 étudiants dans le cadre du cours « DST 1055 » donné à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal, chaque étudiant disposant d'un ordinateur PC. Chaque sujet passe d'abord un prétest pour évaluer ses connaissances. Puis, après des rappels théoriques sur le modèle ondulatoire de la lumière et une description du dispositif expérimental proposé, les sujets sont invités à faire des prévisions sur les résultats attendus. L'expérimentation virtuelle, effectuée avec le simulateur de l'effet photoélectrique PhET de l'Université du Colorado à Boulder (PhET, 2007), concerne trois métaux : le cuivre, le zinc et le sodium. Dans l'étape suivante, les sujets font varier individuellement trois paramètres par métal, la tension, le courant, la fréquence, pour obtenir les courbes correspondantes. Les résultats obtenus doivent normalement les mettre en situation de conflit cognitif, en lien avec leurs prévisions; on leur demande alors d'élaborer un modèle explicatif. À la fin de la séance, les sujets passent un post-test pour évaluer leurs apprentissages. Le recueil de données s'est effectué par observation et prise de notes par le professeur-chercheur, ainsi que par questionnaires remplis par les sujets.

Cette étape visait l'analyse de l'activité des sujets afin d'évaluer et d'améliorer le scénario d'apprentissage dans son ensemble ainsi que ses différents éléments. C'est la version du simulateur de l'effet photoélectrique PhET accessible via le Web qui a été utilisée. Une attention particulière a ainsi été accordée aux documents mis à disposition des

participants : rappels théoriques, description du dispositif et protocole expérimental, questions du prétest et du post-test. Nous nous sommes aussi intéressé à la durée consacrée par chaque sujet à chacune des activités, aux difficultés rencontrées, aux échanges, etc.

Cette étude nous a montré que la séance de trois heures, qui avait été prévue, était trop courte et qu'il y avait un manque de motivation et d'engagement des sujets dans le processus d'apprentissage. Nous avons notamment pu observer que, durant la séance, certains sujets discutent entre eux de divers sujets sans rapport avec le cours. Nous avons également remarqué que l'utilisation d'ordinateurs personnels (PC) présente une contrainte dans le cas où l'environnement CSCL tente de soutenir des activités face à face, avec contact visuel et langage gestuel, lors des interactions entre sujets. Chaque sujet dispose de son propre ordinateur et la collaboration peut alors être importunée par l'espace physique occupé par les ordinateurs personnels (PC). Ces derniers deviennent le focus du sujet et limitent considérablement les communications et les interactions entre sujets; les échanges verbaux sont moins naturels et la désignation à l'écran peu aisée. Nous pouvons ainsi constater que, d'une certaine façon, la technologie constitue une entrave aux interactions sociales, au face-à-face notamment, dans la construction des connaissances et donc à une collaboration optimale. Cette limite a été également soulignée par plusieurs chercheurs (Curtis et Lawson, 1999; Kreijns et al., 2002; Scott et al., 2000).

Suite à cette première étude exploratoire et en prévision de l'étape suivante, nous avons été amenés à effectuer une amélioration du scénario d'apprentissage, notamment pour les deux dernières étapes parmi les six étapes indiquées en paragraphe 3.2 (figure 6). Dans l'étape cinq, nous attribuons plus de temps aux activités, en allégeant l'étape de rappels théoriques et en reformulant certaines questions du prétest et du post-test. Dans l'étape six, nous envisageons de remplacer les ordinateurs personnels (PC) par les ordinateurs de poche (PDA), dans le but d'optimiser la collaboration et les interactions entre les sujets.

3.3.2. Étape 2 : Étude exploratoire avec simulation sur PDA (figure 7)

La deuxième étude exploratoire a été effectuée dans le cadre d'une classe expérimentale de huit sujets; l'activité avait été planifiée pour neuf sujets, mais l'un des sujets est tombé malade, situation fréquente dans le contexte d'une classe. Cette étape fait partie du processus global de conception. Elle consiste, en quelque sorte, en une « preuve de concept » et est la première étape de validation de notre hypothèse quant au rôle des technologies mobiles dans l'apprentissage des sciences. Par ailleurs, cette étape a un rôle important pour l'élaboration des spécifications de la plateforme et de l'interface du simulateur.

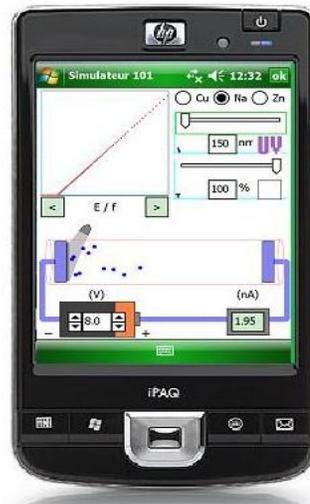


Figure 7. Simulateur sur IPAQ 210

Le scénario d'apprentissage suivi dans cette deuxième étude diffère de celui de la première étude essentiellement sur deux points : 1) une partie des activités s'effectuent en collaboration : prévisions et explications des résultats pour un métal donné dans une première étape, puis échange des résultats pour les différents métaux dans une deuxième étape; 2) la simulation est manipulée individuellement par chaque sujet sur un ordinateur de poche et le travail de synthèse en équipe est effectué sur un ordinateur portable.

Après avoir passé d'un prétest, le scénario d'apprentissage comprend plusieurs étapes :

- rappels théoriques, description du dispositif (simulateur) et du protocole expérimental par le professeur;
- formation de trois équipes : deux équipes de trois sujets et une équipe de deux sujets, chaque équipe se voit attribuer un métal (cuivre, sodium et zinc);
- dans chaque équipe, les sujets identifient les variables qu'ils jugent pertinentes et font leurs prédictions des résultats attendus;
- chaque sujet se voit remettre un ordinateur de poche (Ipaq avec Windows Mobile 6) sur lequel une version locale, développée spécialement dans le cadre de cette recherche, du simulateur de l'effet photoélectrique PhET a été préalablement téléchargée;
- chaque sujet fait individuellement ses propres expériences sur son PDA;
- dans chaque équipe suit une étape de comparaison, de discussion des résultats et de proposition d'une explication et d'un modèle; les résultats individuels sont transférés des PDA sur un ordinateur portable mis à disposition de l'équipe pour la rédaction d'une première synthèse par métal;
- la mobilité des sujets est alors exploitée pour la mise en commun finale qui consiste à la formation de trois nouvelles équipes, chacune composée d'un sujet ayant fait son expérimentation avec un métal différent pour l'élaboration d'une explication et d'un modèle complet; dans le cas de l'équipe ayant seulement 2 sujets à l'étude, le professeur fournit les résultats du métal manquant;
- passation du post-test.

L'analyse de l'activité montre que les sujets se sont montrés motivés et impliqués dans le processus d'apprentissage, témoignant d'un réel engagement cognitif. Tous sont restés au-delà des quatre heures prévues afin d'achever leur travail et ont activement participé tant aux activités individuelles (simulateur, questionnaires) que collectives (prévisions, mises en commun, explications). Dans le questionnaire final, même si certains

ont émis quelques réserves, notamment sur la qualité de l'interface, les sujets ont exprimé leur intérêt pour ce mode d'apprentissage et les avantages de la simulation sur PDA.

Les résultats de cette étude exploratoire nous ont permis de mettre en évidence, qu'intégrées à un scénario d'apprentissage complet, les technologies mobiles pourraient contribuer à la compréhension de l'effet photoélectrique grâce à l'effet combiné de plusieurs éléments (Droui et al, 2010) :

- une mise en situation de conflit cognitif et d'expérimentation concrète avec identification préalable de variables et de prédictions, puis vérification d'hypothèses et élaboration d'explications;
- une visualisation du phénomène sur le simulateur, permettant aux sujets de faire des liens entre la variation des paramètres et ses effets, avec construction des courbes correspondantes;
- un engagement cognitif individuel par l'interaction, à son propre rythme, avec le simulateur;
- un engagement dans l'activité de collaboration/coopération qui se déroule naturellement et sans l'entrave des technologies;
- des communications naturelles entre les sujets et avec le professeur (verbales, visuelles et gestuelles) et des déplacements dans la classe, facilitant la coordination du groupe;
- un recours aux ressources disponibles (documents, simulation, etc.) au moment où le sujet en a besoin pour construire ses nouvelles connaissances.

Chaque sujet ayant son propre ordinateur de poche, il a pu l'utiliser à son rythme, comme une calculatrice scientifique, et est resté actif pendant toute la durée de l'activité. De plus, nous avons pu noter que l'aspect ludique et la nouveauté de la technologie mobile semblent avoir un effet positif sur la motivation, l'intérêt et l'engagement des étudiants. Cette étude exploratoire nous a permis également de :

- décrire les comportements, ou les catégories de comportements, les difficultés et les besoins des étudiants avec le PDA (écran, clavier, navigation, fonctions, fiabilité technique);
- spécifier les améliorations à apporter, tant à l'interface, notamment la version portable du simulateur et les fonctions de communication, et à la plateforme qu'au protocole d'apprentissage collaboratif avec le PDA.

3.3.3. Plateforme MobileSIM

Suite à cette seconde étude exploratoire et en collaboration avec l'équipe du LARIM à l'École Polytechnique, l'interface et le fonctionnement du simulateur ont été améliorés; une plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM est développée pour l'utilisation à la fois par les sujets et par le professeur (figure 8). Elle est accessible par Internet et aussi en mode local par Wifi qui repose sur une architecture complète. Elle permet au professeur, qui dispose d'un code et d'un mot de passe : de saisir les listes de ses sujets; de créer des groupes, des laboratoires virtuels et des activités; d'attribuer des activités à des groupes des sujets en particulier, dans notre cas, celles reliées à chacun des trois métaux : cuivre, sodium et zinc; de faire le suivi en temps réel de qui fait quoi dans la classe; d'avoir accès à l'enregistrement de toutes les actions de chacun des étudiants lors de la simulation. Cette dernière fonction de la plateforme ouvre des perspectives très intéressantes, autant pour la recherche qui consiste à mieux comprendre le processus individuel de l'apprentissage, que pour l'évaluation personnalisée de chaque étudiant. L'étudiant, de son côté, se connecte lui aussi à la plateforme MobileSIM avec un code d'accès personnel qui lui a été attribué par le professeur. Cet accès personnalisé à la plateforme, installée sur l'ordinateur portable du professeur pour une connexion en Wifi dans la classe, est possible à la fois à partir de son PDA et de l'ordinateur portable qui est utilisé pour les rapports après mises en commun; il peut aussi être rendu possible par Internet, en tout temps, en dehors de la classe. Avec une telle plateforme, qui ouvre à la didactique des sciences un important champ d'investigation pour la recherche et l'innovation pédagogique, divers scénarios d'apprentissage vont pouvoir être élaborés par

le professeur, dont ceux basés sur d'autres simulations et intégrant des activités en classe et hors de la classe.

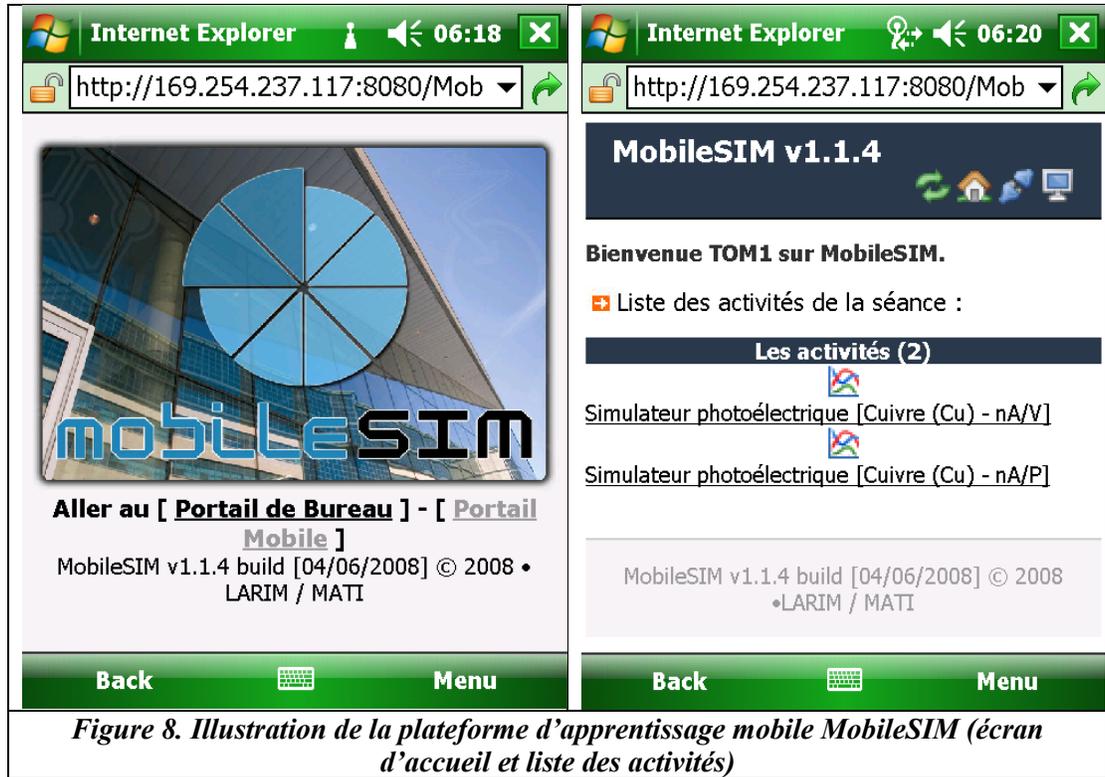


Figure 8. Illustration de la plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM (écran d'accueil et liste des activités)

3.3.4. Étape 3 : Expérimentation

Les résultats de l'étude précédente, tout en méritant d'être confirmés, nous laissent conserver le même scénario d'apprentissage utilisé avec une petite modification de la durée de l'expérimentation et présager des développements intéressants à propos de l'interface et de la plateforme.

Suite à cette deuxième étape, nous avons retenu le scénario d'apprentissage suivant que nous souhaitons exploiter dans notre recherche :

- Passation d'un prétest. Chaque sujet doit répondre individuellement à un questionnaire de 10 questions à choix multiples.
- Rappels théoriques. L'enseignant présente un rappel théorique sur les fondements de la physique classique qui considère la lumière comme une onde

électromagnétique. Ensuite, il présente deux petites vidéos sur l'expérience d'Hertz (sur YouTube¹²) et invite les sujets à commenter et à expliquer ce qu'ils observent.

- Formation des équipes. L'enseignant demande aux sujets de former trois équipes de trois sujets, une par métal; une équipe du Cuivre, une équipe du Zinc et une équipe de l'Aluminium.
- Prédications. Chaque équipe est invitée à faire des prévisions des résultats si on change un des facteurs influençant l'effet photoélectrique.
- Manipulations avec simulation. Chaque sujet doit faire individuellement des manipulations, en utilisant la simulation sur l'ordinateur de poche pour vérifier ses prévisions.
- Comparaison des résultats aux prédictions. Chaque sujet expose ses résultats aux autres membres de son équipe. À travers une discussion, les membres de l'équipe essaient de trouver une explication préliminaire.
- Formation de nouvelles équipes. Les sujets sont ensuite invités à changer l'équipe en formant trois nouvelles équipes; la nouvelle équipe doit être constituée de trois apprenants qui ont travaillé chacun sur des métaux différents. L'objectif est d'explorer l'effet de changement du métal sur les résultats.
- Discussion. Chaque équipe doit élaborer un modèle explicatif de l'effet photoélectrique à travers des discussions et des négociations.
- Passation d'un post-test. Chaque sujet doit répondre individuellement à un questionnaire de 10 questions à choix multiples.

4. Collecte d'information

Dans cette recherche, nous utilisons une combinaison des méthodes qualitatives et quantitatives. Les données sont recueillies à partir des résultats du prétest et du post-test sur

¹ <http://youtu.be/pHy8ebXyE5w>, consulté le 30 Août 2012

² <http://youtu.be/bfHWVeboCYg>, consulté le 30 Août 2012

les différents concepts clés pour la compréhension de l'effet photoélectrique. Nous comparons ainsi les résultats avec les résultats d'un groupe témoin qui a traité l'effet photoélectrique d'une manière traditionnelle. Les données qualitatives sont recueillies à partir des enregistrements des séquences vidéo, des traces des manipulations des sujets sur le programme, des productions finales et des entrevues semi-structurées.

4.1. Prétest et post-test

L'objectif principal de l'étude est de s'intéresser au développement des connaissances contre-intuitives sur la nature de la lumière. Nous optons pour le prétest et post-test pour connaître la force initiale des deux groupes et comparer leurs degrés de compréhension pour chaque type de questions suite au laboratoire, et par conséquent, pour déterminer s'il y a évolution ou non des conceptions des sujets. Lors du passage du prétest et du post-test, les sujets répondent individuellement à un questionnaire (Annexe II) composé de 10 questions à choix multiples sur la nature de la lumière, sur l'effet photoélectrique et sur les concepts connexes et nécessaires à la compréhension de ce phénomène. Cet instrument est utilisé comme outil de diagnostic et nous a permis de collecter les données, de tester le niveau de compréhension du phénomène de l'effet photoélectrique et des notions connexes, et de déterminer si les sujets ont changé leurs conceptions au sujet de la lumière. Rappelons qu'à la fin du chapitre 3, nous avons posé la question suivante :

La simulation de l'effet photoélectrique et l'utilisation des dispositifs mobiles et en situation de collaboration favorisent-elles une évolution des conceptions des sujets au sujet de la lumière ?

Pour donner un aperçu du questionnaire, nous avons choisi de décrire deux questions parmi les dix autres proposées. La question 5 (figure 9) porte sur la nature de la lumière et la question 6 (figure 10) sur le concept du photon.

La question sur la nature de la lumière est très vague et les réponses à cette question ne sont pas indépendantes de la situation proposée et des phénomènes utilisés comme support pour expliquer ou décrire le comportement de la lumière. L'idée qu'on se fait de la nature de la lumière conditionne en partie ce qu'on pense de l'interaction de la lumière avec

la matière. On questionne ici ce qui constitue finalement les attributs de la lumière en fonction de la situation proposée. Quel modèle de la lumière est privilégié, la lumière a-t-elle dans certains cas des attributs matériels, est-elle vue comme une onde électromagnétique, ou encore comme un ensemble de photons, ou comme faisceaux de rayons, est-elle assimilée au milieu, etc. Les principaux modèles scientifiques de la nature de la lumière ont été présentés dans le chapitre 2 (3.1.1). La figure 9 présente l'énoncé de la question 5 et le modèle scientifique associé à chaque proposition :

Question 5	Modèle associé
Choisissez la réponse que vous jugez la plus proche de votre conception La lumière est définie comme :	
a) Une pression transmise dans un milieu parfaitement élastique.	Mécanique (Descartes)
b) Une onde électromagnétique longitudinale dont la propagation est rectiligne.	Ondulatoire I (Huygens)
c) Des fines particules porteuses d'une quantité élémentaire d'énergie qui dépend de l'amplitude.	Corpusculaire (Newton)
d) Une onde électromagnétique transversale dont la propagation est rectiligne.	Ondulatoire II (Maxwell)
e) Un ensemble de particules porteuses d'une quantité élémentaire d'énergie qui dépend de la fréquence.	Quantique (Einstein)
f) Aucune de ces réponses.	
g) Je ne sais pas.	

Figure 9. Énoncé de la question 5 (concept de la lumière)

La compréhension de la nature quantique de la lumière dépend strictement du concept principal photon. C'est pour cette raison que nous proposons la question 6 (figure 10) aux participants.

Nous avons conservé les mêmes questions pour les deux tests; seul l'ordre des questions qui a été modifié. Tous les sujets des deux groupes, expérimental et contrôle, sont soumis au prétest avant l'expérimentation et au post-test après l'expérimentation, chaque test ayant une durée de 30 minutes. Les sujets ne sont pas informés d'avance qu'ils répondront une seconde fois au même test. Les résultats des sujets au prétest et au post-test sont alors comparés avec ceux d'un groupe témoin recevant un enseignement traditionnel en classe sur l'effet photoélectrique.

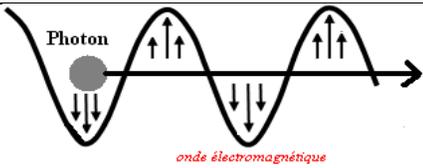
Question 6	
Choisissez la réponse que vous jugez la plus proche de votre conception Qu'est-ce que vous visualisez quand vous pensez à un photon voyageant dans l'espace ?	
a) Une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se propage en ligne droite.	 A grey circle labeled 'Photon' is on the left. A black arrow points to the right, labeled 'direction de propagation' in red.
b) Une particule de lumière avec une énergie spécifique voyageant le long d'une trajectoire sinusoïdale.	 A grey circle labeled 'Photon' is on the left. A black wavy line starts from the circle and moves to the right, labeled 'Trajectoire du photon' in red.
c) Une faible parcelle (paquet) des ondes électromagnétiques avec une certaine quantité d'énergie voyageant le long d'une ligne droite.	 A black wavy line moves to the right. Small black arrows point up and down from the peaks and troughs of the wave, labeled 'Paquet d'onde' in red.
d) Une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se déplace à côté une onde électromagnétique.	 A grey circle labeled 'Photon' is on the left. A black wavy line moves to the right. Small black arrows point up and down from the peaks and troughs of the wave, labeled 'onde électromagnétique' in red.
e) Aucune de ces réponses.	
f) Je ne sais pas.	

Figure 10. Énoncé de la question 6 sur le concept du photon

Nous croyons que la technique du questionnaire (prétest et post-test) ne doit pas, si possible, être la seule utilisée pour recueillir l'information. Dans cette optique, il convient d'exploiter la variété des techniques, aussi bien pour amasser les données et établir les grilles d'analyse que pour analyser effectivement les résultats. Dans la section suivante, nous essayons d'expliquer une autre technique que nous avons utilisée comme support à nos résultats, il s'agit de la technique d'entrevue.

4.2. Entrevues semi-structurées

Pour évoquer les différentes conceptions et afin d'obtenir plus d'information au niveau de la compréhension, tous les sujets du groupe expérimental se sont rencontrés. Nous prenons comme référence, lors du déroulement des entrevues et d'une manière complémentaire, la méthodologie de Vosniadou et celle de Vermersch (entretien d'explicitation).

Stella Vosniadou opte pour le questionnaire par question ouverte, qui convient mieux pour capturer les modèles mentaux des sujets. Les questions se présentent donc sous la forme suivante : Quelle est la nature de la lumière ? La lumière est-elle une onde électromagnétique ? Si la valeur de la longueur d'onde augmente, qu'observe-t-on ? La méthodologie de Vosniadou consiste donc à poser plusieurs questions à propos d'un concept en particulier, dans le but d'identifier les modèles mentaux que le sujet construit à partir du cadre théorique qu'il possède. Les réponses sont sous forme verbale ou sous forme de dessin. Elle insiste sur les questions génératives pour provoquer des verbalisations (les verbalisations découlent alors d'une question); le sujet est invité à « penser à haute voix », c'est-à-dire à verbaliser les raisonnements qui orientent ses essais et qui exigent du sujet de construire des modèles explicatifs élaborés à partir du cadre théorique qu'il possède.

Si l'approche du questionnement de Vosniadou questionne le sujet sans cesse sur le pourquoi de ses affirmations dans le but d'explicitier les modèles mentaux construits à partir des contraintes imposées par le cadre théorique, Vermersch (1994, p. 86), de son côté, insiste sur l'importance de ne pas forcer le sujet à expliquer pourquoi il pose telle ou telle action : « *Au lieu de faire porter au sujet la charge de l'explication, je vais lui demander de me décrire ce qu'il a fait. Non pas "pourquoi il a fait telle chose ?"* » À cette fin, Vermersch (1994) propose d'utiliser l'entretien d'explicitation, un ensemble de pratiques d'écoute basé sur des grilles de repérage de ce qui est dit et de techniques de formulation de relance (questions, reformulations, silences) qui visent à aider, à accompagner la mise en mots d'un domaine particulier de l'expérience personnelle. L'entretien d'explicitation, inspiré des techniques d'entrevue clinique de Piaget, vise justement à préciser les connaissances et les actions implicites d'un sujet. « *[L'entretien d'explicitation] est un outil de diagnostic, fiable et riche, qui assure une connaissance dynamique et plurielle de l'apprenant.* » (E. Perry et M. -A. Voix, dans Vermersch et Maurel, 1997, p. 134)

La méthode utilisée est basée sur des entretiens individuels de tous les sujets participants d'une durée d'environ 60 minutes. Les sujets sont tout d'abord testés sur le contenu, soit la nature de la lumière, l'influence des paramètres sur l'effet photoélectrique,

etc., puis sur l'apport du travail collaboratif et ensuite, sur l'usage des technologies (simulation et dispositifs mobiles). Chaque fois qu'un sujet répond brièvement, il est incité à expliquer davantage et à justifier sa réponse.

L'interviewer utilise parfois des questions indirectes visant également à recueillir des informations sur la démarche du sujet. Il essaie d'éviter de questionner le sujet sur le pourquoi de ses actions et se concentre sur le comment. Il reformule les verbalisations des sujets afin de les inviter à préciser leurs raisonnements. Les entrevues entamées ne suivent pas un protocole fermé où l'ordre et la forme des questions posées aux sujets sont déterminés à l'avance. Les entretiens ont été enregistrés et l'analyse des données a été réalisée à partir des protocoles retranscrits. Les résultats des analyses des entrevues sont ensuite comparés aux résultats des sujets au prétest et au post-test.

4.3. Questionnaire sur la collaboration, l'apprentissage mobile et les simulations

L'environnement d'apprentissage, utilisé dans cette recherche, est un environnement mobile basé sur une simulation en situation de collaboration. Nous nous sommes interrogés sur la contribution de chacune de ces dimensions : la collaboration, la simulation et la mobilité à l'évolution des conceptions chez les apprenants au sujet de la lumière. À cet effet, nous avons fait passer aux étudiants du groupe expérimental, à la fin de l'activité, un questionnaire sur l'apprentissage collaboratif, apprentissage mobile et le rôle de la simulation (Annexe VIII). Ce questionnaire est constitué de trois grilles. Les deux premières grilles sont empruntées des travaux de Ragoonaden (2004) et sont issues des éléments essentiels de la revue de littérature sur l'apprentissage collaboratif (voir chapitre 2); la première grille porte sur le rôle de l'apprenant dans un environnement collaboratif et la deuxième grille a pour objectif de définir les types d'interaction entre les apprenants au cours d'une activité collaborative; elle contient des propositions sur les mécanismes de collaboration utilisés pour compléter l'activité collaborative. La troisième grille porte sur le rôle de la simulation sur ordinateur de poche (PDA). Les énoncés sont dégagés à partir de

la revue de littérature (voir chapitre 2); toutes les questions sont préparées sur une échelle de Likert de 1 à 5. Les résultats de ce questionnaire nous donnent une idée sur le rôle de la collaboration, l'usage de la simulation et du PDA pour la compréhension de l'effet photoélectrique.

4.4. Enregistrements vidéos

L'observation du phénomène étudié dans son environnement naturel permet au chercheur d'étudier en particulier les procédés, les variations et les différences individuelles dans les réactions des sujets. Pour des fins d'analyse, nous avons appuyé nos résultats de prétest et post-test et nos entrevues par l'observation directe. L'enregistrement vidéo des données apparaît comme un bon moyen d'intégrer aux données analysées certains aspects non verbaux de la situation de communication observée. Nous avons procédé ainsi à l'enregistrement vidéo de toutes les activités, individuelles et collaboratives, et des traces des mises en commun effectuées sur l'ordinateur portable (grâce au logiciel MORAE). La caméra est placée derrière l'ordinateur sur lequel travaillait l'équipe filmée, à la fois face à cette dernière et en léger décalage latéral de façon à ce que les conduites non verbales des apprenants rentrent bien dans le champ. Il nous paraît un peu difficile d'éviter l'intimidation possible causée par la présence de la caméra. Nous avons fait appel à la technologie de traçage afin d'enregistrer toutes les actions, tous les faits et les gestes des équipes dans la réalisation des tâches demandées. Chacune des équipes dispose d'un ordinateur portable doté de la technologie MORAE Recorder qui enregistre en temps réel l'activité des utilisateurs. Toutes les actions effectuées à l'écran ainsi que l'image de la caméra sont enregistrées dans un fichier. La durée prévue des enregistrements est environ quatre heures pour chaque équipe. Une application complémentaire MORAE Manager permet de visualiser les activités en différé. Nous avons donc effectué un suivi des tâches réalisées, des actions et des interactions des sujets pendant la séquence des activités. MORAE Manager nous donne des outils permettant d'analyser les enregistrements vidéos, de calculer la métrologie automatiquement, de générer des illustrations graphiques. Deux types d'analyses offertes par MORAE méritent d'être exploités dans notre étude dans le but

d'analyser la collaboration, la mobilité et l'usage de la simulation auprès des participants : l'analyse des tâches qui nous fournit la durée des tâches de l'activité et l'analyse des marqueurs qui nous offre la distribution des types ou des scores des marqueurs. Chaque marqueur sera attribué à une action d'un sujet ou des sujets au cours de l'activité.

4.5. Traces des sujets

Pour appuyer nos résultats, nous avons récupéré les traces des sujets sur papier : leurs prévisions, les résultats de simulations, les essais la rédaction du rapport final. Nous avons également enregistré toutes les actions et les opérations faites par chaque sujet lors de la manipulation de la simulation par un programme informatique (logs) intégré dans la plateforme MobileSIM, dans le but de faire le suivi du cheminement du sujet au cours de l'apprentissage.

5. Traitement des données

5.1. Étude quantitative des résultats des prétests et post-tests

Notre objectif principal consiste à évaluer l'impact de la situation d'apprentissage sur l'évolution conceptuel d'une situation d'apprentissage basée sur la simulation, la collaboration et les technologies mobiles. Pour ce faire, nous avons procédé dans un premier temps à l'analyse et la comparaison des résultats aux prétest et post-test pour chaque groupe : expérimental et de contrôle. Nous avons ainsi utilisé le logiciel SPSS pour calculer les valeurs moyennes, les médianes et les écarts-types. Dans un deuxième temps nous avons effectué le test de Wilcoxon afin de vérifier si les résultats sont dus au hasard. Nous avons ensuite utilisé une analyse ANOVA à un seul facteur pour comparer l'évolution des résultats du groupe expérimental et ceux du groupe de contrôle.

Nous avons ultérieurement opté pour une analyse plus détaillée des résultats du groupe expérimental en traitant les scores et les réponses de chaque sujet individuellement et pour chaque question.

5.2. Étude qualitative des entrevues

Les enregistrements de toutes les entrevues sont écoutés et retranscrits. Pour l'analyse des contenus des entrevues, nous avons utilisé le logiciel QDA Miner. Les entrevues sont ensuite lues et les passages intéressants sont mis en relief. Notons que nous avons choisi de faire des entrevues à tous les sujets de force variée pour des fins exploratoires. Nous avons effectué la transcription complète des entrevues des 14 sujets. Au total, environ 14 heures d'entretiens qui sont retranscrits sous forme de texte. L'analyse de ce matériau, quant à elle, est réalisée à l'aide d'un logiciel de traitement de données qualitatives, QDA Miner. C'est un logiciel convivial d'analyse de données qualitatives permettant de coder des données textuelles (des segments d'entrevues, mots, phrases, paragraphes, etc.), d'annoter, d'extraire et de réviser des données et des documents codés. QDA Miner conserve tous les documents, les schèmes de codes, les codes et les notes dans un ensemble de fichiers appelé « projet ». Les projets de QDA Miner sont composés de plusieurs cas. Un cas est l'unité d'analyse de base d'un projet. Il représente habituellement un individu, une organisation ou un groupe. Dans cette recherche, nous considérons que chaque cas contient les informations associées à un seul sujet interviewé et par conséquent notre fichier projet est composé de 14 cas. Le système de codes, qui correspondent aux mots-clés les plus importants de la problématique et du cadre théorique, peut être hiérarchisé. C'est-à-dire que les codes peuvent être insérés les uns dans les autres sous forme de catégories, de rubriques et de sous-rubriques. Dans ce projet, nous avons utilisé quatre catégories : Conceptions, Collaboration, Simulation et Mobilité. Le nombre de sous catégories, de rubriques, des sous rubriques et le nombre de niveaux de la hiérarchisation sont désignés au fur et à mesure que l'analyse des données progresse.

L'analyse des entrevues nous permet de dégager les principales conceptions des sujets sur la lumière, de l'effet photoélectrique et des concepts connexes et d'identifier le rôle de la collaboration, de la simulation et de la mobilité dans notre environnement d'apprentissage proposé.

5.3. Traitement des enregistrements vidéos

En plus de l'analyse des tâches qui nous fournit la durée des tâches de l'activité, MORAE nous permet également d'effectuer une analyse des marqueurs qui nous offre la distribution des types ou des scores des marqueurs. Chaque marqueur est associé à une action d'un sujet ou de plusieurs sujets au cours de l'activité, chaque action étant elle-même associée à son tour à une composante ou à des composantes de l'apprentissage collaboratif. Les enregistrements de toutes les actions et des conversations des sujets sont codés par le chercheur et à l'aide du logiciel MORAE Manager via une grille pour des fins d'analyse. L'annexe IX donne un aperçu de la grille que nous avons utilisée pour coder et analyser les enregistrements vidéo par MORAE Manager. Elle contient 19 types de marqueurs utilisés, chaque marqueur correspondant à une ou des actions (ou interventions), associées à leur tour à une ou des composantes de l'apprentissage collaboratif (voir chapitre II) : Clarification/explication (CE); Partage du travail collaboratif (PTC); Recherche des informations (RI); Construction de connaissances (CC); Gestion de groupe/équipe (GG); Conflit (conflit); Compromis (Compromis); Encouragement (ENC); Socialisation (SOC); Interactions (INT); nous distinguons aussi entre interactions apprenant-interface (INT-AI), interactions apprenant-contenu (INT-AC), interactions apprenant-apprenant (INT-AA) et interactions apprenant-professeur (INT-AP). Prenons par exemple le marqueur A (voir Annexe IX), qui correspond à l'action 1 « *Tenir compte de l'écoulement du temps/respecter les échéances* », il est associé à la composante « *Gestion de groupe/équipe (GG)* ».

Nous nous sommes arrêtés à chaque action en la visualisant plusieurs fois et avec prudence et réflexion profonde avant de l'attribuer à un marqueur. Nous avons repéré 2 136 marqueurs qui désignent le nombre total des interventions (échange verbal, action, participation ou geste). De même, nous repérons le début et la fin de chaque tâche pour calculer la durée des tâches de l'activité. En plus de l'attribution des marqueurs aux actions et le repérage de temps initial et final, la fiabilité des résultats peut être influencée par une éventuelle intimidation chez les étudiants causée par la présence de la caméra et la période de codage (un peu longue). Une fois codés tous les enregistrements, nous avons opté pour

le logiciel MORAE pour les analyser. En effet, l'utilisation de ce logiciel nous offre la possibilité de tracer le cheminement des sujets conduisant à la réalisation de la tâche. MORAE permet aussi de créer facilement des graphiques afin de déterminer la fréquence des marqueurs des tâches. À partir de la distribution des types de marqueurs, nous avons ainsi déduit la distribution des composantes de l'apprentissage collaboratif. Le traitement est fait pour une équipe ou pour l'ensemble des équipes, pour une tâche ou l'ensemble des tâches. Ces informations sont très intéressantes parce qu'elles donnent une idée objective des stratégies utilisées au cours de l'exécution de la tâche et de la collaboration et les interactions entre les sujets.

5.4. Traces : logs, papiers

Les questionnaires de prévisions nous permettent d'identifier les conceptions chez les sujets sur la lumière avant l'activité et à propos des différents facteurs qui influencent l'effet photoélectrique. Nous les avons ainsi comparées aux conceptions chez les sujets après l'activité. Les actions enregistrées par le programme (logs) nous ont donné une idée sur la fréquence de l'usage des différents facteurs influençant l'effet photoélectrique (intensité, longueur d'onde ou la nature du métal). Cet enregistrement nous a également offert des informations sur la fréquence de l'utilisation de ces facteurs par chaque sujet et sur l'évolution dans le temps des différentes actions effectuées par le sujet pendant son apprentissage. Ceci nous a permis de suivre le cheminement d'apprentissage de chaque sujet et de le comparer à ses performances. Ces traces (papiers et logs) servent d'appui pour l'analyse des résultats des sujets aux prétests et post-tests et aux entrevues effectuées.

CHAPITRE 5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Rappelons que l'objectif de cette recherche est de mettre en évidence l'impact d'une situation d'apprentissage collaboratif, en utilisant le simulateur de l'effet photoélectrique et des dispositifs mobiles, sur le changement conceptuel de l'aspect ondulatoire de la lumière au profit de son aspect quantique, faisant intervenir les conceptions des apprenants sur le phénomène photoélectrique et les concepts connexes. Dans ce chapitre, nous avons choisi de présenter tout d'abord les résultats globaux par type de questions concernant le post-test et prétest pour les deux groupes, expérimental et contrôle, dans le but d'examiner l'impact de l'enseignement de l'effet photoélectrique. Ensuite, nous étudions plus profondément les résultats de chaque question en mettant en lien les différents résultats provenant des entrevues afin de dégager les principales conceptions des sujets concernant la nature de la lumière et l'effet photoélectrique ainsi que les concepts connexes. Enfin, nous présentons les résultats, issus des enregistrements vidéo et des questionnaires, suivant le processus d'apprentissage en essayant de mettre en relief le rôle de chaque étape de l'expérimentation et plus particulièrement les rôles de la simulation, de la collaboration et de la mobilité.

1. Effet d'enseignement de l'effet photoélectrique

Nous présentons les résultats en deux catégories de questions; la première catégorie, que nous désignons par la variable LUM, porte sur les questions traitant des conceptions sur la nature de la lumière et regroupe les questions 5 et 6; la seconde catégorie rassemble les questions qui traitent des conceptions sur l'effet photoélectrique et les concepts connexes; cette catégorie est signalée par EFCC et sera scindée ultérieurement en d'autres types de questions pour des fins d'analyse.

1.1. Résultats au prétest

La figure 11 représente les résultats exhaustifs obtenus lors du prétest (avant la séquence d'apprentissage) en pourcentages de bonnes réponses pour chaque catégorie de questions, pour les deux groupes (expérimental et contrôle).

À la lecture des résultats, nous pouvons d'emblée remarquer que les sujets du groupe contrôle étaient un peu plus faibles que ceux du groupe expérimental. En effet, ces derniers ont obtenu des résultats plus élevés, selon leur moyenne pour chaque catégorie de questions. On note une moyenne globale d'environ 35 % de bonnes réponses pour le groupe contrôle contre une valeur moyenne de 36 % pour le groupe expérimental soit une différence d'environ 1 %.

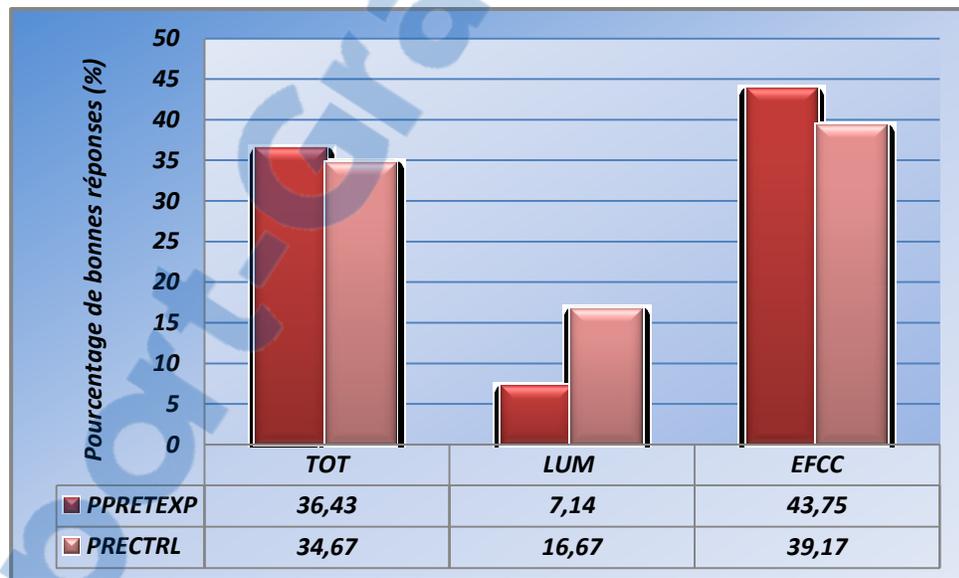


Figure 11. Pourcentage de bonnes réponses au prétest pour les deux groupes (expérimental : PRETEXP - contrôle : PRECTRL)

On peut également signaler que les sujets du groupe contrôle ont eu plus de facilité avec la première catégorie des questions sur la nature de la lumière, tandis que les sujets du groupe expérimental ont mieux performé sur la deuxième catégorie de questions sur l'effet phénomène photoélectrique et des concepts connexes. L'écart est beaucoup plus remarquable pour les conceptions à propos la lumière (environ 10 %) que pour les conceptions concernant l'effet photoélectrique et concepts connexes (5 %). Le tableau I

montre que les deux groupes n'ont pas les mêmes valeurs de médianes et que les réponses du groupe expérimental sont plus homogènes que celles du groupe contrôle. Finalement, on peut considérer que les deux groupes (contrôle et expérimental) étaient presque de la même force. Il y a une faible différence (environ 1 %) entre les résultats des deux groupes (contrôle plus faible qu'expérimental).

Tableau I. Statistiques descriptives (Prétest)

	Groupe	N	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart type
TOT	C	30	10	70	34,67	30,00	14,08
	E	14	20	50	36,43	40,00	7,45
LUM	C	30	00	50	16,67	00,00	23,97
	E	14	00	50	7,14	00,00	18,16
EFCC	C	30	12,50	75,00	39,17	37,50	16,97
	E	14	25	62,50	43,75	50,00	10,68

1.2. Résultats au post-test

À la suite du laboratoire, le groupe expérimental a creusé l'écart entre ses résultats et ceux du groupe contrôle; il obtient de meilleurs résultats. La figure 12 représente les résultats exhaustifs obtenus lors du post-test en pourcentage de bonnes réponses pour chaque catégorie de questions, pour les deux groupes (expérimental et contrôle). Nous constatons que les sujets du groupe expérimental ont obtenu des résultats plus élevés, selon leur moyenne pour chaque catégorie de questions. On constate une moyenne globale de 71 % de bonnes réponses pour le groupe expérimental contre une valeur moyenne de 45 % pour le groupe contrôle.

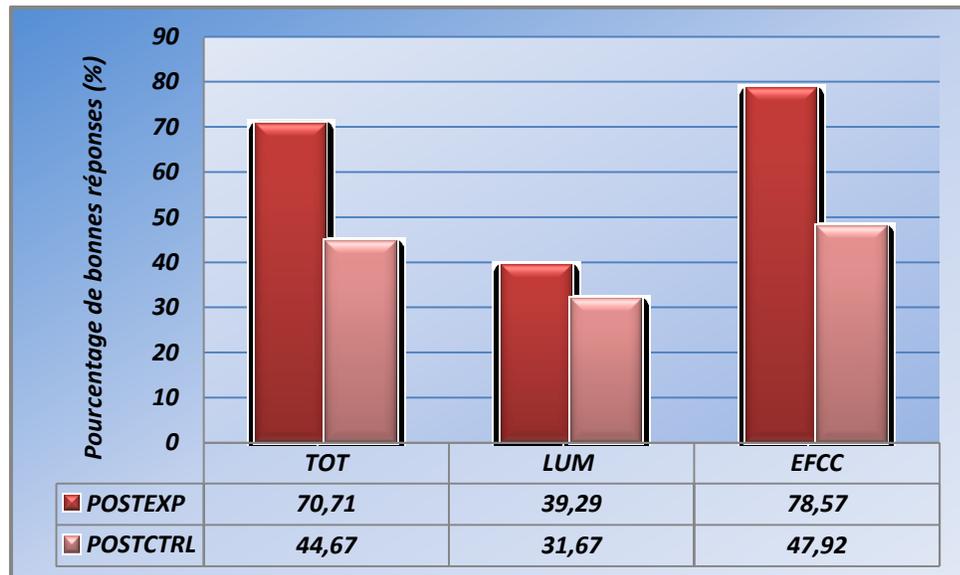


Figure 12. Pourcentage de bonnes réponses au post-test pour les deux groupes (expérimental : POSTEXP - contrôle : POSTCTRL)

On peut aussi constater que les sujets du groupe expérimental ont eu plus de facilité avec les deux catégories de questions. L'écart est moins important pour les conceptions à propos la lumière (environ 8 %) que pour les conceptions concernant l'effet photoélectrique et concepts connexes (31 %). Le tableau II montre que les deux groupes n'ont pas les mêmes valeurs médianes; la médiane du groupe expérimental est nettement supérieure par rapport à celle du groupe contrôle. L'écart-type des résultats du groupe expérimental est légèrement inférieur à celui du groupe contrôle. Nous pouvons ainsi dire que les réponses du groupe expérimental étaient plus homogènes que celles du groupe contrôle.

Tableau II. Statistiques descriptives (post-test)

	Groupe	N	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart type
TOT	C	30	10	80	44,67	45,00	18,14
	E	14	60,00	80,00	70,71	70,00	8,29
LUM	C	30	00	100	31,67	25,00	35,92
	E	14	00	100	39,29	50,00	40,09
EFCC	C	30	12,50	87,50	47,92	50,00	20,78
	E	14	62,50	87,50	78,57	75,00	9,08

Enfin, on peut estimer que le groupe expérimental a obtenu de meilleurs résultats que le groupe contrôle. Il y a une différence plus marquée entre les résultats des deux groupes. Nous tentons de comparer les résultats des deux groupes dans ce qui suit.

1.3. Comparaison des résultats des deux groupes

1.3.1. Évolution des résultats du groupe de contrôle

Le tableau III présente les moyennes du groupe contrôle, avant et après la séquence d'apprentissage, pour chacune des principales catégories de questions, concernant les conceptions sur la lumière et les conceptions sur l'effet photoélectrique et concepts connexes.

Tableau III. Tableau comparatif des résultats (en pourcentage) des deux catégories pour le groupe contrôle

	PRE	POST	Différence
TOT	34,67	44,67	10
LUM	16,67	31,67	15
EFCC	39,17	47,92	8,75

Nous pouvons constater que la moyenne des pourcentages du total de bonnes réponses du groupe contrôle passe de 35 % à 45 %, soit une amélioration de 10 %. Cette différence atteint 15 % pour les résultats relatifs aux conceptions sur la nature de la lumière, alors qu'elle atteint 9 % pour ceux relatifs aux conceptions sur l'effet photoélectrique et concepts connexes. Ainsi, il semble qu'il y ait plus de différences entre les groupes pour la première catégorie de questions que pour la seconde.

Pour vérifier ensuite si les différences relevées sont significatives, nous avons soumis nos résultats au test non paramétrique de Wilcoxon qui mesure l'effet du hasard. Les résultats de ce test (tableau IV) montrent que les différences notées ci-dessus sont significatives avec un risque d'erreur $p < 0.05$.

Tableau IV. Résultat du test de Wilcoxon pour la comparaison du prétest et post-test (Groupe de contrôle)

Rangs				
		N	Rang moyen	Somme des rangs
TotCPS - TotCPR	Rangs négatifs	7 ^a	10,43	73,00
	Rangs positifs	18 ^b	14,00	252,00
	Ex aequo	5 ^c		
	Total	30		
LumCPS - LumCPR	Rangs négatifs	4 ^g	7,00	28,00
	Rangs positifs	11 ^h	8,36	92,00
	Ex aequo	15 ⁱ		
	Total	30		
EfccCPS - EfccCPR	Rangs négatifs	7 ^m	11,71	82,00
	Rangs positifs	17 ⁿ	12,82	218,00
	Ex aequo	6 ^o		
	Total	30		

a. TotCPS<TotCPR / b. TotCPS>TotCPR / c. TotCPS = TotCPR / g. LumCPS<LumCPR / h. LumCPS>LumCPR / i. LumCPS = LumCPR / m. EfccCPS<EfccCPR / n. EfccCPS>EfccCPR / o. EfccCPS = EfccCPR

Test^b

	TotCPS - TotCPR	LumCPS - LumCPR	EfccCPS - EfccCPR
Z	-2,441 ^a	-1,968 ^a	-1,978 ^a
Signification asymptotique (bilatérale)	,015	,049	,048

a. Basée sur les rangs négatifs,
b. Test de Wilcoxon

1. 3.2. Évolution des résultats du groupe expérimental

Le tableau V présente les moyennes du groupe expérimental avant et après la séquence d'apprentissage pour chacune des principales catégories de questions sur les conceptions de la lumière et des conceptions sur de l'effet photoélectrique et concepts connexes. La moyenne des pourcentages de bonnes réponses du groupe contrôle passe de 36 % à 71 %, soit une amélioration de 35 %. Cette différence atteint 32 % pour les résultats relatifs aux conceptions de la nature de la lumière, alors qu'elle atteint 35 % pour ceux relatifs aux conceptions de l'effet photoélectrique et concepts connexes. Ainsi, il semble

qu'il y ait moins de différences pour la première catégorie des questions que pour la seconde.

Tableau V. Tableau comparatif des résultats (en pourcentage) des deux catégories pour le groupe expérimental

	PRE	POST	Différence
TOT	36,43	70,71	34,28
LUM	7,14	39,29	32,15
EFCC	43,75	78,57	34,82

Nous devons vérifier ensuite, si les différences relevées sont significatives. Nous soumettons nos résultats au test non paramétrique de Wilcoxon afin de vérifier s'ils sont dus au hasard. Les résultats de ce test (tableau VI) montrent que les différences notées ci-dessus sont hautement significatives avec un risque d'erreur $p < 0.05$.

Tableau VI. Résultat du test de Wilcoxon pour la comparaison du prétest et post-test (Groupe expérimental)

Rangs				
		N	Rang moyen	Somme des rangs
TotEPS - TotEPR	Rangs négatifs	0 ^d	,00	,00
	Rangs positifs	14 ^e	7,50	105,00
	Ex aequo	0 ^f		
	Total	14		
LumEPS - LumEPR	Rangs négatifs	1 ^j	4,00	4,00
	Rangs positifs	8 ^k	5,13	41,00
	Ex aequo	5 ^l		
	Total	14		
EfccEPS - EfccEPR	Rangs négatifs	0 ^p	,00	,00
	Rangs positifs	14 ^q	7,50	105,00
	Ex aequo	0 ^r		
	Total	14		

d. TotEPS < TotEPR / e. TotEPS > TotEPR / f. TotEPS = TotEPR / j. LumEPS < LumEPR / k. LumEPS > LumEPR / l. LumEPS = LumEPR / p. EfccEPS < EfccEPR / q. EfccEPS > EfccEPR / r. EfccEPS = EfccEPR

Test^b

	TotEPS - TotEPR	LumEPS - LumEPR	EfccEPS - EfccEPR
Z	-3,336 ^a	-2,310 ^a	-3,334 ^a
Signification asymptotique (bilatérale)	,001	,021	,001

a. Basée sur les rangs négatifs, b. Test de Wilcoxon

La signification pour l'ensemble des questions est de l'ordre de 0.001, tandis qu'elle prend les valeurs 0.021 et 0.001 pour les résultats concernant respectivement les conceptions de la nature de la lumière et de l'effet photoélectrique et concepts connexes.

En somme, les résultats indiquent qu'il est possible de conclure que, statistiquement, l'écart entre la mesure prétest et la mesure post-test est différent de zéro avec une signification inférieure à 0.05; donc, la participation à la séquence d'apprentissage basée sur une simulation dans un environnement mobile et en situation de collaboration produit une évolution des conceptions concernant la nature de la lumière, l'effet photoélectrique et concepts connexes chez les sujets.

1.3.3. Évolution des résultats des deux groupes (contrôle et expérimental)

Les résultats montrent que le groupe expérimental a performé beaucoup mieux après la séance d'enseignement. La figure 13 ci-après représente la moyenne de bonnes réponses pour l'ensemble des questions du test avant et après la séquence d'apprentissage. Nous constatons une évolution significative de la moyenne des résultats entre le prétest et le post-test pour les deux groupes (contrôle et expérimental). Le groupe expérimental marque une augmentation de 34 % contre 10 % pour le groupe contrôle. Le tableau VII montre que, pour chacune des principales catégories de questions portant sur les conceptions de la lumière et des conceptions de l'effet photoélectrique et concepts connexes, la moyenne du groupe expérimental est supérieure à celle du groupe contrôle.



Figure 13. Comparaison des scores moyens des deux groupes

Cette différence atteint 17 % pour les résultats relatifs aux conceptions de la nature de la lumière, alors qu'elle atteint 26 % pour les résultats relatifs aux conceptions de l'effet photoélectrique et concepts connexes. Ainsi, il semble qu'il y ait moins de différence entre les groupes pour la première catégorie que pour la seconde.

Tableau VII. Tableau comparatif des résultats (en pourcentage) des deux catégories pour les deux groupes.

	Groupe expérimental	Groupe contrôle	Différences
	POST- PRE	POST- PRE	POST- PRE
TOT	34,28	10	24,28
LUM	32,15	15	17,15
EFCC	34,82	8,75	26,07

Finalement, lorsque l'on compare les deux groupes, on s'aperçoit que le taux de réussite est toujours supérieur dans le groupe expérimental; on peut considérer ainsi que le groupe expérimental obtient des résultats largement supérieurs que le groupe contrôle. Par ailleurs, pour analyser l'importance de l'écart entre les deux mesures et permettre la comparaison de résultats, nous suggérons d'utiliser le terme de gain conceptuel normalisé (ou facteur de Hake) dans ce qui suit.

1.4. Gain normalisé (facteur de Hake)

En physique, l'apprentissage conceptuel des étudiants a été fréquemment mesuré à l'aide du gain normalisé (ou facteur de Hake) pour rapporter des résultats du FCI (Force Concept Inventory), dans le but d'éviter les effets « plafond » ou « plancher » (Hestenes et al., 1992). Le gain normalisé donne le rapport du gain conceptuel brut obtenu par rapport au gain maximal possible et il est défini comme suit :

$$g = \text{gain brut} / \text{gain maximal possible} = (\text{Post } T - \text{Pré } T) / (\text{max } T - \text{Pré } T)$$

Nous utilisons ce concept pour analyser nos résultats. Le résultat peut être interprété en utilisant les indications de Hake (1998) selon lesquelles un gain inférieur à 0,30 traduit une amélioration faible, un gain entre 0,30 et 0,70 correspond à une amélioration moyenne et un gain supérieur à 0,70 est expliqué par une amélioration élevée.

La figure 14 représente les gains normalisés des deux groupes (expérimental et contrôle) entre le prétest et le post-test, calculés à partir de la valeur moyenne des pourcentages de bonnes réponses pour chaque catégorie de questions. Nous constatons que le gain normalisé d'apprentissage pour l'ensemble des questions, selon les indications de Hake, correspond à une amélioration moyenne et modérée pour le groupe expérimental (0,54); on note ainsi une valeur de 0,15 pour le groupe contrôle qui correspond à un niveau faible de gain normalisé d'apprentissage.

Les sujets du groupe expérimental ont également obtenu des résultats plus élevés pour chaque catégorie de questions. Concernant les conceptions sur la nature de la lumière, nous constatons un gain normalisé de 0,35 pour le groupe expérimental contre une valeur de 0,18 pour le groupe contrôle, soit une différence de 0,17. Concernant les conceptions sur l'effet photoélectrique et concepts connexes, nous obtenons un gain normalisé de 0,62 pour le groupe expérimental contre une valeur de 0,14 pour le groupe contrôle, soit une différence de 0,48.

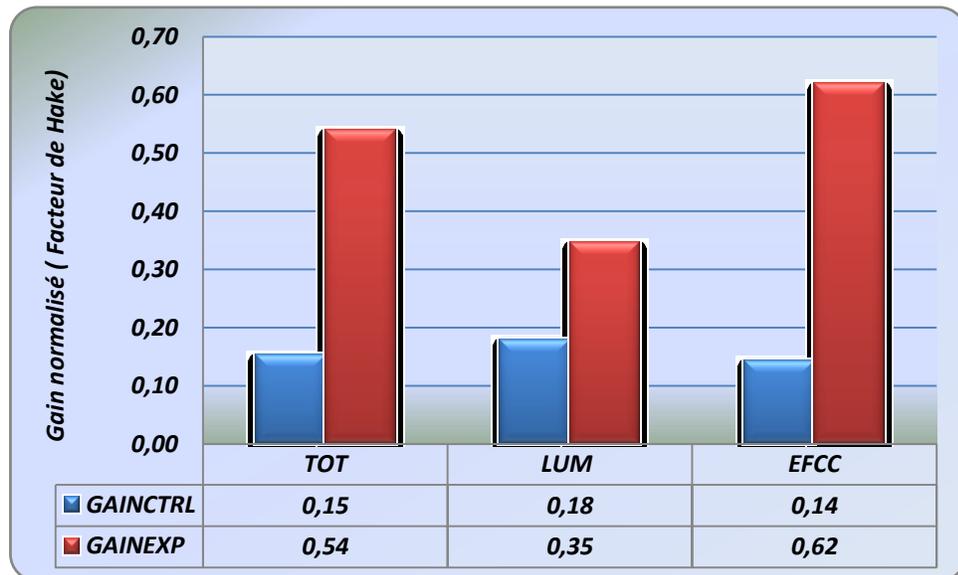


Figure 14. Gain normalisé de Hake pour les deux groupes (Contrôle et Expérimental)

Selon la figure 15, le gain normalisé d'apprentissage des 13 sujets était compris entre 0,30 et 0,70 et était donc de niveau modéré; un seul participant a obtenu un gain normalisé d'apprentissage entre 0,70 et 1 (niveau élevé). Aucun sujet du groupe expérimental n'a obtenu un gain faible ou gain négatif.

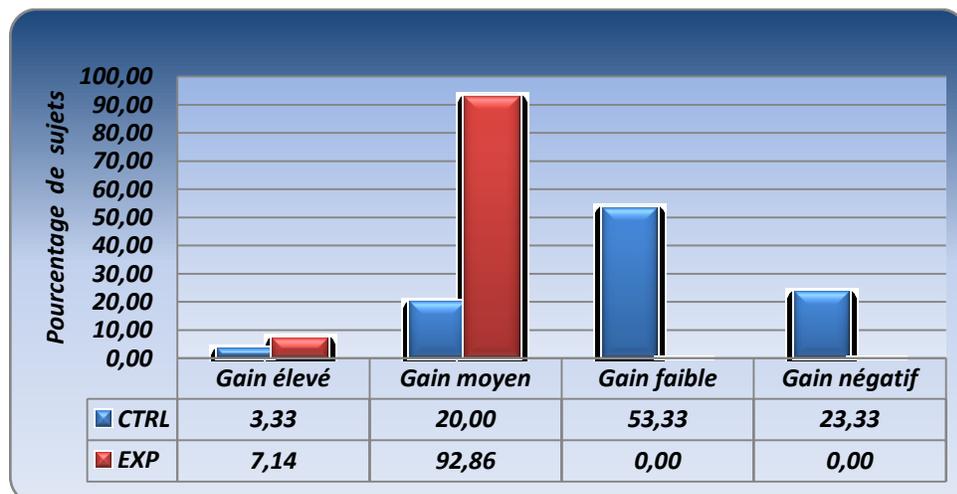


Figure 15. Pourcentage des sujets en fonction du gain pour les deux groupes Contrôle et Expérimental

En somme, en considérant la globalité du cours, le gain moyen d'apprentissage de toutes les questions est de 0,54 pour le groupe expérimental, ce qui correspond à un gain

normalisé d'apprentissage modéré (Hake, 1998), tandis que le gain normalisé moyen pour le groupe contrôle est de 0,15, ce qui correspond à un gain normalisé d'apprentissage faible.

Nos résultats proviennent de quatre groupes d'analyse distincts, le groupe expérimental et le groupe contrôle, avant qu'ils n'aient fait leur cours, et ces deux mêmes groupes, une fois qu'ils ont terminé leur cours sur l'effet photoélectrique. Nous avons ensuite comparé le gain normalisé pour les deux groupes, nous optons ainsi pour un ANOVA à un seul facteur. Les résultats (tableau VIII) révèlent une différence importante et statistiquement significative entre les gains normalisés moyens des deux groupes.

Tableau VIII. Résultats ANOVA à un seul facteur

GainTot					
	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Intergroupes	1,842	1	1,842	25,774	,000
Intragroupes	3,002	42	,071		
Total	4,845	43			

1.5. Récapitulation

Rappelons que notre question de recherche est :

La simulation de l'effet photoélectrique et l'utilisation des dispositifs mobiles et en situation de collaboration favorisent-elles une évolution des conceptions des étudiants au sujet de la lumière ?

Le but de cette recherche est d'évaluer les effets de la séquence d'apprentissage basée sur une simulation dans un mobile et en situation de collaboration sur l'évolution conceptuelle des étudiants du cégep sur la nature de la lumière, l'effet photoélectrique et les concepts connexes. Nous avons présenté les résultats des deux groupes contrôle et expérimental respectivement au prétest et au post-test. Nous avons constaté que les deux groupes ont amélioré leur performance en ce qui concerne l'apprentissage de l'effet photoélectrique. Le test de Wilcoxon nous a confirmé que ces améliorations d'apprentissage sont significatives avec une probabilité inférieure à 0.05. Nous avons utilisé le concept du gain d'apprentissage de Hake pour analyser les résultats des deux groupes. Nous enregistrons un gain moyen d'apprentissage modéré du groupe expérimental

($g = 0.54$) contre un gain moyen d'apprentissage faible du groupe contrôle ($g = 0.15$). Le test d'ANOVA à un seul facteur permet d'affirmer que les gains du groupe expérimental sont significativement plus élevés que ceux du groupe contrôle ($F = 25.77$, $p = 0,00$).

Nous pouvons donc conclure que la séquence d'apprentissage basée sur une simulation dans un environnement mobile et en situation de collaboration a été très bénéfique pour les étudiants. Les résultats montrent bien un gain d'apprentissage important pour le groupe expérimental. Dans la section suivante, nous tentons d'examiner ce gain en nous basant sur les résultats des entrevues pour chaque type de question.

2. Impact sur l'apprentissage et l'évolution conceptuelle

Dans cette partie, nous présentons les résultats spécifiques en respectant le même ordre que dans la section précédente. Nous analysons donc ici les résultats de façon plus qualitative et question par question. L'analyse des entrevues avec les sujets du groupe expérimental, permet d'identifier quelques conceptions au sujet du phénomène de l'effet photoélectrique et d'étudier quelques-uns des effets de l'utilisation du dispositif expérimental. Nous procédons ainsi à une analyse locale. Des relations entre questions pourront être faites au fur et à mesure.

2.1. Conceptions des étudiants au sujet de la lumière

2.1.1. La nature de la lumière

La question sur la nature de la lumière est très vague et les réponses à cette question ne sont pas indépendantes de la situation proposée et des phénomènes utilisés comme support pour expliquer ou décrire le comportement de la lumière. Nous avons élaboré la question en nous basant sur les principaux modèles scientifiques de la nature de la lumière qui ont été présentés dans le chapitre II (section 3.1.1). La question 5 (figure 16) porte sur la nature de la lumière. On se questionne ici sur le modèle de la lumière privilégié ou proche de la conception des sujets. Les sujets sont évidemment invités à choisir un modèle parmi ceux qui leur ont été proposés.

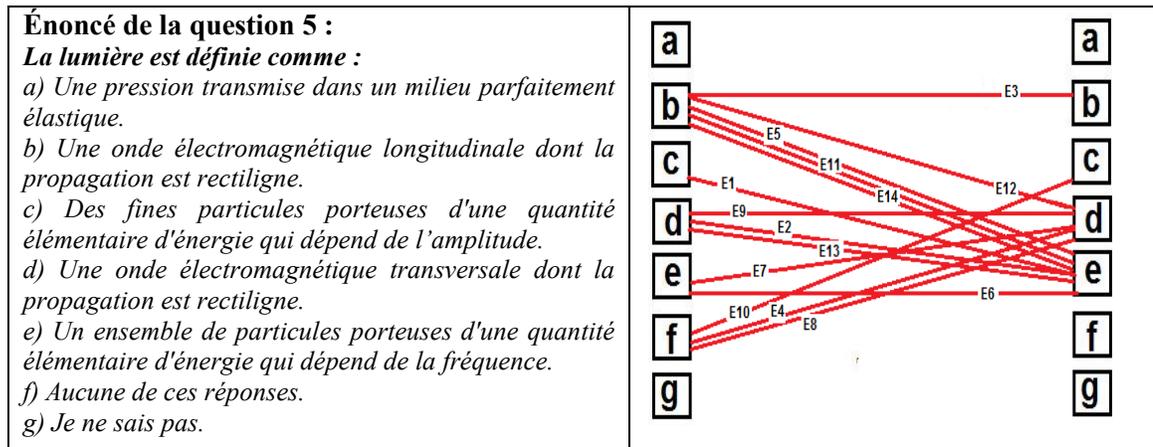


Figure 16. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 5

Le diagramme met en évidence l'évolution des conceptions des sujets sur la nature de la lumière. Le nombre de sujets qui ont la bonne conception passe de deux avant l'intervention à sept après l'intervention, soit cinq sujets de plus. Notons également un pourcentage élevé des sujets (environ 36 %) qui croient toujours que la lumière est une onde électromagnétique transversale dont la propagation est rectiligne.

L'évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée par le tableau IX; le pourcentage des sujets du groupe contrôle qui ont la bonne réponse, reste constant (30 % avant et après enseignement); ce qui correspond à un gain conceptuel nul contre une amélioration de 35,71 % chez les sujets du groupe expérimental (un gain conceptuel normalisé modéré $g = 0.42$). On note ainsi un écart très important entre les deux groupes.

Tableau IX. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental

Réponse		a	b	c	d	e	f	g
Gr. control	Prétest	0	20	3,3	30	30	16,7	0
	Post-test	0	13,3	0	30	30	26,7	0
Gr. Expérimental	Prétest	0	35,71	7,14	21,43	14,29	21,43	0
	Post-test	0	7,14	7,14	35,71	50	0	0

Dans les entrevues, nous nous intéressons principalement aux conceptions que les sujets développent au regard du concept de la lumière. À première vue, les données

semblent montrer que la majorité des sujets interviewés a intégré le modèle quantique de la lumière. La nature bivalente de la lumière (« *la lumière est une onde électromagnétique... la lumière est un ensemble de photons...* ») est fortement présente dans la plupart des réfutations des sujets.

E3 : ... Bon, la lumière a une nature bivalente; d'après ce que j'ai entendu dans le cours, elle est composée des particules qui s'appellent des photons, mais elle a aussi une nature ondulatoire, chose qui est décrite par les équations de Maxwell.

Pour leur part, E4 et E10 conçoivent la dualité de la lumière :

E4 : Bien, tu connais un peu... la première théorie une particule et un photon qui se propage rectiligne, après tout ça il y avait la théorie sous laquelle la lumière est considérée comme une onde, après ça le mélange entre les deux selon les expériences qui peuvent agir comme particule ou comme onde. Après ça, la théorie moderne de la lumière, c'est la dualité ...

E10 : Ma conception sur la lumière; c'était comme une onde et une particule en même temps.

E9 : La lumière est une onde électromagnétique... la lumière est un ensemble de photons qui se propage avec une vitesse C ...

Le sujet E8 conçoit la nature bivalente de la lumière, mais il croit que les photons sont de la matière (des porteurs d'électrons) et que la lumière est formée de deux ondes : l'une verticale et l'autre est horizontale, comme il l'exprime dans la verbalisation suivante :

E8 : la lumière, c'est le modèle ondulatoire; c'est une onde. On peut mesurer la fréquence, mais c'est aussi des particules appelées photons porteurs d'électrons, je ne suis pas sûr comment elle est définie... et puis dans la lumière, il y a deux ondes une verticale et l'autre horizontale ... les photons sont de la matière, les particules dedans sont les photons; moi j'ai choisi le modèle des photons, c'était bien pas mal bon.

E11 croit que la lumière est une onde électromagnétique et contient des photons :

E11 : La lumière c'est une onde, je veux dire, électromagnétique et contient des photons et ces photons ont une énergie je pense c'est ça la lumière pour moi.

Le sujet E1 croit que la lumière est constituée de particules qui se déplacent dans un champ électromagnétique selon une trajectoire ondulatoire (comme référence à la forme sinusoïdale)

E1 : maintenant, je vois qu'elle est composée de particules sans masse... qui se déplacent dans un champ électromagnétique, il y aura deux champs E et B perpendiculaires ...donc c'est un transport (déplacement) de l'énergie ... elle a une fréquence, une amplitude, une intensité...

C : tu veux dire qu'elle se déplace d'une manière sinusoïdale et en même temps rectiligne c'est ce que j'ai compris.

E1 : oui c'est ça, tout à fait, mais la trajectoire est rectiligne.

Nous avons constaté, dans la réponse du sujet E5, la confusion faite entre une onde longitudinale et une onde transversale :

E5 : Une lumière, c'est une onde électromagnétique longitudinale...une lumière c'est des particules aussi, elle est formée de photons...

Nous avons tenté d'explorer comment les sujets réconcilient les deux modèles (ondulatoire et corpusculaire) en un seul. Le sujet E3 fait référence à l'exemple d'une coupe d'eau avec des molécules d'eau qui circulent.

E3 : Normalement, les photons devraient être.... Je crois que l'onde électromagnétique a un certain rôle de direction de photon, donc c'est à peu près comme on a une coupe d'eau avec des molécules d'eau. On a un tuyau par exemple, l'onde et le tuyau qui va diriger ces photons à une certaine source. Donc, ils devraient être comme partie de l'onde même si ils ne font pas partis...hm...ils vont être, l'onde va les diriger ou quelque chose.

Le sujet E13, pour sa part, croit que le modèle ondulatoire est limité, tandis que le modèle corpusculaire peut poursuivre l'explication et englober toutes les solutions possibles.

C : Donc, si vous avez le modèle électromagnétique et le modèle quantique. Est-ce que tous les deux vont ensemble ou ce modèle est valable dans des telles ou telles conditions ?

E13 : Ils sont parallèles jusqu'à un certain temps où le modèle ondulatoire est limité et l'autre peut continuer l'explication et englober toutes les solutions possibles....

Notons également que dans les explications formulées par les sujets, nous pouvons identifier des limites à chaque modèle et nous constatons que la réconciliation des deux modèles était confuse, à l'exception du sujet E4 qui fait référence à l'échelle des grandeurs de l'expérimentation sans mentionner clairement qu'il s'agit de la longueur d'onde.

E4 : ... je dirai peut-être l'échelle des grandeurs de l'expérimentation; on va peut-être au niveau microscopique ou nanométrique, ça va peut-être au niveau ondulatoire et peut être au niveau macroscopique, on parle des particules.

Nous avons également constaté que des sujets continuent à concevoir la lumière comme une matière. Pour E12, la lumière est constituée de photons ou de molécules lumineuses.

E12 : c'est (lumière) constituée des photons....

C : Hm, ces photons sont constitués de quoi ?

E12 : des molécules lumineuses.

C : des molécules ? ...

E12 : Voilà, c'est la plus petite entité dans un ensemble ou dans un univers. C'est la petite entité qui peut exister dans un univers, je crois elle est chargée électriquement.

De même, le sujet E7 conçoit la lumière comme un faisceau d'électrons, qui se propage à travers un milieu magnétisant.

E7 : la lumière pour moi, ça représente un faisceau des électrons, des ions disant qui se propage à travers un magnétisant ... oui qui se propagent à travers un magnétisant en fonction des fois d'une plaque métallique quelque chose comme ça.

C : Ce faisceau contient-il des électrons ? ces électrons ont-ils une masse non ?

E7 : oui.

C : une charge aussi ?

E7 : exacte, $1,6.10^{-19}C$;

C : Donc, pour toi la lumière c'est un faisceau des électrons qui traverse un champ magnétique ?

E7 : oui, à travers un champ magnétique, c'est ça ...

C : pour toi donc, la lumière c'est une matière puisque les électrons sont de la matière puisqu'ils ont une masse ?

E7 : ...Pour moi, ce n'est pas une matière, mais les électrons constituent...hm... mais font partie de la lumière. Les électrons qui font naissance la lumière par ce que sans électron et sans ion, il n'y aura pas de lumière.

Pour sa part, E4 croit que la lumière peut être déviée par la gravité.

E4 : ... Il me semble que j'ai déjà vu que la lumière peut être déviée par la gravité un peu. Je ne sais pas que c'est au niveau de la particule influencée par la gravité...

En somme, la nature bivalente de la lumière (« la lumière est une onde électromagnétique... la lumière est un ensemble de photons ... ») est fortement présente dans la plupart des explications des sujets. Cependant, aucun sujet ne pouvait expliquer clairement la réconciliation des deux modèles et les limites de chaque modèle.

2.1.2. Nature corpusculaire

À l'issue de l'expérimentation, les sujets E2 et E14 conçoivent clairement que la lumière est une énergie qui circule rapidement et qu'elle est constituée de photons.

E2 : Pour moi, la lumière c'est de l'énergie qui circule; celle qui circule plus rapidement à ce qu'on sache dans le monde trois fois dix à la huit. Il me semble c'est la vitesse de la lumière...c'est la vitesse de propagation donc c'est de l'énergie, ce sont des photons, des particules qui se déplacent très rapidement.

E14 : pour le modèle d'Einstein ?

C : Oui, la lumière c'est quoi pour toi ? C'est un ensemble

E14 : C'est la théorie corpusculaire, ça veut dire que la lumière est constituée des quantum d'énergie. Elle possède de l'énergie.

La compréhension de la nature quantique de la lumière dépend strictement du concept principal : le photon. C'est pour cette raison que nous proposons la question 6 aux participants. L'étudiant est invité à choisir une proposition parmi celles proposées.

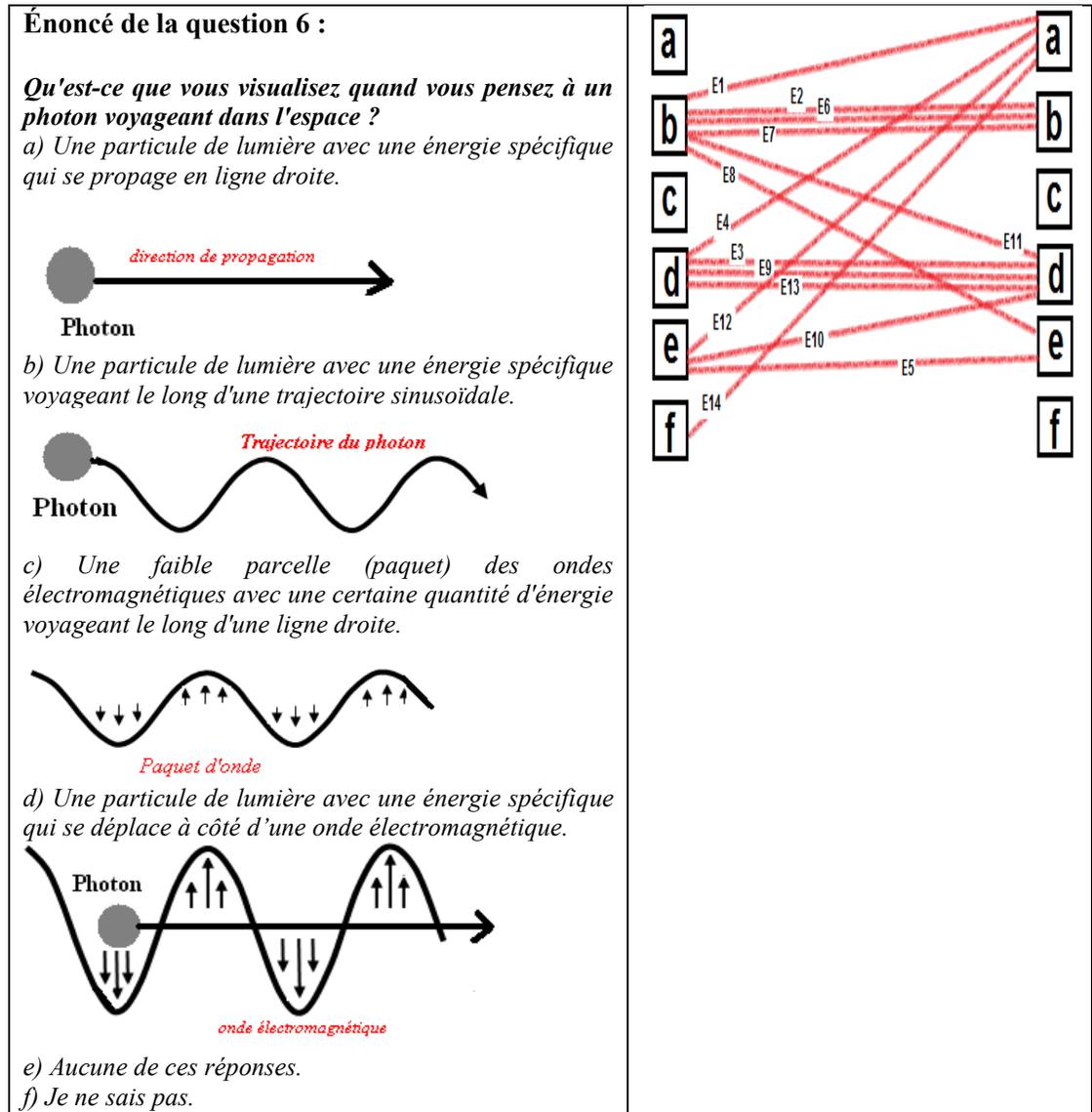


Figure 17. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 6

Le diagramme (figure 17) met en évidence l'évolution des conceptions des sujets à propos du photon. Avant l'expérimentation, aucun sujet n'imaginait que le photon était une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se propage en ligne droite. Seuls quatre sujets ont la bonne conception après la séquence d'apprentissage.

L'évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée par le tableau X; le pourcentage des étudiants du groupe contrôle qui ont la bonne réponse passe de 3 % à 33 % après enseignement, soit une amélioration de 30 % contre un gain de 29 % chez les sujets du groupe expérimental. On note ainsi un faible écart entre les gains des deux groupes.

Tableau X. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 6)

Groupe	Avant-Après	a	b	c	d	e	f
Contrôle	Prétest	3,3	50	10	36,7	0	0
	Post-test	33,3	16,7	13,3	33,3	3,3	0
Expérimental	Prétest	0	42,86	0	28,57	21,43	7,14
	Post-test	28,57	21,43	0	42,86	14,29	0

Dans les entrevues, nous avons tenté d'explorer spécifiquement les conceptions des sujets du groupe contrôle au regard du concept de photon, lors des entretiens et après la séquence d'apprentissage. Une analyse préliminaire des réponses des sujets nous a permis de classer leurs conceptions à propos du photon en quatre catégories :

C1 : Un photon est une particule qui n'a ni masse ni charge;

C2 : Un photon est une particule qui a une masse mais pas de charge;

C3 : Un photon est une particule qui n'a pas de masse mais a une charge;

C4 : Un photon est une particule qui a une masse et une charge.

Comme l'illustre le tableau XI et pour la question proposée, le concept de photon suscite des difficultés de compréhension chez nos sujets interviewés.

Tableau XI. Répartition des conceptions des interviewés à propos du photon.

Conception	C1	C2	C3	C4
Nombre des sujets	6	1	2	5
Pourcentage	42.86	7.14	14.28	35.71

Seuls six sujets parmi les quatorze interviewés manifestent de façon claire une « conception conforme » de la nature du photon et croient que le photon est une particule qui n'a ni masse ni charge. Le sujet E11 croit que le photon n'a pas de masse, ce qui implique qu'il n'a pas de charge.

E11 : un photon pour moi, c'est une particule qui n'a pas de masse et qui a une énergie... Je dirais qu'elle n'a pas de charge, mais je ne sais pas pourquoi ? Je sais qu'il n'a pas de masse donc pas de charge... C'est comme si on parle de la lumière, on parle de la vitesse, on n'a

jamais parlé de la masse. Or, si on considère que la lumière est constituée des photons, et si les photons avaient une masse, la lumière a une masse, je crois...

Quant aux sujets E14 et E9, ils utilisent le raisonnement quantitatif, en faisant appel à la loi d'Einstein $E = h \times f$ pour expliquer leur réponse.

E14 : le photon égale à un quantum d'énergie pas de masse, masse négligeable et possède de l'énergie et constitue la lumière... h fois f en électron volt très petite.

E9 : pour moi, à ma connaissance, un photon est une particule de masse nulle et de charge nulle et porte une énergie électron = $h \times f$ d'après ce qu'on a lu sur les documents.

Le sujet E1 n'est plus capable de justifier sa réponse.

E1 : particule de la lumière... je sais qu'il n'a pas de charge, je ne suis pas sûr...

Pour sa part, le sujet E4 conçoit les photons comme des boules sphériques.

E4 : (...) c'est des particules comme étant en boules. J'ai un peu resté avec cette conception-là.

C : Mais est-ce que ces photons ont une masse ou une charge ?

E4 : Non, non, ils sont neutres, pas de masses, ce n'est que de l'énergie...

Le sujet E2 définit le photon comme une particule vibratoire.

E2 : Étant donné ça me fait penser c'est (photon) une particule, photon est une particule vibratoire, il y a de l'énergie. Dans ma tête je n'ai pas un dessin...

Un seul sujet voit que le photon est une particule, comme un électron qui n'a pas de masse et pas de charge.

C : ... ça présente quoi pour toi un photon ?

E13 : Un photon, c'est comme un électron, mais il n'a pas les caractéristiques d'un électron pas de charge... Il a une masse très négligeable...

C : Il a une énergie ?

E13 : C'est mc^2 ...

Deux sujets supposent que le photon est une particule qui n'a pas de masse, mais a une charge :

C : Tu peux me dire c'est quoi un photon ? ...

E10 : honnêtement je ne sais pas... j'imagine que c'est une particule, mais je ne sais pas d'où ça vient, comment est née ? Ça devrait être créée... peut être une particule sans masse, je ne sais pas ... Il a une charge, ah...oui, on peut le dévier, ça c'est sur on peut le dévier avec l'aimant ... oui, on peut même ralentir la vitesse; yes, il y a des expériences que j'avais vu dans des émissions de magazine de sciences où ils ont réussi de la ralentir pendant un peu de temps.....

Le sujet E8 est allé plus loin en expliquant que la charge d'un photon est négative du fait qu'après bombardement, il y a un transfert des photons en électrons.

E8 : Je pense à la lumière, mais c'est une particule, modèle particulière de la lumière. Je pense que ça a un rapport avec de la lumière c'est important de dire ça a un rapport avec les électrons, il y a transfert avec les électrons. Quand il y a bombardement de photon, ça finit par donner des électrons.

C : Est-ce que ces photons, pour toi, ont une masse, une charge ?

E8 : oui peut-être... Ah, je n'ai aucune idée, je suis partant que c'est négatif

C : pourquoi tu crois que c'est négatif

E8 : Par ce que il y a une certaine fréquence, les photons de la lumière sont transférés en électrons, donc, j'imagine qu'ils viendraient quelque part des charges négatives et puis comme c'est..... Ce sont les photons qui transportent ça.

C : Tu crois puisqu'il y a interaction, il y a des électrons, ça peut être une relation avec les photons

E8 : oui

C : et puisque les électrons sont négatifs. Donc, les photons sont aussi négatifs c'est ça que vous croyez ?

E8 : oui, peut-être ... les photons sont de la matière, les particules dedans sont les photons moi j'ai choisi le modèle des photons c'était bien pas mal bon.

Cinq sujets parmi les quatorze interviewés croient que le photon est une particule qui a une masse et une charge. Selon l'explication du sujet E3, un mouvement est le résultat d'une force de Newton appliquée sur une masse; alors, si le photon a une masse nulle, il ne peut pas être en mouvement, c'est la raison pour laquelle il présume qu'il existe une masse photonique :

E 3 : Les photons c'est des petites particules, mais avec de l'énergie... Il existe une masse photonique, j'ai entendu parler à un certain moment... Si les photons ont une masse si jamais, ils circulent; ils devraient avoir une masse je crois. Si jamais il n'y aurait pas de masse, il n'y aurait pas je ne sais pas sûr qu'il peut circuler. Pour frapper quelque chose, il faut lui donner une énergie pour qu'il bouge. Si jamais il n'y a pas ça serait du vide. Ça ne pourrait pas bouger s'ils n'ont pas de masse. Quelque chose qui doit avoir une force de Newton sans passer les voir. Il faut que nous donnons une force à un objet et que cette force réagit avec la masse... étant donné que les photons se dirigent dans une direction... d'après moi, ils devraient avoir une masse ... Je crois qu'ils ont une charge, mais ce n'est pas sûr...

Pour le sujet E12, un photon est une particule chargée positivement et est égale $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$:

E12 : ...un photon c'est la plus petite entité qu'on on peut trouver... Elle est chargée positivement ... la masse c'est 1,6 quelque chose

C : $1,6 \times 10^{-19}$?

E12 : oui...

C : Pourquoi tu crois que ces photons sont chargés ?

E12 : parce qu'ils peuvent se déplacer... Quand on approche une charge négative, ils s'attirent, il y a une interaction entre eux ou quoi, ça veut dire qu'elle est chargée positivement.

C : Mais là, ce qui est chargé négativement c'est un électron c'est de la matière. Nous parlons du photon ? Est-ce que pour toi un photon est un électron ? ... Est-ce que le photon a une masse ?

E12 : oui

Le sujet E7 croit que le photon est un ion positif et a une masse différente de zéro.

E 7 : C'est un ion positif

C : un photon est un ion positif donc il a une charge qui est positive

E7 : oui

C : est-ce qu'il a une masse ?

E7 : ouiune masse différente de zéro.

Le sujet E6 met également l'accent sur le mouvement du photon pour expliquer qu'il a une charge et une masse.

E6 : ... Oui, ils ont une charge.

C : C'est quoi la charge ?

E6 : Ah, je ne suis pas sûr vraiment là, mais, ce que je suis sûr qu'il y a vraiment une charge pour les photons, parce qu'ils peuvent se déplacer...Et s'ils peuvent se déplacer alors ils ont une énergie pour se déplacer et une masse, on peut dire ça. Il faut parce qu'on disait que l'énergie cinétique, c'est $1/2 \times mv^2$... On peut dire que c'est une particule qui se déplace à haute énergie, ah à haute vitesse, dès qu'il y a comme qu'il y a absorption de la lumière sur une matière ça se trouve...

En somme, notons que la majorité des sujets éprouvent des difficultés concernant la compréhension de la nature quantique de la lumière et le concept du photon. Ceci peut être dû à la mauvaise compréhension de la nature ondulatoire de la lumière que nous tentons d'exposer dans la section suivante.

2.1.3. Nature ondulatoire de la lumière

Quand on demande aux sujets d'expliquer pourquoi ils croient que la lumière est une onde électromagnétique, ils sont incapables de fournir une justification ou de faire référence aux phénomènes lumineux (interférence, diffraction...) qui confirment la nature ondulatoire de la lumière. Aucun sujet n'a pu justifier la nature ondulatoire de la lumière. Des réponses comme « je ne sais pas », « je ne me rappelle pas » sont assez fréquentes.

C :Pourquoi on pense que la lumière est une onde électromagnétique ?

E13 : Parce qu'il y a cette interaction entre l'énergie qui va extraire les électrons et son retour, mais dans ce cas, il y a une onde électrique et une onde magnétique qui sont mis en jeu donc c'est pour cela on donne le nom onde électromagnétique.

C : Est ce qu'il y a des expériences faites bien sûr par des physiciens qui permettent de confirmer la nature ondulatoire de la lumière ?

E13 : Franchement je ne me rappelle pas...

Lorsqu'on demande aux sujets d'expliquer les phénomènes de diffraction où des interférences, ils éprouvent des difficultés majeures pour les expliquer et ne font aucun lien avec la nature ondulatoire de la lumière.

Tout d'abord, notons des conceptions naïves à propos des interférences en faisant référence aux réseaux téléphoniques :

E3 : l'interférence est quoi en effet... les interférences c'était ... on peut avoir des interférences sur une plage par exemple dans les hôpitaux, ils interdisent les cellulaires. Je ne comprends pas pourquoi pas

E6 croit que pour avoir le phénomène d'interférence, il faut deux milieux différents :

C : Est-ce que le mot interférence te dit quelque chose ?

*E6 : Oui ... Oui ... Ah oui c'est vrai, il y a une expérience qui nous dit que pour envoyer des lumières **d'un milieu vers un autre**, il y aura qu'on a des parties comme illuminées et des parties qui n'étaient pas illuminées ce qui explique qu'il y avait interférence entre les lumières...*

La confusion entre le concept de diffraction et celui de la réfraction était assez fréquente dans les réponses des sujets :

C :Est ce que le mot interférence ou diffraction te dit quelque chose ?

E2 : Oui, j'ai appris ça dans mon cours de physique, oui je sais qu'est-ce que c'est mais...lorsqu'on passe d'un milieu de réfraction différent par exemple de l'eau à l'air, là il y a diffraction...

C : tu te rappelles du mot diffraction ?

E8 : on met sur un prisme une source de lumière blanche ou des lumières quelconques puis on envoie une fréquence de lumière d'une couleur.

La confusion entre diffraction et interférence était également assez présente dans les réfutations des sujets :

E5 :... Hm, en fait une diffraction c'est que, mais en fait d'abord c'est une expérience de l'interférence comme on peut supposer comme les trous comme les largeurs des trous sont infiniment petites, tandis que dans une expérience de diffraction, elles ne sont pas vraiment petites il y a vraiment une largeur qu'on peut tenir compte.

Pour sa part, E10 voit la diffraction comme un phénomène de dispersion des couleurs :

C : c'est la diffraction, je ne sais pas si tu as entendu ce mot la ? ...

E10 : on perd un petit peu...c'est juste avec le prisme, avec un prisme qui divise la lumière visible dans toutes ses... composantes... [ja], parce que chaque longueur d'onde, même type, différence...dans ce prisme; certaines longueur d'onde... l'indice du milieu...

C : donc la dispersion ici, donc la diffraction pour toi est une dispersion des couleurs.

E10 : [ja], ok.

Nous avons constaté également que les sujets montrent des difficultés pour expliquer la différence entre la réfraction et la réflexion d'une manière qualitative en faisant toujours référence à un raisonnement quantitatif où ils utilisent les lois de Snell-Descartes et l'angle d'incidence pour nuancer l'écart entre la réfraction et la réflexion.

C : d'accord, est ce que tu peux me parler de la différence entre réfraction et réflexion ?

E10 : réfraction ?... par exemple on a un point M. Si on considère que c'est un rayon lumineux... et c'est de la même façon cet angle par rapport au miroir, oui, ces deux angles sont les mêmes.

C : sont égaux...

E10 : Ah...c'est une idée c'est quoi une réfraction.

C : Si je n'ai pas de miroir, peut-on obtenir une réflexion ?

E10 : normalement oui ...pourquoi pas

C : ça veut dire quoi ? Quand est ce qu'on peut avoir une réflexion ?

E10 : quand la surface est réfléchive...oui réfléchissante.....n'importe quel matériau

C : Pour cette surface, est-ce que ça serait la même chose pour avoir la réfraction ?

E10 : Oh, non c'est différent oui peut être l'angle ça serait différent des deux côtés.....

C : Je parle de la surface, est ce que cette même surface je l'aurai ici, est ce qu'il y aura réfraction ?

E10 : non parce qu'en réfraction ça passe à travers je crois... que l'angle ça va changer, ça va diminuer... [ja] [rire]selon l'indice du milieu....

E6 : Ah, oui c'est bon, c'est qu'on met un... ah ah, il y a une lumière qui passe et on peut donner comme exemple un bout de verre, est ce que je peux dessiner pour voir ah ah ... C'est quand il y a une lumière qui passe, il y a un bloc, on peut dire du verre un isolant, la diffraction c'est que (Silence) ah c'est un phénomène de réflexion ou de diffraction, puisque que ça varient entre...parce que réflexion...C'est qu'il y aura un rayon qui passe par ici... il y aura un rayon qui sera qui va être réfléchi par rapport à ce milieu mais ah ah..., ce qu'on met, par rapport..... Oui par rapport à la normale oui, qui sera réfléchi, mais si c'est le phénomène de diffraction c'est quand ça part il y aura tout le temps d'un rayon qui sera réfléchi, mais qu'il y a une autre quantité qui sera diffractée et qui part par ici, qui va, ou entrer si c'est plus que ...que θ là la... l'angle ...l'angle de réfraction, il sera totalement réfléchi, il va sortir du 90, si c'est plus, il sera réfracté ici dans le verre puis comme il sera réfléchi, mais ça varie tout le temps de θ la la la l'angle de réfraction de chaque de chaque, il y a comme on sait l'équation de Snell-Descartes

qui n sinus de è, le l'angle ou ça part n c'est aaaa.. C'est le facteur de réfraction pour l'air c'est 1 et pour le ... Non, ça c'est pour la réfraction ... Non pour la réfraction ... la aaa.

Nous avons essayé d'interroger des sujets sur leurs conceptions concernant les ondes. Nous avons remarqué qu'ils font toujours référence à la forme sinusoïdale dans leurs explications :

E8 : ... le modèle ondulatoire ça va tracer un dessin de la forme sinus ou cosinus...

C : C'est quoi pour toi une onde ?

E13 : Vraiment l'interprétation physique, je n'ai jamais eu l'idée d'avoir quelque chose plus réaliste sur une onde par contre une onde est au moins une fonction sinusoïdale avec laquelle je peux jouer pour aboutir à une solution.

De même, notons la présence de l'aspect matériel lorsqu'ils tentent d'expliquer la nature de la lumière ou lorsqu'ils font usage du concept d'onde.

E10 : (ondes) Juste compression de l'air, mais il n'y a pas des ondes sonores, ce n'est pas comme des particules qui bougent tout le temps ce n'est pas une particule comme par exemple ces ondes de sons par exemple comme la compression et la dépression...

2.1.4. Discussion

Rappelons que nous avons posé au chapitre 3 la question suivante :

Quelles sont les conceptions présentes chez les sujets du cégep sur la lumière avant et après l'enseignement de l'effet photoélectrique ?

Nous nous intéressons dans cette section aux résultats concernant les conceptions sur la nature de la lumière. Bien que la moitié des sujets croient après enseignement que la lumière est un ensemble de photons, nous enregistrons un pourcentage élevé des sujets (35,71 %) qui continuent à croire que la lumière est une onde électromagnétique transversale dont la propagation est rectiligne. Dans les entrevues, les données semblent au début, montrer que la plupart des sujets ont intégré le modèle quantique de la lumière. La nature bivalente de la lumière (« *la lumière est une onde électromagnétique... la lumière est un ensemble de photons ...* ») est fortement présente dans la plupart des réfutations des sujets. En allant plus profondément dans nos questions, les sujets sont incapables d'expliquer leur point de vue et ils ne pouvaient pas justifier la nature ondulatoire en se référant aux phénomènes de diffraction et d'interférences; en plus, la majorité d'entre eux ne font pas de distinction entre diffraction, réfraction et réflexion. À ce niveau, nous avons

pu relever que des sujets arrivent en classe avec une mauvaise compréhension du concept d'onde et avec une confusion entre une onde transversale et une onde longitudinale. Certains d'entre eux ne parviennent pas à différencier la fréquence de l'amplitude lorsqu'on évoque la notion d'onde. Nos résultats sont en accord avec ceux d'Ambrose et al. (1999) et de Steinberg et al. (1999) qui mentionnent que les sujets rencontrent des difficultés pour comprendre les modèles et concepts classiques. Ainsi, la plupart des sujets ne développent pas un modèle ondulatoire raisonnable du comportement de la lumière, ce qui engendre des difficultés au cours de leurs études en physique moderne et peut créer une mauvaise interprétation de la nature quantique de la lumière. Au lieu de corriger leur manière de percevoir la lumière, plusieurs sujets incorporent la nouvelle physique qu'ils apprennent dans leur modèle erroné.

En ce qui concerne la nature quantique de la lumière, nous avons noté que quatre sujets croient que le photon est une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se propage en ligne droite. Cependant, nous enregistrons un pourcentage élevé des sujets (42,86 %) qui pensent que le photon est une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se déplace à côté d'une onde électromagnétique. Ces résultats confirment ceux de McKagan et al. (2009). Dans les entrevues, six sujets manifestent de façon claire des « conceptions conformes » sur la nature du photon et croient que le photon est une particule qui n'a ni masse ni charge. De même, notons le pourcentage élevé des sujets qui estiment que le photon est une particule qui a une masse et une charge. Plusieurs explications sont évoquées pour justifier cette proposition, notons par exemple l'explication d'un sujet qui met en évidence une relation de cause à effet et utilise les notions de la mécanique pour montrer que le photon a une masse :

« Un mouvement est le résultat d'une force de Newton appliquée sur une masse ; alors si le photon a une masse nulle, il ne peut pas être en mouvement, c'est la raison pour laquelle, je présume qu'il existe une masse photonique. »

D'autres explications justifient la charge du photon du fait de l'émission des électrons (chargés négativement) ne pourrait être que le résultat d'une interaction d'une particule chargée (ici le photon) avec la matière. Ces explications traduisent clairement les

difficultés des sujets à développer une bonne compréhension de la nature quantique de la lumière. Ces résultats attestent l'existence et la persistance des conceptions notées par McKagan et al. (2009) comme la croyance qu'un photon est un objet chargé et une incapacité à donner toute explication reliant des photons à l'effet photoélectrique.

En somme, nous pouvons conclure que malgré une amélioration modérée des conceptions des apprenants au sujet de la lumière, des difficultés concernant la compréhension de la nature quantique de la lumière et du concept de photon persistent encore même après l'apprentissage de l'effet photoélectrique. Ceci peut être dû à la mauvaise compréhension de la nature ondulatoire de la lumière et des différents concepts classiques enseignés antérieurement (onde, amplitude, fréquence, diffraction, interférence, réfraction)

2.2. Conceptions des étudiants sur l'effet photoélectrique et concepts connexes

2.2.1. Conceptions sur l'effet photoélectrique

2.2.1.1. L'effet photoélectrique

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, l'effet photoélectrique, découvert par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz en 1887, reste parmi les phénomènes qui permettent de mettre en évidence la nature corpusculaire de la lumière. Nous nous sommes ainsi inspiré de l'expérience de Hertz pour proposer la question 7 aux sujets dans le but de vérifier à quel point les sujets ont développé une conception scientifique adéquate. Le diagramme (figure 18) met en évidence l'évolution des conceptions des sujets sur l'effet photoélectrique (expérience de Hertz). Le nombre des étudiants qui a la bonne réponse passe de quatre avant enseignement à douze après.

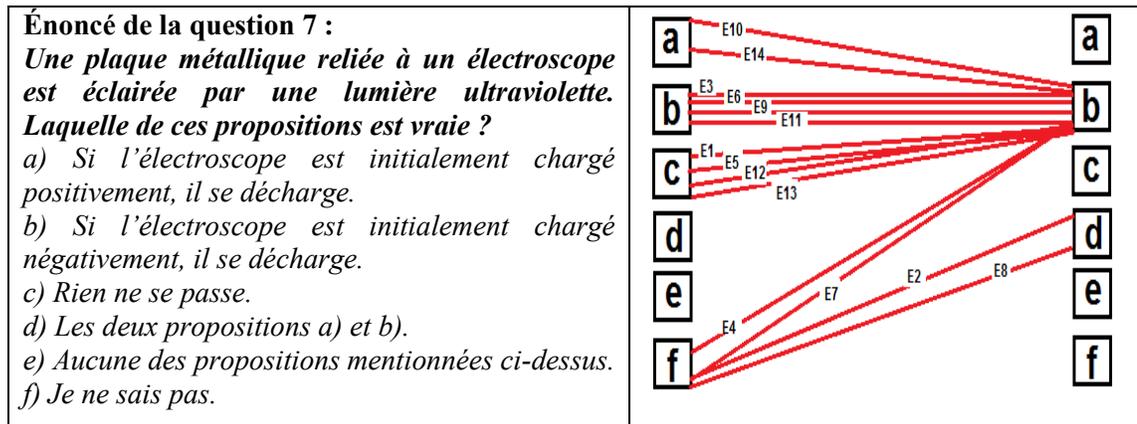


Figure 18. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 7

L'évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée dans le tableau XII; le pourcentage des sujets du groupe contrôle qui a la bonne réponse passe de 20 % à 77 % après enseignement, soit une amélioration de 57 % contre un gain de 57 % chez les sujets du groupe expérimental. On note ainsi les mêmes résultats pour les deux groupes.

Tableau XII. Évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 7)

Groupe	Avant-Après	a	b	c	d	e	f
Contrôle	Prétest	13,3	20	26,7	6,7	0	33,3
	Post-test	0	76,7	3,3	0	3,3	16,7
Expérimental	Prétest	14,29	28,57	28,57	0	0	28,57
	Post-test	0	85,71	0	14,29	0	0

Nous présentons ici spécifiquement les résultats obtenus en entretien et les conceptions que développent les sujets à propos du concept de l'effet photoélectrique.

Un premier regard sur les données indique que douze sujets parmi les quatorze interviewés croient que l'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal sous l'effet de la lumière, comme le montrent les citations suivantes :

E2 : Moi, ce que j'ai compris de l'effet photoélectrique est une lumière qu'on applique à un matériel quelconque et ce qui fait qu'il y a des électrons qu'ils quittent le matériel... c'est ça ce que j'ai compris.

E5 : C'est des électrons qui se sont dégagés d'un corps par exemple un métal comme par l'effet de la lumière c'est ça l'effet photoélectrique pour moi.

E10 : avant, je pense, juste du transfert de l'énergie à partir des ondes. Après l'expérience hier, c'est plutôt certaines fréquences de lumière soit ultraviolette ou autre qui transfère l'énergie sur.....qui permet de libérer les électrons d'un certain matériel.

E11 : D'accord, donc l'effet photoélectrique pour moi c'est lorsqu'un métal reçoit une lumière et perd des électrons sous l'impact d'une énergie. Ça veut dire que l'électron soit extrait, il faut un seuil. Si le photon vient avec cette énergie nécessaire. Puisque cette énergie nécessaire pour le libérer.

E1 : Ah, je dois...ok,...déjà hier que j'ai appris ça l'effet photoélectrique ? Hm, l'effet photoélectrique ? ... Ah. La lumière qui est constituée des photons, tombe (...) sur le métal va donner une énergie aux électrons qui se trouvent dans le métal... et ceux-ci quand ils dépassent une certaine valeur d'énergie ils vont partir du métal

E4 : Bien, c'est finalement l'effet qu'on a de la lumière sur la matière ce que j'ai pu apprendre que la lumière frappe la matière, il y a interaction avec des électrons (émission des électrons) qui peut créer un courant électrique donc effet photoélectrique.

E9 : D'après moi, l'effet photoélectrique est l'émission des électrons sous l'effet de la lumière.

Le sujet E14 fait référence à la fréquence seuil lors de son explication :

E14 : L'effet photoélectrique est une expérience, par exemple si la lumière frappe le zinc et il y a deux théories ondulatoire et corpusculaire... la lumière va exciter les électrons qui se trouvent sur le dernier niveau d'énergie (nuages) électronique, alors ils sont excités ces électrons si une fréquence est supérieure à la fréquence des ultraviolet, il va exciter ces électrons- là...

Nous avons noté une confusion entre l'effet photoélectrique et la création de la lumière chez le sujet E13.

E13 : L'effet photoélectrique, normalement c'est un phénomène qui avec lequel on peut créer la lumière, c'est l'interaction entre le rayonnement plutôt entre les électrons et qu'il va heurter de la matière et crée une excitation et le retour va créer cette lumière.

Cependant, le sujet E3 met en évidence une accumulation de l'énergie ou une saturation du métal irradié lors de son explication de l'effet photoélectrique.

E3 : Bon, l'effet photoélectrique d'après moi et ce que j'ai vu ... Ok, on a une source lumineuse avec une certaine puissance, on a des photons, ça bombardent certaine surface et une fois la surface arrive à une saturation, il va y avoir une extraction de ces électrons vers l'extérieur chose qu'on appelle photoélectron ou effet photoélectrique à condition qu'il y ait une saturation du blocus sur lequel on met la lumière.

Notons également une confusion entre l'énergie lumineuse et calorifique qui apparaît clairement dans les verbalisations du sujet E6. Il nous semble que ce sujet éprouve des difficultés à faire distinction entre l'effet thermoélectronique et l'effet photoélectrique.

E6 : Pour l'effet photoélectrique, c'est qu'on en un n'importe quel métal et après on l'éclaircit que ça soit par la chaleur ou lumière ou n'importe quelle sorte d'énergie, il y a un niveau

d'énergie qui est atteint, il y a un électron qui part de l'état fondamental jusqu'à l'autre état que ça soit l'état $N1$, $N2$, ... jusqu'à l'infini...N'importe quelle sorte d'énergie qui est absorbée par un métal, il y a émission d'électrons.

Le sujet E8 pour,sa part, présume que la présence du circuit électrique est essentielle pour que l'effet photoélectrique ait lieu.

E 8 : L'effet photoélectrique hm c'est l'effet que peut avoir la lumière sur un circuit électrique à savoir le transfert des électrons les protons restent fixes.

Enfin, notons la domination de l'aspect matériel de la lumière chez le sujet E12, lorsqu'il tente d'expliquer l'effet photoélectrique.

E 12 : L'effet photoélectrique est, disons c'est le comportement des molécules lumineuses sur [silence]... c'est le comportement des molécules lumineuses. Soi-disant dans un autre milieu, si on diminue l'intensité lumineuse et l'intensité de l'électricité. Ça dépend de la couleur.

2.2.1.2. Photoélectrons

Au cours de l'effet photoélectrique, il y a émission ou extraction des électrons, par des cristaux sous l'effet d'absorption de photons, appelés photoélectrons. C'est l'objet de la question 10. Le diagramme (figure 19) met en évidence l'évolution des connaissances des sujets sur la notion du photoélectron; le nombre des sujets qui ont la bonne réponse passe de sept avant enseignement à quatorze après; tous les sujets ont la bonne réponse après la séquence d'apprentissage.

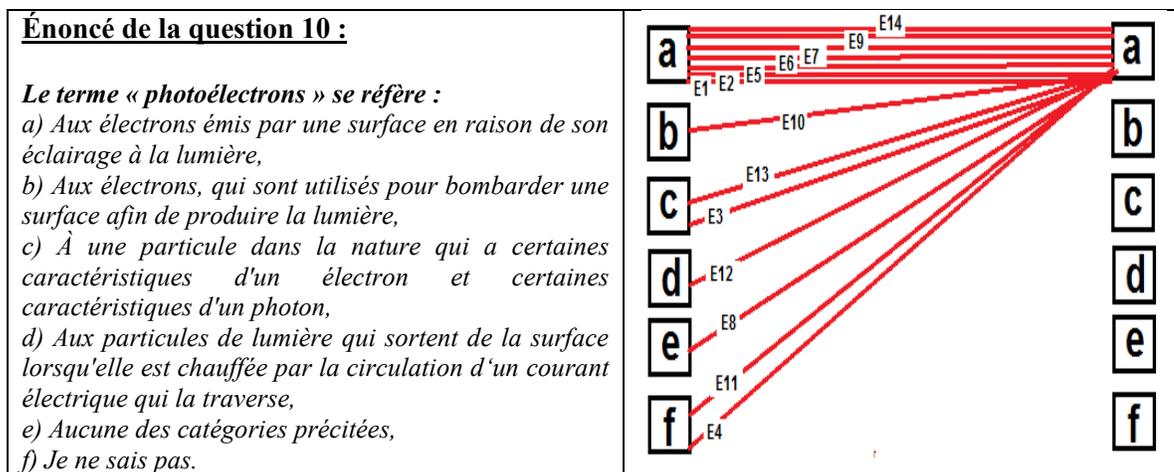


Figure 19. Diagramme des réponses des étudiants du groupe expérimental à la question 10

L'évolution des réponses des élèves du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée par le tableau XIII; Le pourcentage des sujets du

groupe contrôle qui a la bonne réponse passe de 77 % à 50 % après enseignement soit un recul de 27 % contre un gain de 50 % chez les élèves du groupe expérimental. On note ainsi un écart très important entre les résultats des deux groupes.

Tableau XIII. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 10)

Groupe	Avant-Après	a	b	c	d	e	f
Contrôle	Prétest	76,7	13,3	10	0	0	0
	Post-test	50	30	3,3	13,3	0	3,3
Expérimental	Prétest	50	7,14	14,29	7,14	7,14	14,29
	Post-test	100	0	0	0	0	0

2.2.2. Conceptions au sujet des notions connexes à l'effet photoélectrique

2.2.2.1. Effet de la fréquence

a) Effet du changement de la fréquence

a-1. Question 1

Dans l'enseignement de l'effet photoélectrique, on insiste énormément sur l'effet de la fréquence et sur le fait que l'énergie de la lumière incidente dépend linéairement de sa fréquence. Il paraissait donc intéressant de poser la question 1 qui met en évidence la loi d'Einstein. Les réponses peuvent en effet suggérer qu'une augmentation de la valeur de la fréquence de la lumière a pour conséquence soit une augmentation de son amplitude, soit une augmentation de sa vitesse, soit une augmentation de son énergie, soit encore une augmentation de sa longueur d'onde. Les sujets sont invités à choisir une réponse parmi celles proposées. La figure 20 présente l'énoncé de la question, ainsi que les résultats essentiels relatifs au prétest et post-test.

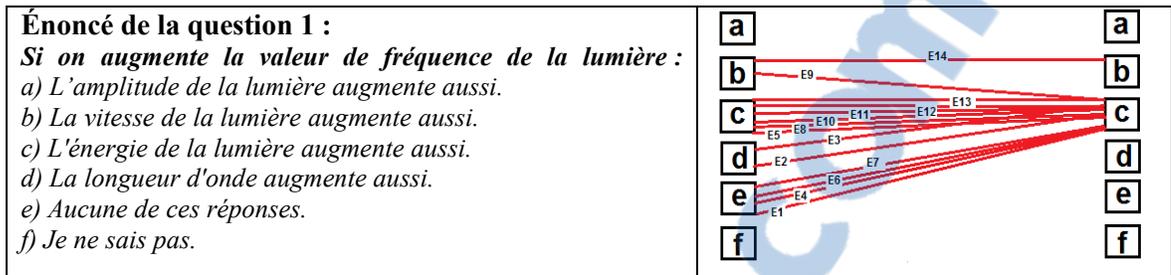


Figure 20. Diagramme des réponses des étudiants à la question 1

Le diagramme met en évidence l'évolution importante des conceptions des sujets sur la loi d'Einstein; six sujets avant enseignement et treize après répondent que l'augmentation de la valeur de la fréquence de la lumière entraîne une augmentation de son énergie. On retiendra donc que la moitié des sujets change de conception, proportion sur laquelle l'enseignement a un effet significatif. Le tableau XIV met en évidence l'évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental. Le pourcentage des sujets du groupe contrôle qui a la bonne réponse passe de 27 % avant enseignement à 40 % après, soit une amélioration de 13 % contre 50 % chez les sujets du groupe expérimental. On note une différence saillante entre les deux groupes.

Tableau XIV. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 1)

Réponse		a	b	c	d	e	f
Gr. control	Prétest	6,7	50	26,7	10	6,7	0
	Post-test	13,3	30	40	6,7	3,3	6,7
Gr. Expérimental	Prétest	0	14,29	42,86	14,29	28,57	0
	Post-test	0	7,14	92,86	0	0	0

a-2. Question 4

Cette question est à lier à la question 1 dans la mesure où elle s'intéresse également à l'effet du changement de la fréquence sur l'effet photoélectrique. Elle met en évidence la relation entre l'augmentation de la valeur de la fréquence et la variation de la quantité des électrons émis. Les sujets sont évidemment invités à choisir une réponse parmi celles proposées.

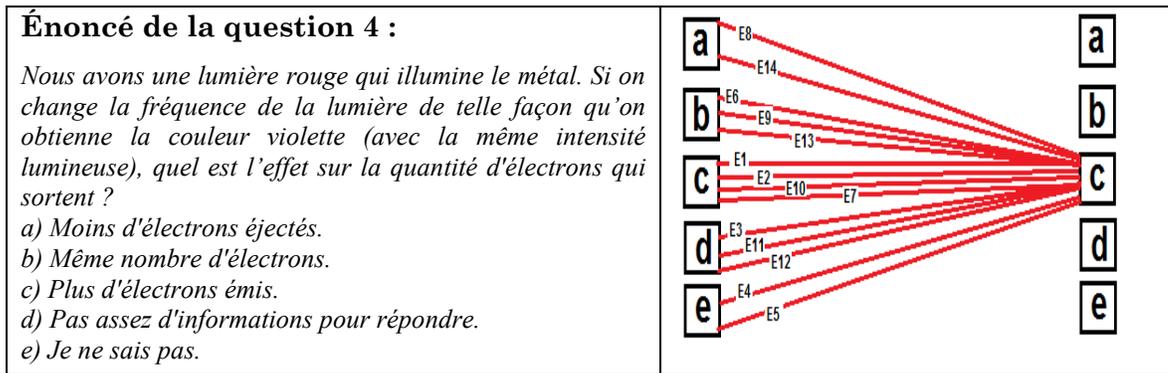


Figure 21. Diagramme des réponses des étudiants à la question 4

Selon le diagramme (figure 21), tous les sujets du groupe expérimental ont la bonne réponse après la séquence d'apprentissage, tandis que seuls quatre sujets ont répondu correctement à cette question avant l'intervention. L'évolution des réponses des sujets du groupe de contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée par le tableau XV; Le pourcentage des sujets du groupe contrôle qui a la bonne réponse passe de 30 % avant enseignement à 33 % après soit un gain de 3 % contre 71 % chez les sujets du groupe expérimental. On note ainsi un écart très important entre les réponses des deux groupes.

Tableau XV. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 4)

Réponse		a	b	c	d	e
Gr. control	Prétest	20	26,7	30	13,3	10
	Post-test	20	20	33,3	16,7	10
Gr. Expérimental	Prétest	14,29	21,43	28,57	21,43	14,29
	Post-test	0	0	100	0	0

Nous nous intéressons principalement à l'effet et au rôle de la fréquence dans le phénomène de l'effet photoélectrique. Nous examinons la relation que font les sujets entre la fréquence et l'énergie. Le sujet E5 indique que la fréquence et l'énergie sont proportionnelles :

E5 : Jusqu'à certains points, ils vont devenir directement proportionnels.

Nous constatons que certains sujets utilisent un raisonnement quantitatif pour expliquer l'effet de la fréquence :

E14 : La fréquence d'après la théorie qu'on sait $E = h \times f$ alors il y a une équivalence entre l'énergie et la fréquence f . alors, quand la fréquence va augmenter, l'énergie augmentera et va exciter plus d'électrons.

Notons également une confusion entre l'énergie cinétique de l'électron et l'énergie de la lumière dans les conceptions de quelques sujets, toujours en utilisant un raisonnement quantitatif :

*E6 : Oui, on sait que la lumière, une équation qui dit $C = \lambda \times f$ et on sait $E_{CG} = 1/2 * mv^2$, alors, la vitesse qui dépend de la longueur d'onde et de la fréquence, on met dans l'autre équation $1/2 * mv^2$ tant qu'il y a plus de vitesse, il y a plus d'énergie ; s'il y a moins de vitesse, il y aura moins d'énergie, il y a moins de fréquence, la fréquence est proportionnelle, Ah...et inversement proportionnelle l'énergie, il y a une plus ou moins, il y a diminution de l'énergie puisqu'il y a diminution de la vitesse aussi ...*

Pour le sujet E12, nous constatons une confusion entre la vitesse des électrons et la vitesse de la lumière :

C : Est-ce que la vitesse de la lumière change ?

E12 : non, ça ne change pas ?

C : donc, comment tu vas expliquer ça ?

E12 : elle est constante, je l'ai confondue avec la vitesse des électrons.

Par ailleurs, nous signalons que l'aspect matérialisé de la lumière influence fortement les explications du sujet E7. Selon lui, plus la lumière a une puissance, plus elle est concentrée.

E7 : En changeant le rouge, la concentration peut varier aussi et oui, en changeant du rouge au violet, on voit une diminution des électrons, diminution du nombre des électrons si on a 2 par exemple, ici il y a 3 ou 4...

Toujours selon E7, l'amplitude varie avec la fréquence :

C : ... Pour la première question, Est-ce qu'il y a une relation entre la fréquence ? Si on augmente la fréquence de la lumière, est-ce que l'énergie va augmenter ? À ton avis quelle est la bonne réponse ?

E7 : montre moi, laisse moi voir, non ici la bonne réponse c'est a).

C : donc c'est l'amplitude qui va changer avec la fréquence

E7 : oui.

Nous enregistrons également des difficultés de compréhension de la notion de la fréquence. En effet, lorsqu'on demande au sujet E2 de définir la notion de la fréquence, il met en relation la fréquence et le spectre de la lumière (lumière visible).

E2 : Mais la fréquence, c'est la lumière. Où est ce qu'on se situe on sait que le spectre est très long. Il y a beaucoup de parties qu'on ne voit pas, il ya seulement certaines parties qu'on voit. Où est-ce qu'on se situe dans ce contexte-là, c'est la fréquence où est-ce qu'on est...

Selon le sujet E4, plus la longueur d'onde diminue, plus il y a l'effet photoélectrique :

E4 : hm, ce que je sais de ça c'est que si la longueur d'onde est petite, il y a des chances d'avoir l'effet photoélectrique, c'est ce que j'ai vu dans l'expérimentation de plus en plus on allait vers le rouge. Il n'y avait plus de l'effet photoélectrique.

Pour le sujet E3, c'est l'accumulation d'énergie au cours du temps qui va provoquer l'émission des électrons :

C : ...Si par exemple, il y a une fréquence qui est très faible je prends par exemple le rouge dans les prédictions, est ce qu'il y aura émission des électrons ?

E3 : À un certain moment, il devrait y avoir, l'objet va s'assurer pour émettre les électrons, mais avec une fréquence plus élevée, il doit faire plus.

C : Quand la fréquence est petite, je vois ici avec le bleu donc vous avez dit non ? Avec le rouge et pas électron ?

E3 : Ok, c'était non et non je l'ai faite en regardant l'écran c'est pour ça...

C : (...) pour ces couleurs il n'y a pas d'émission en rouge ou bleu.

E3 : il n'y a pas d'émission en rouge ... la longueur d'onde de l'ultraviolet comme je vois avec lui ça va être beaucoup plus vite sincèrement; maintenant, je croyais en laissant beaucoup de temps il y a peut-être plus de transfert qui va avoir, est ce qu'il va avoir un transfert résiduel ? Ça je ne sais pas parce que nous, on n'a pas laissé beaucoup de temps on a laissé... mais tu sais on n'a pas regardé 10 min il y avait de délai sur le programme...

Pour le sujet E8, il existe des fréquences où il y a effet photoélectrique et d'autres non :

E8 : d'après les expérimentations; il y avait des fréquences de lumière où il n'y avait pas du transfert. Il fallait que ça se fasse à un certain voltage (tension), il y avait des fréquences où il n'y avait pas de transfert...

Le sujet E9 fait référence à la relation entre la fréquence seuil et l'énergie d'extraction pour expliquer le phénomène :

E9 : Si la fréquence est plus petite de la fréquence seuil, on n'a pas d'effet photoélectrique car il y a une relation avec entre la fréquence seuil et l'énergie d'extraction.

Le sujet E8 a exprimé clairement qu'il ne savait pas que la fréquence a un rôle à jouer :

E8 : je ne savais pas que la fréquence avait un rôle à jouer...

b) Fréquence seuil et nature du métal

b-1. Fréquence seuil

Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée fréquence seuil. Cette fréquence seuil dépend du matériau et est directement liée à l'énergie de liaison des électrons qui peuvent être émis.

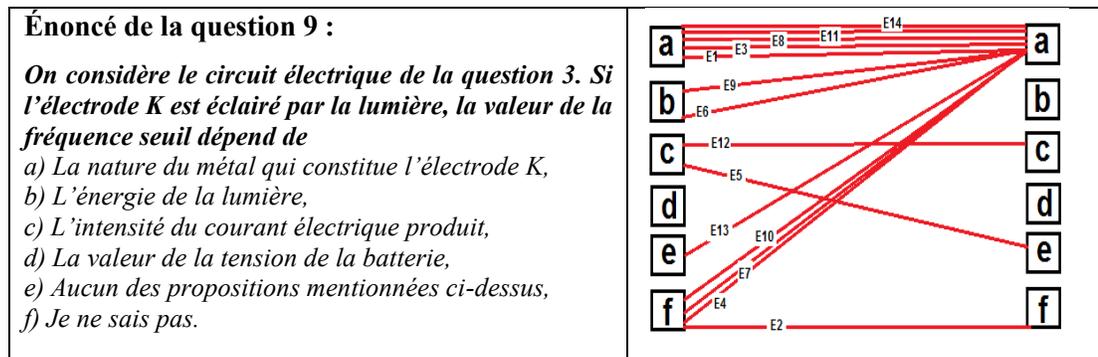


Figure 22. Diagramme des réponses des étudiants à la question 9

Le diagramme 22 met en évidence l'évolution des conceptions des sujets sur la notion de fréquence seuil, le nombre des sujets qui ont la bonne réponse passant de cinq avant enseignement à onze sujets après.

Tableau XVI. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 9)

Groupe	Avant-Après	a	b	c	d	e	f
Contrôle	Prétest	23,3	20	16,7	20	6,7	13,3
	Post-test	43,3	10	13,3	6,7	3,3	23,3
Expérimental	Prétest	35,71	14,29	14,29	0	7,14	28,57
	Post-test	78,57	0	7,14	0	7,14	7,14

Dans les entretiens, nous nous intéressons principalement aux conceptions sur la fréquence seuil que les sujets développent pour parvenir avec le plus d'efficacité possible à répondre aux différentes questions de l'interviewer.

Nous signalons une bonne conception de la fréquence seuil chez les sujets E10 et E9 :

E10 : Mais on a vu que juste à partir d'une certaine fréquence, les électrons traversaient d'une armature à l'autre et puis à 150 nm ça marchait très bien donc UV et 250 nm ça marchait beaucoup moins bien et après ça en dessus de ca 350 nm et plus...

E9 : Hm, Hm, P : On a déjà commencé au début lorsque tu m'as dit que si $f > FS$, il y a émission si $f < FS$, il n'y a pas d'émission.

*C : Comment peux-tu expliquer ça avec l'énergie d'extraction. Est-ce que FS dépend du métal ?
E9 : Ah oui, quand on a fait la comparaison on s'est rendu compte quand on change le métal, la fréquence seuil a changé.*

Le sujet E13 croit que l'émission des électrons dépend de la fréquence sans mettre en évidence la notion de fréquence seuil :

E13 : C'est plutôt dans le domaine du visible.

C : Est ce que n'importe quelle lumière ?

E13 : C'est plutôt quand on s'approche du violet c'est la que peut y avoir l'effet photoélectrique.... Ça c'est d'après la simulation qu'on a fait hier, quand on s'approche du rouge, il n'y a des électrons qui se libèrent des métaux...

C : À votre avis pourquoi ?

E13 : Ça dépend, parce que parmi les caractéristiques de la lumière, il y a la longueur d'onde et la fréquence. Les deux sont reliées donc c'est la fréquence qui joue en rôle très important dans la libération des électrons.

Toujours selon E13, la fréquence seuil a une relation avec le nombre d'électrons de la couche périphérique et pas avec l'énergie de liaison de ces électrons :

C : Je reviens à l'expérience; c'est quoi l'effet de la fréquence tu m'as dit qu'il y a effet photoélectrique à partir d'une certain fréquence, si on utilise le cuivre ou le sodium ou le zinc ?

E13 : Ce n'est pas la même chose, ça diffère.

C : Pourquoi la valeur de la fréquence FS varie en fonction de la nature du métal ?

E13 : Il y a une relation avec le nombre des électrons de la couche externe qui ne sont pas très stables, avec une petite fréquence on peut les extraire. Par contre, pour les métaux les électrons qui sont plus attachés à l'atome, c'est difficile de les expulser.

Pour le sujet E14, la fréquence seuil c'est la fréquence de l'ultraviolet :

C : Donc, pour toi, l'effet photoélectrique est une interaction entre la lumière et la matière ?

E14 : Oui c'est ca.

C : Il y a émission des électrons ?

E14 : Oui, oui

C : Cette émission avec n'importe quelle lumière ?

E14 : Non, je pense que les ultra-violets et ... des fréquences plus grandes que l'ultraviolet.

C : Donc, il y a une fréquence seuil à partir de laquelle il y a effet photoélectrique.

E14 : une fréquence seuil...

Le sujet E10 est incapable de faire une relation entre la fréquence seuil, l'émission des électrons et l'énergie de la lumière :

C : pourquoi on ne peut pas avoir émission des électrons ou effet photoélectrique si la longueur d'onde est supérieure à la longueur d'onde seuil ou si la fréquence est inférieure à la fréquence seuil ?

E10 : Ah, c'est une bonne question parce que ce n'est pas l'énergie parce qu'on savait que si on diminuait la longueur d'onde avec ces fréquences... ça marchait un peu moins bien, mais ça marchait quand même. Donc je ne pense pas que c'est l'énergie qu'on tient dans ce cas, ce n'était pas en fonction de l'énergie, c'est plutôt de la fréquence peut être c'est...

E13 : La fréquence seuil pour qu'il y a une libération des électrons.

E1 : En changeant les fréquences, on a dit que ça.... Après une telle fréquence, il n'y a plus des électrons ou au dessus....

C : Comment on l'appelle ? Est-ce que tu as une idée ?

E1 : Fréquence de libération ou quelque chose comme ça.

C : Fréquence seuil, non ?

E1 : Oui, fréquence seuil, c'est ça ... oui, caractéristique du métal.

C : La fréquence seuil ?

E4 : Ah, la fréquence seuil, la fréquence minimale pour laquelle il y a transfert d'énergie cinétique de la particule à l'électron après ça l'énergie est absorbée, mais elle est dépensée pour détacher les électrons de la matière...

E9 : Ça dépend de la lumière ultraviolette, si la lumière a une fréquence supérieure à une fréquence seuil.

b-2. Énergie d'extraction

L'effet photoélectrique peut être interprété comme une extraction d'électrons de la matière sous l'effet de la lumière. Nous croyons ainsi que la maîtrise du concept de l'énergie d'extraction est essentielle pour la compréhension du phénomène de l'effet photoélectrique. L'objet de la question 2 est d'explorer la signification de l'énergie d'extraction chez les sujets avant et après la séquence d'apprentissage (figure 23).

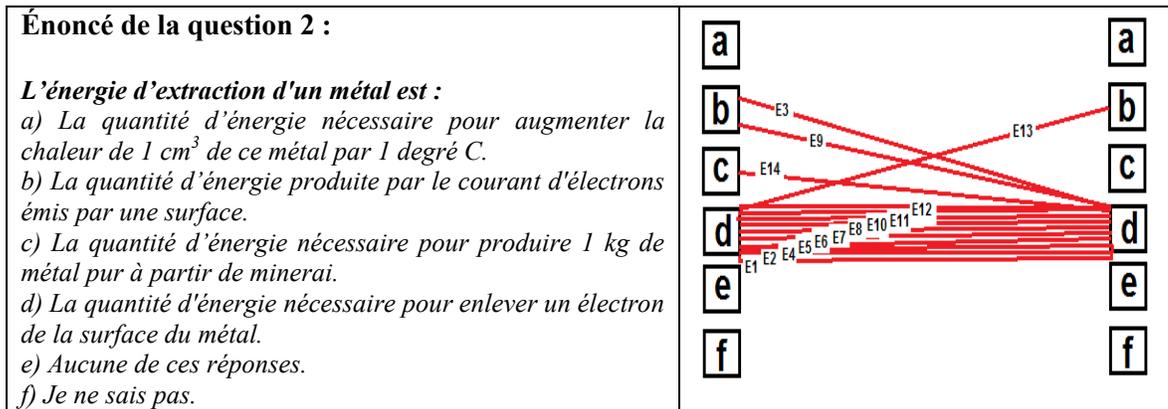


Figure 23. Diagramme des réponses des étudiants à la question 2

Le tableau XVII indique que le nombre des sujets qui affirment que l'énergie d'extraction d'un métal est la quantité d'énergie nécessaire pour enlever un électron de la surface du métal passe de onze à treize, soit deux sujets de plus. Nous pouvons donc estimer que quasiment tous les sujets ont acquis le concept de l'énergie d'extraction après la séquence d'apprentissage.

L'évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celle du groupe expérimental est présentée dans le tableau XVII. Le pourcentage des sujets du groupe contrôle qui a la bonne réponse passe de 50 % avant enseignement à 83 % après, soit une amélioration de 33 % contre 14 % chez les sujets du groupe expérimental. On note ainsi un écart entre les résultats des deux groupes.

Tableau XVII. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 2)

Réponse		a	b	c	d	e	f
Gr. control	Prétest	3,3	6,7	13,3	50	6,7	20
	Post-test	3,3	3,3	6,7	83,3	0	3,3
Gr. Expérimental	Prétest	0	14,29	7,14	78,57	0	0
	Post-test	0	7,14	0	92,86	0	0

Dans les verbalisations de la majorité des sujets, nous avons constaté une bonne interprétation de l'énergie d'extraction. Des sujets expliquent l'énergie d'extraction comme une énergie nécessaire pour extraire des électrons :

E5 : C'est la quantité d'énergie qui sert pour arracher un électron...

E12 : C'est l'énergie capable d'extraire des électrons de l'atome.

D'autres sujets ont utilisé la notion de la fréquence seuil pour définir l'énergie d'extraction :

E14 : Ah ! L'énergie d'extraction c'est h fois la fréquence seuil, c'est la fréquence à partir de laquelle on a le phénomène d'extraction et une énergie cinétique ou bien il y a extraction et pas d'énergie cinétique, c'est-à-dire, il reste à la surface.

E4 : l'énergie d'extraction dépend de la fréquence seuil....

E9 : Pour moi et d'après l'expérience, c'est l'énergie qu'il faut fournir pour arracher un électron de la matière...oui, l'énergie d'extraction est proportionnelle à la fréquence seuil.

E11 exprime que la fréquence seuil dépend de la composition du métal

C : La fréquence FS dépend du métal ?

E11 : Je dis oui... le nombre des électrons... je pense que c'est la composition du métal en termes des électrons... s'il y a différence entre des électrons, il y a changement d'énergie de liaison avec le noyau.

Le sujet E1 indique que l'effet photoélectrique dépend de la nature du métal sans être capable de fournir une explication :

C : quel est l'effet du changement du métal sur l'effet photoélectrique ?

E1 : Ce qu'on a vu hier, c'est non parce que c'est que je me souviens ... mais ça varie par exemple à 450 nm; moi j'ai étudié le cuivre, il n'y a pas l'effet de la lumière. Elle n'a pas donné suffisamment d'énergie pour le cuivre, il n'y a pas d'électrons à 450 nm, mais pour le sodium avec la même lumière (longueur d'onde), on voyait une libération des électrons. On voit que l'effet photoélectrique peut avoir lieu avec des fréquences ou des longueurs d'ondes différentes ... oui, même fréquence interagit différemment avec des métaux différents.

Les sujets E2 et E3 croient que l'effet photoélectrique ne peut pas avoir lieu avec un isolant :

E2 : Non absolument pas ça dépend de la nature du matériel donc de l'effet de la lumière va dépendre du matériel et du fait que c'est un isolant...entre la lumière et la matière.

E3 : Non, je ne pense pas avec le bois car le bois est un isolant...

Le sujet E3 évoque la relation entre la conductibilité et l'effet photoélectrique :

C : ... est ce que le courant électrique obtenu avec le cuivre le même courant obtenu avec le zinc ? Ou bien, il y a une différence ?

E3 : non ... Parce que la structure cristalline de chaque matériel ... comment on appelle comment ça ?... Il y en a certains électrons qui vont être interposés, il y en a qui peuvent être plus facile à arracher et pour ça qu'on n'utilise pas le sodium, il n'y a pas de sodium dedans il va y avoir du cuivre parce que dans le cuivre on peut arracher les électrons beaucoup plus vite.

Donc si on met l'argent, ça serait bien parce que c'est un meilleur conducteur, mais on ne peut pas mettre l'argent dans le fil parce que ça va coûter très cher donc le cuivre est assez facile à extraire.

Notons également une confusion entre force et énergie chez le sujet E7.

E7 : C'est la force nécessaire pour extraire un électron ?

C : c'est une force ou énergie ?

E7 : non, c'est une force, je ne sais pas pourquoi on appelle énergie, mais c'est une force quand même pour extraire les électrons.

Le sujet E2 met en évidence la vitesse de sortie pour expliquer l'énergie d'extraction

E2 : L'énergie des électrons impliqués par la vitesse à laquelle les électrons quittent les plaques sur PDA.

2.2.2.2. Effet de la tension

a) Effet du changement de voltage

Comme nous avons indiqué dans le chapitre 2, Lenard avait utilisé un circuit électrique pour pouvoir analyser l'effet photoélectrique. Nous croyons que la compréhension du fonctionnement de ce circuit est extrêmement importante pour expliquer le phénomène de l'effet photoélectrique.

Le diagramme de la figure 24 montre qu'après la séquence d'apprentissage, quatre sujets du groupe expérimental croient que l'augmentation du voltage entraîne une accélération des électrons, alors que dix sujets présentaient cette même conception avant l'intervention.

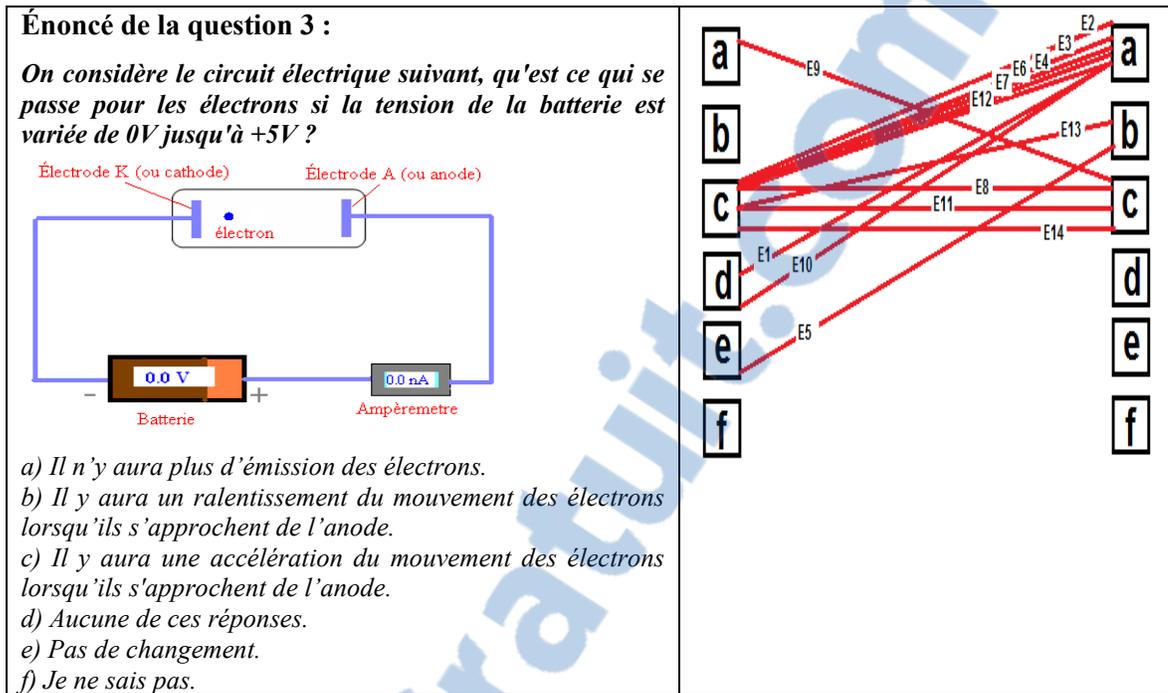


Figure 24. Diagramme des réponses des étudiants à la question 3

L'évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée dans le tableau XVIII; le pourcentage des sujets du groupe de contrôle qui a la bonne réponse passe de 67 % avant enseignement à 27 % après soit un recul de 40 % contre 43 % chez les sujets du groupe expérimental. On note ainsi une dissimilitude entre les résultats des deux groupes.

Tableau XVIII. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 3)

Réponse		a	b	c	d	e	f
Gr. control	Prétest	6,7	6,7	66,7	6,7	6,7	6,7
	Post-test	6,7	56,7	26,7	0	0	10
Gr. Expérimental	Prétest	7,14	0	71,43	14,29	7,14	0
	Post-test	57,14	14,29	28,57	0	0	0

La majorité des sujets indiquent que le voltage permet d'accélérer le mouvement des électrons :

E3 : La tension avait l'effet que les électrons bougent plus vite. La vitesse de transfert d'un point à l'autre a changé en fonction de V.

E13 : La tension, elle va faciliter l'accélération des électrons ...

E14 : On va savoir par exemple s'il y a une relation qui lie le voltage avec la vitesse des électrons par exemple si la vitesse des électrons excités est très grande alors la tension d'arrêt

doit être plus grande. Si l'énergie cinétique est plus petite alors ce voltage est plus petit. On va l'utiliser pour mesurer l'énergie cinétique des électrons...

E9 : Si on change la tension, elle permet aux électrons émis d'arriver à la plaque positive

E8 : J'imagine c'était juste pour pouvoir observer le phénomène. Pour pouvoir accélérer les électrons...

D'autres sujets pensent qu'en plus d'accélérer le mouvement des électrons, une augmentation de la valeur du voltage entraîne une augmentation du nombre des électrons libérés :

E12 : Elle (la tension) a accéléré le mouvement ... ça va augmenter le nombre des électrons

E7 : Je ne dirais pas la direction (des mouvements des électrons), mais pour le nombre et la vitesse aussi par ce que...hier on a varié de $-8V$ à $+8V$ dans certains cas il y a $I=f(v)$ ou... l'autre graphique en tout j'ai oublié, mais je sais que en faisant et varier de $-8V$ à $+8V$. Ça influence la vitesse des électrons aussi... ce n'est pas dans le circuit, mais dans le graphique je ne sais pas exactement la même chose, c'était comme ça, on les voyait se déplaçant de gauche à droite le nombre varie.

Aucun sujet n'était capable d'expliquer pourquoi on obtient un courant nul même si la tension est nulle. Le sujet E5 indique qu'il y a une quantité d'électricité même si la tension est nulle.

C : ...Est ce que tu peux m'expliquer pourquoi ici même si la tension est égale à zéro, il y a un courant électrique ?

E5 : Parce qu'il y a la quantité d'électricité ...je pense qu'elle a comme unité le coulomb, même si sa tension est 0 il y a quand même le courant...

Selon toujours le même sujet E5, si on augmente la tension, l'énergie en eV (l'unité de l'énergie) jusqu'à une certaine valeur, les électrons vont décoller d'une borne l'autre.

E5 : Am c'est la tension qui va comme provoquer une réaction ici si la tension de la batterie....

C : Oui, c'est une réaction de quoi ? De la tension ?

E5 : Oui, c'est ça parce que plus il y a comme la tension plus on ... et comme l'énergie en électronvolt va augmenter puis lorsque l'énergie est assez petite comme en électronvolt nécessaire pour l'extraction...les électrons vont décoller d'un pôle à l'autre...

Notons une mauvaise compréhension de l'eV (l'unité de l'énergie) pour expliquer l'effet du voltage sur l'effet photoélectrique :

E5 : Oui si dans cette partie il n'y a pas de courant oui donc ($-3V, -8V$)

C : Est-ce que tu as une explication, est-ce que tu peux interpréter ces résultats ?

E : Oui ...J'ai une explication...j'essaie de leur ...Hm, je pense que j'aurai une idée, mais je ne suis pas à 100 % sûr ...parce que si on introduit la notion d'électronvolt...et...c'est une autre unité d'énergie à moins une fois il n'est pas assez grand pour produire du courant, il faut fournir

C : Et qui va fournir cette énergie d'électronvolt ? Ça vient d'où ? D'où provient cette énergie ?

E5 : Il faut augmenter la tension je crois.

b) Potentiel d'arrêt

Le potentiel d'arrêt est défini comme la valeur de la tension sous laquelle aucun courant ne passe. Ce sont les électrons les plus énergétiques chassés de la cathode qui atteindront l'anode. Indirectement, donc, le suivi de l'influence de la tension (et par conséquent du potentiel d'arrêt) donne une idée de l'énergie maximale acquise par les électrons. Le potentiel d'arrêt dépend de la fréquence. Si la fréquence du rayonnement est accrue, les électrons arrachés à la matière sont alors expulsés à une plus grande vitesse et celle-ci, en leur donnant une certaine énergie cinétique (pour une vitesse v , l'énergie cinétique est définie comme $m \cdot v^2 / 2$) leur permet de vaincre le freinage dû au potentiel d'arrêt.

Une relation existe entre le potentiel d'arrêt et la vitesse maximale. Elle permet de calculer des vitesses maximales lors de l'arrachage, qui sont de l'ordre de quelques centaines de kilomètres par seconde. Le potentiel d'arrêt peut être considéré comme l'expression directe de l'énergie cinétique maximale des électrons émis par la cathode. Pour tous les métaux, l'inclinaison de la droite, représentant l'énergie maximale en fonction de la fréquence, est la même. La seule différence, d'un métal à un autre, tient dans la fréquence seuil.

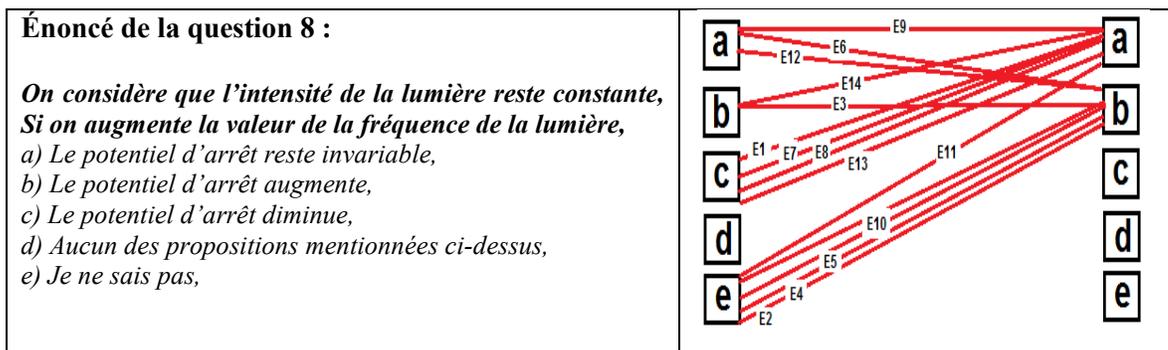


Figure 25. Diagramme des réponses des étudiants à la question 8

Le diagramme de la figure 25 met en évidence l'évolution des conceptions des sujets à propos du potentiel d'arrêt. Le nombre des sujets qui ont la bonne réponse passe de deux

avant enseignement à sept sujets après la séquence d'apprentissage. L'évolution des réponses des sujets du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental est présentée par le tableau XIX; le pourcentage des sujets du groupe contrôle qui a la bonne réponse passe de 20 à 30 % après enseignement soit une amélioration de 10 % contre un gain de 36 % chez les sujets du groupe expérimental. On note ainsi un écart important entre les résultats des deux groupes.

Tableau XIX. Évolution des réponses des étudiants du groupe contrôle en comparaison avec celles du groupe expérimental (Question 3)

Groupe		a	b	c	d	e
Contrôle	Prétest	16,7	20	30	6,7	26,7
	Post-test	16,7	30	13,3	3,3	36,7
Expérimental	Prétest	21,43	14,29	28,57	0	35,71
	Post-test	50	50	0	0	0

2.2.2.3. Discussion

Rappelons que nous avons posé au chapitre 3 la question suivante :

Quelles sont les conceptions présentes chez les étudiants du cégep sur l'effet photoélectrique et concepts connexes avant et après l'enseignement ?

Nous avons enregistré des résultats positifs. En effet, douze sujets interviewés croient que l'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal sous l'effet de la lumière. Les verbalisations des sujets confirment ces résultats. Cependant, nous signalons quelques difficultés qui apparaissent chez trois sujets lors de l'explication du phénomène. Notons ainsi qu'il y a une confusion entre l'effet photoélectrique et la création de la lumière, une confusion entre l'énergie lumineuse et l'énergie calorifique et une mise en évidence de l'accumulation de l'énergie ou de la saturation du métal irradié pour expliquer le phénomène.

Les résultats indiquent également que tous les sujets conçoivent que l'augmentation de la valeur de la fréquence de la lumière entraîne une augmentation de son énergie et que l'émission des électrons dépend de la fréquence de la lumière. Les explications des sujets lors des entrevues affirment bien ces résultats. Nous avons constaté que les sujets tentent d'appuyer leurs explications par un raisonnement quantitatif plus que qualitatif. Nous avons

noté une confusion entre l'énergie cinétique de l'électron et l'énergie de la lumière chez un sujet lors de sa justification. Nous pouvons ainsi faire un bilan positif concernant la compréhension du rôle de la fréquence dans l'effet photoélectrique.

En ce qui a trait à l'effet du changement du métal sur l'effet photoélectrique, les résultats montrent que onze sujets pensent que la valeur de la fréquence seuil dépend de la nature du métal qui constitue l'électrode et que tous les sujets conçoivent l'énergie d'extraction d'un métal comme la quantité d'énergie nécessaire pour enlever un électron de la surface du métal. Dans les verbalisations des sujets, nous avons constaté une bonne interprétation de l'effet du changement du métal, de la fréquence seuil ainsi que de l'énergie d'extraction.

En ce qui concerne l'effet du changement du voltage sur l'effet photoélectrique, les résultats montrent que seul quatre sujets croient que l'augmentation de la tension entraîne une accélération des électrons. Cependant, dans les verbalisations des sujets, nous avons constaté une bonne explication de l'effet du changement du voltage chez la plupart des sujets. Nous avons également enregistré chez les sujets des difficultés telles que :

- une croyance que la loi d'ohm $V = IR$ s'applique à l'expérience photoélectrique;
- une incapacité de faire toute prévision d'un graphique d'intensité électrique en fonction de la tension (I-V) pour l'expérience photoélectrique;
- une inaptitude à interpréter le schéma de circuit (particulièrement pour une tension variable).

Nos résultats confirment les difficultés rapportées par les recherches effectuées par Steinberg et al. (1996) et par McKagan et al. (2009). En somme, nous pouvons faire un bilan positif concernant l'évolution des conceptions chez les étudiants au sujet de l'effet photoélectrique et concepts connexes.

2.3. Récapitulation

Nous avons présenté les résultats suivant les deux catégories choisies de conceptions; la première catégorie met en évidence les conceptions sur la nature de la

lumière; la seconde catégorie rassemble les conceptions sur l'effet phénomène photoélectrique et de concepts connexes.

Les résultats concernant la première catégorie montrent qu'il y a une légère évolution des conceptions des sujets sur la nature quantique de la lumière, ce qui est confirmé par la valeur modérée du gain normalisé moyen d'apprentissage, notée dans la première section ($g = 0.35$). Ceci peut être dû à la mauvaise compréhension de la nature ondulatoire de la lumière et des différents concepts connexes (onde, amplitude, fréquence, diffraction, interférence, réfraction).

En ce qui a trait à la deuxième catégorie, les résultats montrent qu'il y a une évolution des conceptions des sujets sur l'effet du phénomène photoélectrique et des concepts connexes, ce qui est confirmé par la valeur modérée du gain normalisé moyen d'apprentissage, notée dans la première section ($g = 0.62$). Nous pouvons dire que l'évolution des conceptions est beaucoup plus marquante pour la deuxième catégorie que pour la première.

Cependant, des difficultés concernant la compréhension de la nature quantique de la lumière et le concept de photon persistent encore même après l'apprentissage de l'effet photoélectrique. Ceci peut s'expliquer par le fait que les sujets arrivent en classe avec déjà un manque de compréhension des différents concepts et phénomènes de la physique classique, notamment la nature ondulatoire de la lumière et des différents concepts connexes : onde, amplitude, fréquence, diffraction, interférence, réfraction; ils rencontrent alors d'autant plus de difficultés à expliquer les résultats de l'effet photoélectrique en utilisant le modèle quantique de la lumière.

Notons également d'autres conceptions des sujets qui peuvent influencer la compréhension des nouveaux termes quantiques comme par exemple les conceptions sur la nature des théories scientifiques. Les sujets semblent croire que les contenus scientifiques qu'ils ont appris par le passé sont « scientifiquement corrects » et considèrent les connaissances scientifiques comme statiques et universellement valides (Alanis et al. 2003). Plusieurs recherches rapportent une confusion des concepts quantiques et classiques où sont

mélangés les aspects classiques et quantiques (Alanis et al. 2003). Selon Tabler (2002), bien que les sujets adoptent aisément les nouveaux termes, comme photon ou quantum par exemple, ces termes ne sont intégrés que superficiellement. De plus, Machhad (1996) rapporte que les sujets ont incorporé les nouveaux phénomènes quantiques dans les conceptions de la mécanique classique.

Nous avons également identifié d'autres difficultés rencontrées par les sujets lors de l'apprentissage de l'effet photoélectrique, par exemple la difficulté de faire les liens entre les notions ou la difficulté d'analyser les graphiques comme le montre les verbalisations suivantes :

E5 : C'est vraiment de faire le lien entre les notions, c'est ça le plus difficile...

C : Le lien entre les notions ?

E5 : Ah, c'est que j'ai trouvé c'est que...par exemple comme dans le circuit comme celui-ci; il faut qu'on trouve le lien pour voir l'effet photoélectrique... parce que je sais que par exemple le voltage permet d'accélérer les électrons... Et qui aura comme et par la suite il y aura une intensité. C'est ça je le vois comme associé juste deux choses en même temps s'il ya plusieurs éléments par exemple le voltage que ...puis si on met tout ça ensemble là je peux être un peu mêlé parce que les connaissances que moi je reçois, je les conçois d'une façon séparée...

E4 : Moi je n'ai pas trouvé ça difficile, j'ai peut-être des problèmes au niveau de l'analyse des codes, des images et des graphiques. Les concepts en soi, je les ai bien compris, le problème pour les gens que j'ai travaillé avec c'est dans l'analyse des données peut être un peu mélangeant...le moment où on a l'application de la tension du circuit pour pouvoir comprendre l'effet photoélectrique. Ça, j'ai de la misère à comprendre car je l'ai considéré comme un circuit fermé, mais ce n'est pas le cas je suis un peu mélangeant dans ce côté-là. .. Je n'ai pas compris que le vide est un isolant en tout cas. J'aurai compris que ce n'est pas un circuit fermé. C'est plus un condensateur qu'un circuit fermé.

3. Processus d'apprentissage

Dans la présente section, nous essayons d'examiner le rôle des différentes composantes de notre expérimentation, à savoir la collaboration, la simulation et l'usage des dispositifs mobiles dans l'apprentissage de l'effet photoélectrique. Nous avons adopté ici trois niveaux d'analyse relativement artificiels, soit les rôles de la collaboration, du simulateur et de la mobilité, pour exposer les résultats, tant il est difficile de les distinguer l'un de l'autre au sein du même processus d'apprentissage.

3.1. Observation du contexte et déroulement de l'expérimentation

Au début de la séance, chaque sujet est invité à passer un prétest en répondant individuellement à un questionnaire de 10 questions à choix multiples. Ultérieurement, l'enseignant présente un rappel théorique sur les fondements de la physique classique qui considère la lumière comme une onde électromagnétique; il présente ensuite deux petites vidéos sur l'expérience d'Hertz et invite les sujets à commenter et à expliquer ce qu'ils observent. Enfin, il distribue aux sujets le document qui présente la situation d'apprentissage et d'évaluation (Annexe III). Les sujets lisent le document et essaient d'identifier la situation problème.

L'expérimentation s'est déroulée en deux grandes phases : une première phase où le sujet est appelé à faire des prévisions, manipuler et discuter pour formuler une explication de l'effet photoélectrique, et une deuxième phase de mise en commun pour explorer un modèle plus complet sur la nature de la lumière et pour exploiter la mobilité des sujets.

Dans la première phase de l'expérimentation, l'enseignant demande aux apprenants de former des équipes de trois sujets, une pour chaque métal (Cu = cuivre, Na = sodium et Zn = zinc). Rappelons que la composition des équipes est primordiale pour le succès de l'apprentissage collaboratif. La formation des équipes est basée sur les scores obtenus en prétest. Nous avons choisi les équipes de telle façon que les valeurs moyennes des scores au prétest soient comparables. Pour assurer des interactions efficaces, nous avons veillé à ce que les équipes soient hétérogènes en nous basant sur leur rendement au prétest. Le tableau XX décrit les caractéristiques des composantes des dix équipes. Chaque équipe est invitée à faire des prévisions des résultats attendus lorsqu'on fait varier un des facteurs influençant l'effet photoélectrique (la tension, l'intensité ou la fréquence de la lumière). Ensuite, chaque membre doit faire individuellement des manipulations en utilisant la simulation sur l'ordinateur de poche pour vérifier ses prévisions. Ultérieurement, chaque sujet expose ses résultats aux autres membres de son équipe. À travers une discussion, les membres de l'équipe essaient de trouver une explication préliminaire.

Tableau XX. Caractéristiques et membres des équipes formées

	Phase I			Mise en commun		
J1	Equipe	Membres	Valeur moyenne des scores au Prétest	Equipe	Membres	Valeur moyenne des scores au Prétest
	Na	E1, E3 et E5	33,5	MC1	E4, E5 et E9	27
	Cu	E2, E8 et E9	37	MC2	E1, E2 et E6	40
	Zn	E4, E6 et E7	37	MC3	E3, E7 et E8	40
J2	Cu1	E10, E11 et E14	40	MC4	E10, E11 et E13	40
	Na1	E12 et E13	35	MC5	E12 et E14	35

Dans une deuxième phase de l'expérimentation, soit celle de la mise en commun, les élèves sont invités à changer d'équipe tout en formant trois nouvelles équipes; la nouvelle équipe doit être constituée de trois apprenants qui ont travaillé chacun sur un métal différent. L'objectif est d'explorer l'effet de changement du métal sur les résultats. Chaque équipe doit élaborer un modèle explicatif de l'effet photoélectrique à travers des discussions et des négociations.

Enfin, chaque sujet doit répondre individuellement à un questionnaire de 10 questions à choix multiples (post-test).

3.1.1. Durée des activités

Nous avons enregistré toutes les actions de tous les sujets. Nous avons ainsi un corpus constitué de dix séquences vidéos dont cinq vidéos correspondent aux enregistrements des cinq équipes pour la première phase, d'une durée totale de 10 heures 50 minutes, et cinq autres vidéos pour la phase de la mise en commun d'une durée totale de 3 heures 20 minutes. Le volume horaire total des enregistrements est de 14 heures et 10 minutes.

Le résultat peut être interprété en tenant compte que l'équipe Zn n'était pas homogène; nous avons remarqué un membre qui n'a pas participé activement avec les deux autres, et les autres membres n'ont pas pris le temps nécessaire pour lire la situation d'apprentissage parce qu'ils voulaient terminer le plus vite possible. Pour les membres de l'équipe Cu1, même si l'équipe n'était pas homogène, les membres se sont engagés d'une

manière rigoureuse dans des discussions et des explications pour trouver des consensus avant de passer à l'étape qui suit.

Tableau XXI. Temps prévu et temps effectif moyen pour chacune des activités proposées

	Activités	Temps prévu (mn)	Temps effectif moyen (mn)
	Prétest	20	20
	Rappel théoriques	20	26mn12s
Phase I	Formation des groupes	5	5
	Prédictions	45	44mn 19s
	Simulation sur PDA, Discussion (résolution du conflit) et Rédaction (rapport préliminaire)	90	73mn 15s
MC	Changement du groupe	5	8 mn23s
	Mise en commun et Rédaction du rapport final	40	48 mn20s
	Post-test	15	15 mn
Durée totale		240	240 mn29s

Le logiciel MORAE nous a permis d'analyser les tâches effectuées durant l'expérimentation en nous fournissant la durée de chaque tâche. Le tableau XXI indique le temps prévu et le temps effectif moyen pour chacune des activités proposées. Nous remarquons tout d'abord que le temps effectif moyen pour l'ensemble de l'activité est pratiquement égal au temps prévu. Notons également que les sujets ont mis un peu plus de temps dans l'étape des rappels théoriques; en effet, les sujets se sont attardés légèrement dans la lecture de la situation d'apprentissage et d'évaluation (Annexe III) pour bien cerner la situation problème. De même, nous avons remarqué que la durée effective pour les manipulations sur simulations, les discussions pour la résolution du conflit et la rédaction du rapport préliminaire ont été un peu moins élevées que prévu. Enfin, nous avons noté les mêmes valeurs respectivement du temps effectif moyen et du temps prévu pour les autres étapes.

La figure 26 montre le temps effectif pour toutes les équipes et pour les deux phases de l'expérimentation. Concernant la première étape, l'équipe Cu1 enregistre le temps effectif le plus élevé (2 heures 23 minutes 5 secondes), tandis que l'équipe Zn marque le temps effectif le moins élevé (1 heure 48 minutes 1 seconde). Les trois autres équipes ont

pratiquement la même valeur de temps effectif (2 heures 11 minutes). Rappelons que le temps moyen effectif de la première phase est de 2 heures 8 minutes et 54 secondes.

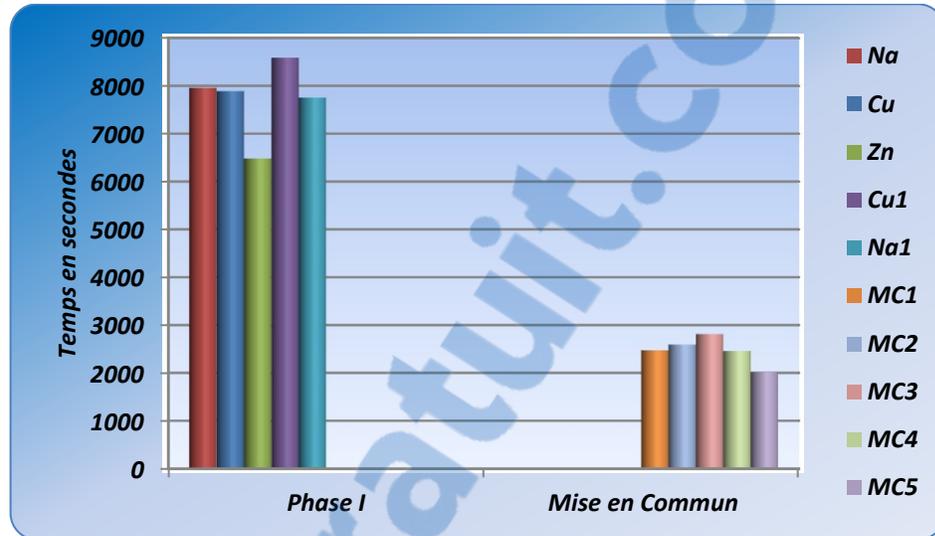


Figure 26. Temps effectif par équipe et par phase

La figure 27 montre la variation du gain normalisé moyen en fonction du temps effectif pour chaque équipe. Rappelons que le gain normalisé (ou le facteur de Hake) désigne le rapport du gain conceptuel brut obtenu par rapport au gain maximal. Nous constatons ainsi une relation presque linéaire entre la durée réelle pour la première phase (prévisions, manipulations et formulation d'une explication préliminaire) et le gain normalisé moyen pour chaque équipe. Nous enregistrons un coefficient de corrélation non paramétrique de Spearman de l'ordre de 1,00 avec une signification de 0,00 ($<0,05$) (voir tableau XXII)

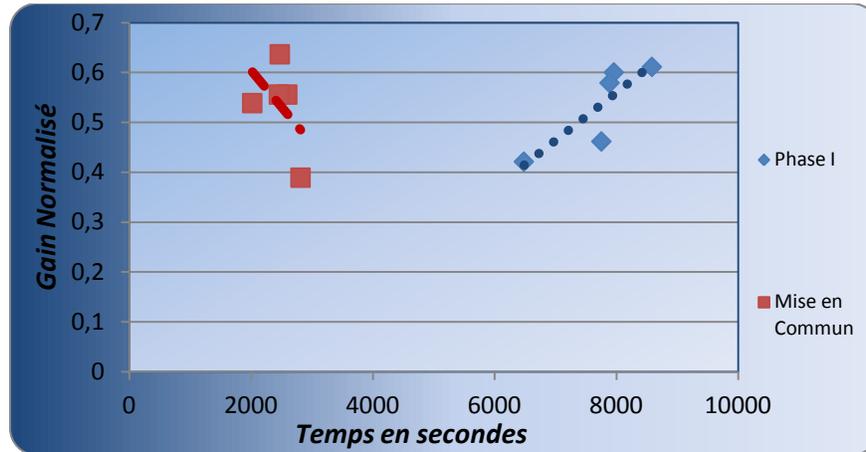


Figure 27. Évolution du gain normalisé moyen en fonction du temps effectif pour chaque équipe

En ce qui a trait à la seconde phase, celle de mise en commun, l'équipe MC3 enregistre le temps effectif le plus élevé (46 minutes 52 secondes) avec un gain normalisé de 0,39, tandis que l'équipe MC5 marque le temps effectif le moins élevé (33 minutes 39 secondes) avec un gain normalisé moyen de 0.54. Les équipes MC1, MC2 et MC4 ont des valeurs très proches du temps effectif (respectivement : 41 minutes 12 secondes, 43 minutes 13 secondes et 40 minutes 58 secondes). Rappelons que le temps moyen effectif de la deuxième phase est de 41 minutes et 11 secondes. Il nous paraît assez difficile de conclure à l'existence d'une relation de dépendance entre le temps effectif et le gain normalisé moyen au cours de la phase de mise en commun.

Tableau XXII. Corrélations non paramétriques de Spearman entre le gain normalisé et le temps effectif pour chaque phase

		Temps (Phase I)	Temps (Phase de Mise en commun)
Gain normalisé	Coefficient de corrélation (Rho de Spearman)	1,000**	-,205
	Sigg. (unilatérale)	0,00	0,740
	N	5	5

** La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

3.1.2. Temps moyen pour chaque tâche

La figure 28 indique le temps effectif pour toutes les tâches effectuées au cours de l'expérimentation et montre trois étapes distinctes qui ont occupé plus de temps par rapport

aux autres activités. L'étape de simulation (S25) a occupé 35 % de la durée moyenne totale contre 25 % pour l'étape de simulation (P24) et 21 % pour la mise en commun (MC28 et MC26-2).

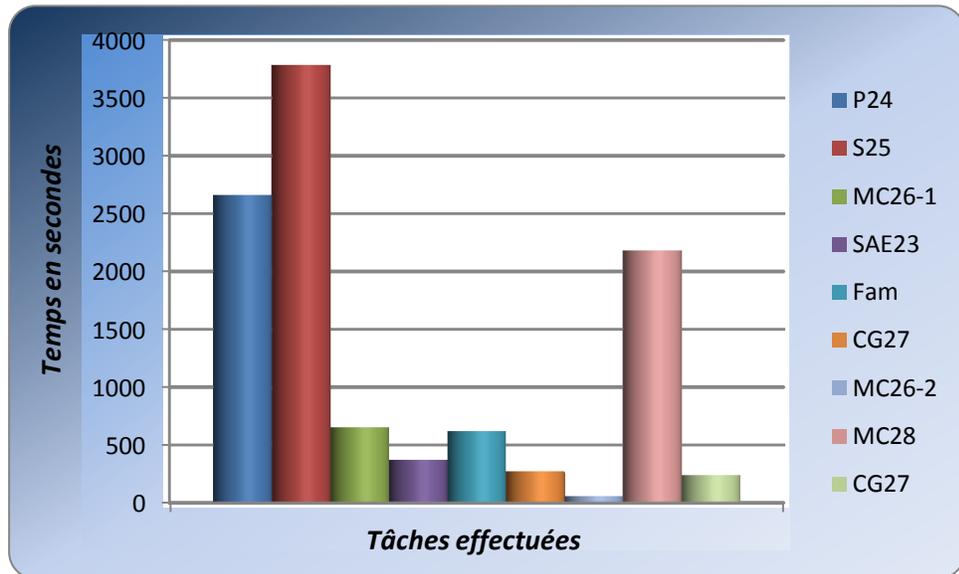


Figure 28. Temps effectif par tâche

Pour explorer les relations de dépendance entre le gain normalisé moyen et le temps employé par tâche, nous avons calculé les coefficients de corrélations non paramétriques de Spearman (tableau XXIII). Les résultats montrent que le gain normalisé moyen ne dépend que du temps effectif de la tâche des prédictions (P24). Nous enregistrons un coefficient de corrélations de 0,9 avec une signification de 0.037 (<0,05).

Tableau XXIII. Corrélations non paramétriques de Spearman

		P24	S25	MC261	SAE23	Fam	MC28
Gain normalisé	Coefficient de corrélation	,900	-,100	-,700	,700	,800	,300
	Sig. (bilatérale)	,037	,873	,188	,188	,104	,624

** . La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Dans ce qui suit, nous présentons les trois grandes étapes majeures de l'expérimentation en tentant de mettre en évidence le rôle respectif de la simulation, de la collaboration et de la mobilité.

3.2. Rôle du simulateur sur PDA

3.2. 1. Prévisions : Mise en scène d'un conflit cognitif

Pour créer une situation de conflit cognitif, nous proposons d'abord aux équipes de faire des prévisions en se basant sur un document à remplir (Voir Annexe IV) avant l'utilisation de la simulation. Le document intitulé « prévisions avant simulation » est constitué des questions qui visent à prédire l'effet du changement des trois paramètres sur l'émission des électrons, soit la fréquence, la puissance et le voltage.

Dans les premières prévisions (P-1, P-2 et P-5, voir Annexe IV), nous avons proposé trois types de lumières avec la même puissance : ultraviolette, bleue et rouge, et nous demandons aux sujets de prévoir l'effet de la fréquence lumineuse sur l'émission des électrons; les cinq équipes expriment l'idée que le changement de la fréquence n'a pas d'influence sur l'émission des électrons. Selon leurs justifications, l'émission des électrons dépend de l'intensité lumineuse et non pas de la fréquence de la lumière.

La prévision P-4 traite l'effet de l'intensité lumineuse; cette fois-ci, nous fixons la fréquence et nous varions l'intensité lumineuse. Toutes les équipes croient que l'émission des électrons dépend fortement de l'intensité (puissance) lumineuse et plus on augmente la puissance lumineuse, plus la probabilité d'obtenir l'effet photoélectrique indépendamment de la fréquence lumineuse est grande.

En ce qui concerne la prévision P-3, nous proposons le circuit utilisé par Lenard (circuit de base pour le simulateur que les sujets vont manipuler ultérieurement) pour étudier l'effet photoélectrique; nous demandons aux sujets de faire leurs prévisions sur l'évolution de l'intensité du courant électrique produit lorsqu'on varie le voltage. Nous leur avons proposé plusieurs graphiques qui présentent l'intensité du courant en fonction de la tension, les équipes étant invitées à choisir une courbe parmi les cinq courbes. Toutes les équipes ont choisi le graphique où l'intensité du courant est proportionnelle au voltage appliqué. Dans leurs justifications, les sujets font référence à la loi d'Ohm :

E11 : Si j'augmente la tension, avec la loi d'ohm on augmente l'intensité du courant.

E5 : Ça c'est ...mais comme ça ce n'est pas vraiment la bonne réponse, on a juste fait une supposition avant l'expérience ... Parce qu'au début on a pensé vraiment d'une façon très restreinte c'est que ça ne se peut pas qu'il y a une intensité s'il n'y a pas un voltage, c'est ça qu'on pensait avant de faire l'expérience.

E4 : Ha, c'est qu'on sait depuis longtemps, on n'a pas trouvé d'argument valable pour l'un ou l'autre des cas on a dit, bon c'est c) le courant est proportionnel donc... Comme référence à la loi d'Ohm ...Oui, l'intensité est proportionnelle au nombre des électrons, on se dit bon ça se peut qu'il y a une droite proportionnelle.

Les prévisions (P-6, P-7 et P- 8) traitent la relation entre la fréquence de la lumière et l'énergie cinétique des électrons émis. Les équipes sont invitées à faire des prédictions sur l'énergie cinétique lorsqu'on change la fréquence lumineuse. Toutes les équipes ne voient pas l'existence d'une relation entre l'énergie cinétique et la fréquence.

En somme, et comme nous le prévoyions, tous les sujets croient que la fréquence n'a pas d'effet sur l'émission des électrons, sur la fréquence, et que l'intensité (puissance) de la lumière est responsable de l'émission des électrons. Concernant l'effet du voltage, tous les sujets raisonnent souvent explicitement ou implicitement à partir de la relation $U = RI$ (la loi d'Ohm).

Pendant cette activité de prédictions, les sujets ont eu plusieurs fois recours aux documents théoriques remis. Ils ont discuté longtemps au début de l'activité avant de commencer à faire la première prévision, le temps de prise de parole étant relativement équilibré entre les membres de chaque équipe. Cependant, nous avons remarqué, dans chaque équipe, un « leader » qui prenait l'initiative de régler les conflits lors de la discussion et à qui les autres demandaient souvent de l'aide. Nous avons observé un engagement de la part des sujets durant cette tâche des prévisions. La figure 29 montre que le gain normalisé de chaque équipe dépend fortement de la durée moyenne de l'étape pour faire leurs prévisions. Rappelons que nous avons enregistré la valeur du coefficient de corrélation de Spearman entre le gain et la durée des prévisions est de 0.9 avec une signification de 0.037 (<0.05). Ceci peut être expliqué par un engagement cognitif de la part des sujets.

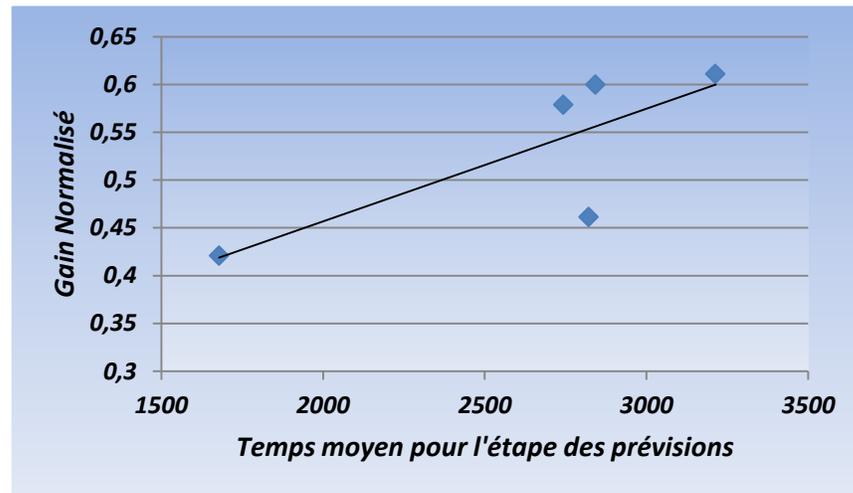


Figure 29. Gain normalisé en fonction de la durée moyenne des prévisions

3.2.2. Manipulation du Simulateur sur PDA

3.2.2.1. Manipuler pour explorer le modèle quantique de la lumière

Roschelle et al. (2000) ont rapporté qu'un sujet actif, qui agit avec et sur l'objet d'apprentissage, apprend davantage efficacement et profondément qu'un apprenant simplement receveur d'informations. En ce sens, dans cette étape de simulation, les sujets devraient manipuler pour vérifier leurs prévisions. La simulation nous fournit l'occasion de manipuler et rend l'apprenant actif; elle encourage les sujets à explorer et interagir avec le système en incluant des éléments réel ou virtuel, à changer les paramètres et à observer le résultat de cette manipulation (Roschelle et al, 2000). Avec l'aide de l'enseignant, agissant comme guide, le sujet développera des stratégies de résolution de problèmes et devra opérer ses manipulations afin de confirmer ou d'infirmer ses hypothèses (Chomsky, 2003).

Nous présentons ici les résultats de la grille complétée par les sujets (Annexe VIII), concernant la question qui porte sur le rôle de la simulation sur le PDA dans leur apprentissage. Les sujets sont invités à répondre à la question sur une échelle de Ickert à 5 niveaux : « 1. Complètement d'accord, 2. D'accord, 3. Pas d'accord, 4. Pas du tout d'accord, 5. Sans objet ». Nous avons regroupé les réponses en trois catégories :

« 1. Accord, 2. Désaccord, 3. sans objet » dans le but de faciliter l'interprétation des résultats. Ces résultats sont complétés par l'analyse de cette question dans les entrevues.

Tableau XXIV. Résultats des réponses à la troisième question du questionnaire (Annexe VIII)

La simulation sur le PDA m'a permis de :	D'accord	Pas D'accord	Sans Objet
Mieux comprendre le phénomène de l'effet photoélectrique,	14	0	0
Visualiser le phénomène de l'effet photoélectrique,	14	0	0
Chercher des informations	8	6	0
Construire de connaissances	10	4	0
Manipuler les différentes notions théoriques (tension, intensité du courant électrique, puissance lumineuse, fréquence)	12	2	0
Générer un conflit cognitif	9	5	0
Réduire le temps requis pour effectuer la tâche demandée	10	4	0
Vérifier mes hypothèses et mes prédictions	12	0	2

Les résultats (tableau XXIV) montrent que douze participants disent que la simulation sur le PDA leur a permis de manipuler les différentes notions théoriques (tension, intensité du courant électrique, puissance lumineuse, fréquence) et de vérifier leurs hypothèses et leurs prédictions comme le témoignent les verbalisations suivantes :

E11 : C'est sûr que non seulement tu vas retenir plus facilement parce que toi qui as manipulé, tu as vu que ce n'est pas quelqu'un qui veut te dire : « Ah aujourd'hui il est important de retenir telle ou telle notion »... Voilà tu participes activement ... On retient ce qui nous intéresse, on comprend beaucoup plutôt qu'on nous force à absorber ou retenir quelque chose ... Ah oui, la simulation était vraiment importante parce qu'elle a permis de justifier nos bonnes réponses et de nous éclairer sur des nouvelles réponses, ça veut dire on a vu tout...

E13 : Oui, s'il y a plusieurs variables on fixe les variables et on change une variable on va faire plusieurs expériences de telle sorte qu'on va trouver la vraie variable qu'on veut vraiment changer.

E2 : Oui, ça aide malgré qu'il y a toujours des améliorations à faire, mais oui effectivementComme je vous le dit à chaque fois vous changez la technique que vous utilisez pour transmettre l'information ça aide à quelque chose c'est absolument certain que vous allez chercher quelqu'un d'autre.

E12 : On peut mesurer nous-mêmes en changeant nous-mêmes les paramètres on voit l'évolution des particules des molécules qui viennent de la lumière... C'est positif, c'est même très positif, on va même manipuler en diminuant dans les conditions. Si on nous explique quelque chose on oublie facilement, mais avec l'expérience c'est nous même qui ont fait l'expérience donc on n'oublie jamais.

E1 : Moi, je préfère la simulation et j'aime beaucoup le domaine. Est-ce que je crois que ça aide ? Vous voyez que lorsque tout le cours est bien expliqué sur le Powerpoint on comprend on ne retient pas ... on n'a pas l'occasion d'utiliser le PDA et travailler avec et on peut les assimiler parce que on comprend sans problème qu'est-ce que se passe par l'intermédiaire d'un appareil

d'un logiciel, je ne sais pas, mais toujours c'est bien meilleur que l'expérience car un.... tu es plus.

E6 : Oui, comme si au lieu de voir un vidéo, on peut manipuler aussi Et surtout les résultats

E7 : oui moi ça m'a beaucoup aidé à vérifier nos résultats et tout ça

3.2.2.2. Visualisation du phénomène

La seconde fonction que la simulation nous offre est la visualisation du phénomène, puisque les représentations non langagières sont très efficaces pour favoriser l'apprentissage (Chomsky, 2003). Les simulations sont donc très intéressantes, puisqu'elles sont très visuelles et qu'elles multiplient les formes de représentations (Chomsky, 2003); les simulations permettent d'obtenir plus d'une représentation d'un concept à la fois et d'établir des liens entre ces représentations, en reproduisant simultanément graphiques, formules, symboles et images. Par ailleurs, la visualisation des graphiques permet au sujet d'analyser les données et développe davantage son esprit critique (Rochelle et al. 2000).

Les résultats (tableau XXIV) mettent en évidence que la simulation sur le PDA a permis à tous les participants de visualiser le phénomène et de mieux comprendre l'effet photoélectrique comme l'illustrent les verbalisations suivantes :

E7 : Oui, le fait de voir les électrons, les graphiques c'était vraiment encore plus visuel...en temps réel...C'est comme la première fois lorsque j'ai appris les électrons et les protons. Je me rappelle, je ne savais pas même c'était quoi et bien en utilisant le PDA et en montrant les électrons m'a vraiment aider à comprendre.

E14 : Oui, on comprend facilement avec la simulation... Parce que tu vois tout le phénomène devant toi tu n'as pas besoin de penser comme ça ou comme ça...oui, c'est la visualisation ; elle facilite de retenir facilement l'information par exemple l'effet de la puissance lumineuse sur les électrons, tu ne vas pas oublier ça facilement durant ta vie. Si tu vas étudier sans faire des expériences comme ça (avec simulation) la puissance qui va augmenter l'intensité du courant tu vas vite oublier ça.

E11 : ...C'est mieux même si le prof s'arrêtait là et puis dit quelque chose, on n'est plus réconforté que lorsqu'on visualise ces notions c'est une très bonne idée de choisir une simulation.

3.2.2.3. Réduire le temps requis pour effectuer la tâche demandée

Pour vérifier leurs prévisions, les sujets sont invités à faire trois expérimentations et à tracer trois graphiques pour expliquer le phénomène. Ces manipulations peuvent prendre beaucoup plus de temps sans simulation. La majorité des sujets disent que la simulation

réduit considérablement le temps pour compléter les différentes tâches et permet une rétroaction instantanée :

E11 : Bien sûr, ça peut réduire considérablement le temps. Bien que le prof a un programme à tenir. Comme ça c'est bien de faire ce qu'on a fait la dernière fois avec le PDA.

E6 : Ça aide à faire comprendre le fait de tracer les graphiques à la main ou sur Excel ça serait mieux, mais ça prend plus de temps si on trouve un résultat erroné, on peut rectifier, mais sur une expérience réelle, on ne peut pas...

E4 : hm... sûrement, ça va réduire le temps si on compare la simulation avec l'expérience réelle. Il y a beaucoup de choses à manipuler...

E12 : Non ça va prendre beaucoup de temps en réel qu'à la simulation

La réalité des classes d'aujourd'hui ne permet pas toujours à l'étudiant de recommencer immédiatement l'expérience sans se décourager, faire le retraçage des graphiques à la main ou de refaire un montage. L'utilisation d'une simulation peut remédier à cette situation en permettant une rétroaction instantanée et en effectuant des « aller-retour » entre les trois graphiques pour formuler une explication globale.

3.2.2.4. Construire des connaissances

La simulation peut créer des situations permettant aux apprenants de tester, d'évaluer et de reconstruire leur propre savoir sur des notions et des concepts sur l'effet photoélectrique, comme l'indique les verbalisations suivantes :

E8 : Il y a simulation, peut-être plus automatique d'avoir des résultats... peut-être technologiquement dans un monde virtuel, on peut aller chercher des éléments puis construire notre modèle, le mettre en action puis voir les effets avec...

E5 : On peut négocier des choses qui sont nouvelles parce que c'est sûr ce qu'on vu dans le jour de l'expérimentation c'est juste une première partie, on n'avait pas de courage pour aller très en profondeur. On a peut-être des nouvelles connaissances, mais comme ... des choses comme établir des équations ou faire des conclusions finales on n'est pas arrivé à ça

E1 : Oui, si on aura une idée, si quelqu'un nous demande de suivre quelque étape ce n'est pas comme une étude. Eh oui on a... ce que je vois maintenant ce n'est pas toutes les types de lumière qui peuvent enlever les électrons du métal, et j'ai compris le phénomène que vous avez montré au début avec la plaque...

La simulation permet d'activer chez les sujets des processus de recherche de l'information, de son analyse et de son utilisation à travers diverses approches :

E2 : Je trouve que ça aide, c'est une autre façon comme j'ai dit la grosse tarte, toute une autre façon d'enseigner la même chose, on parle de la même chose les gens n'apprennent pas tous de

la même façon, il y a des gens plus visuels, des gens plus verbal ou théorique, puis le plus de manière que vous allez apporter pour enseigner la même information le plus de gens que tu allez rejoindre même s'il y en a qui pense à autres choses, mais au ils ont accroché, ils ont compris, ils ont appris...des fois la méthode traditionnelle, juste avec le tableau avec le moindre des mots, je ne suis pas sur qu'il va accrocher versus une approche plus visuelle ou interactive, à mon sens c'est plus profitable.

3.2.3. Situation de conflit

Les sujets sont invités à confronter leurs prévisions avant et après la simulation. Le tableau XXV représente les pourcentages de bonnes réponses pour les prévisions. Les prévisions de toutes les équipes avant simulation et les résultats après simulation sont diamétralement opposées. Les résultats de la simulation sur PDA montrent que l'effet photoélectrique dépend de la fréquence de la lumière et l'émission des électrons ne dépend pas de la puissance lumineuse. De même, le graphique qui représente l'intensité du courant en fonction du voltage et qui est généré par la simulation, n'est pas linéaire. Ce désaccord a conduit la majorité des sujets à chercher d'autres types de courbes et d'autres informations nécessaires, en fouillant dans les documents et en collaborant avec les autres membres de l'équipe pour justifier les résultats obtenus et formuler une explication préliminaire de l'effet photoélectrique.

Tableau XXV. Pourcentage de bonnes réponses avant et après la simulation

	Prévisions avant simulation	Résultats après simulation
l'effet du changement de la fréquence de la lumière sur l'émission des électrons	30 %	100 %
l'effet du changement de la tension électrique sur l'intensité du courant électrique produit	0 %	100 %
l'effet du changement de la puissance lumineuse sur l'émission des électrons	40 %	100 %
l'effet du changement de la fréquence de la lumière sur l'énergie cinétique des électrons émis	33 %	93 %

Nous avons demandé aux sujets, à travers les entrevues, de nous expliquer leurs réactions lors de la situation du conflit et nous présentons quelques exemples de réponses :

E1 : Ça nous a posé des questions... Ah, on s'est mis des questions pourquoi on a ça pourquoi pas exactement ce que nous avons.

E14 : oui par exemple à propos de la première courbe $I=f(V)$, je n'ai pas pensé qu'elle sera de cette manière-là.

C : Est-ce que vous avez posé des questions pourquoi cette différence ?

E14 : oui et on cherche la réponse après.

E4 : oui, un peu comme j'ai dit au niveau de la tension et du courant, j'ai pris un bout de temps à réfléchir sur mes concepts pour voir ce qui se passent, pourquoi ça ne fonctionnait pas et oui, c'est ça...

E5 : Oui, je pense que ça s'est passé assez souvent ... oui, justement sur le graphique, au début on a pensé que l'intensité ne se produit que seulement qu'à partir du voltage différent de zéro. Si le voltage est négatif c'est impossible d'avoir un courant, mais après l'expérimentation on s'est rendu compte que c'est possible, même si avant le voltage est zéro l'intensité est non nulle.

E9 : Oui, les résultats de la simulation étaient différents des prévisions. Ce qui nous a mené à penser pourquoi et poser des questions. On a collaboré pour résoudre ce problème ou répondre à ces questions, en essayant d'expliquer le phénomène...

En somme, tous les sujets se sont trouvés face à une situation où leurs résultats attendus diffèrent complètement des résultats obtenus. Ils déclarent s'être impliqués dans la résolution du conflit cognitif et avoir procédé par raisonnement sur les situations simulées en prenant en compte plusieurs variables simultanément.

3.2.4. Analyse et interprétation

Rappelons qu'au chapitre 3, nous avons formulé les questions suivantes concernant l'utilisation de la simulation :

Quel est l'apport didactique de la simulation pour décrire et interpréter des phénomènes invisibles ? L'utilisation d'une simulation de l'effet photoélectrique permet-elle de générer des conflits cognitifs chez les sujets ? Permet-elle de créer une insatisfaction chez les étudiants ? A quel point la simulation permet-elle aux étudiants de construire des modèles mentaux plus scientifiques à propos la nature de la lumière ? Dans le cas échéant, la simulation introduit-elle des conceptions erronées auprès des étudiants ?

Nous nous sommes servis de l'analyse des enregistrements vidéo, des entrevues, des réponses des sujets au questionnaire qui porte sur le rôle de la simulation et des documents écrits (prévisions) pour répondre à ces questions de recherche. Rappelons que nous avons utilisé les simulations informatiques dans un contexte pédagogique qui favorise l'apprentissage par l'exploration basé sur les conflits cognitifs. En ce sens, l'apprentissage est conçu comme un ensemble de processus dynamiques conduisant à des changements conceptuels et méthodologiques chez les apprenants (Gil, 1993). Ce type d'apprentissage s'est révélé efficace dans la mesure où l'apprenant devient l'acteur principal dans la construction de son savoir (Njoo et De Jong, 1993; Torres et Garcia, 1997).

A la lumière de nos résultats, nous remarquons d'abord que les sujets sont très motivés à utiliser la simulation pour émettre leurs hypothèses, vérifier leurs propositions et exprimer leur intérêt pour ce type d'apprentissage. Tous les sujets ont dit que la simulation sur le PDA leur a permis de visualiser le phénomène de l'effet photoélectrique et de mieux comprendre ce phénomène. En physique, la compréhension de certains concepts théoriques ou phénomènes invisibles est rendue difficile; la simulation permet d'explorer des concepts plus abstraits, par exemple le photon, et de développer une meilleure compréhension des notions enseignées, des phénomènes et des lois physiques (Jimoyiannis et al., 2001). La réalisation de modèles numériques permet de produire des objets manipulables à l'écran. La possibilité donnée au sujet de visualiser et de manipuler ces objets l'aide à surmonter certaines difficultés de compréhension liées aux dimensions conceptuelles, spatiales ou temporelles. La simulation de l'effet photoélectrique a permis de visualiser les différents éléments du circuit, la circulation d'électrons émis par la plaque et les graphiques correspondant aux variations des paramètres se construisent en temps réel sur l'écran tant pour l'intensité du courant électrique en fonction de la tension, que pour l'intensité du courant électrique en fonction de l'intensité lumineuse (ou la puissance lumineuse) et pour l'énergie cinétique des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse. Rappelons que la visualisation des graphiques permet au sujet d'analyser les données et développe davantage son esprit critique (Roschelle et al., 2000). Cette représentation visuelle dynamique du phénomène offre aux sujets la possibilité d'imaginer et de se figurer les différents concepts liés au phénomène; elle leur permet de comprendre visuellement la relation entre les graphes et l'expérience, plus clairement que lorsqu'ils utilisent des images statiques.

Le simulateur a offert la possibilité de faire l'expérience avec des métaux différents (cuivre, sodium et zinc). Tous les sujets ont fortement apprécié l'utilisation de la simulation pour l'apprentissage de l'effet photoélectrique du fait qu'elle permet de visualiser le phénomène.

Nous avons également opté pour l'utilisation de la simulation de l'effet photoélectrique parce qu'il est difficile de réaliser cette expérimentation en classe pour des raisons de temps, de coût ou de disponibilité en matériel. Nos résultats ont indiqué que 85,71 % des sujets disent que la simulation leur a permis plus particulièrement de faire des manipulations difficiles ou impossibles à réaliser dans la classe.

Il s'agit d'activités conduisant à expérimenter avec un modèle et à en explorer les différentes possibilités, ainsi qu'à manipuler les concepts théoriques associés. La simulation offre la possibilité de construire des représentations, tant graphiques que mentales, et constitue une aide à l'appropriation et à la compréhension des modèles qui la sous-tendent, à condition que les modèles soient clairement explicités avec un tel statut (Robles, 1997). Dans notre expérimentation, la simulation de l'effet photoélectrique a offert aux sujets l'occasion de manipuler les différentes notions théoriques (tension, intensité du courant électrique, puissance lumineuse, fréquence) pour explorer le modèle quantique de la lumière. Notons également que pour la majorité des sujets la simulation leur a permis de vérifier leurs hypothèses et leurs prédictions. Dix sujets indiquent que la simulation a permis de réduire le temps requis pour effectuer les tâches demandées et leur a fourni une occasion pour créer un environnement d'apprentissage comme support à la construction de connaissances et à la recherche des informations.

Plusieurs études ont montré l'importance des stratégies basées sur les conflits cognitifs dans le développement d'un enseignement par la recherche (Niaz, 1995). Dans ce sens, la simulation informatique peut constituer un outil pédagogique favorisant à la fois l'enseignement par la recherche et la création de situations de conflit cognitif. Ainsi, nos résultats mettent en évidence que neuf sujets disent que la simulation de l'effet photoélectrique a permis de générer chez eux un conflit cognitif. Une insatisfaction s'est manifestée lorsque les sujets ont été confrontés à des résultats en opposition avec leurs propres prédictions. Ces résultats sont soutenus par l'analyse des entrevues et des prédictions émises par les sujets avant la simulation.

En somme, nous avons constaté que la simulation de l'effet photoélectrique a constitué un élément fondamental de la démarche scientifique utilisée par les sujets. Nous avons également observé que la technologie de la simulation peut potentiellement faciliter la construction des savoirs. Cela exige une utilisation et une exploitation efficaces de ces outils interactifs pour qu'ils puissent répondre aux besoins cognitifs des sujets. Elle a pu créer des situations de conflit cognitif permettant aux sujets de tester, d'évaluer et de reconstruire leur propre savoir sur des notions et des concepts concernant l'effet photoélectrique. La résolution du conflit cognitif peut alors mener à une construction de nouvelles connaissances. En demandant aux sujets de résoudre ce conflit, on peut activer leurs connaissances antérieures et les forcer à élaborer des explications. Nous croyons que la collaboration peut aider les sujets à déficeler le conflit cognitif. Dans la partie suivante, nous essayons d'examiner le rôle de la collaboration.

3.3. Rôle de la collaboration

L'étape de résolution du conflit cognitif s'est faite par équipe et dans une situation de collaboration. Notre objectif est d'étudier ici la nature et l'importance de la collaboration entre les sujets, notamment de leurs interactions dans la situation d'apprentissage créée. Nous avons donc prêté une attention particulière à ces interactions; c'est l'analyse des enregistrements vidéo qui nous renseigne sur la durée et le type des communications entre les sujets et que nous avons pris en considération étape par étape.

3.3.1. Mécanismes de collaboration et d'interaction

3.3.1.1. Résultats d'analyse des enregistrements vidéo

En plus de l'analyse des tâches qui nous fournit la durée des tâches de l'activité, MORAE nous permet également d'effectuer une analyse des marqueurs qui nous offre la distribution des types ou des scores des marqueurs. Chaque marqueur est associé à une action d'un sujet ou de plusieurs sujets au cours de l'activité, chaque action étant elle-même associée à son tour à une composante ou à des composantes de l'apprentissage collaboratif.

Les enregistrements de toutes les actions et des conversations des sujets sont codés à l'aide du logiciel MORAE Manager, en utilisant une grille pour des fins d'analyse (Annexe IX). L'utilisation de MORAE et des vidéos enregistrées permet de tracer le cheminement des sujets conduisant à la réalisation de la tâche. MORAE permet aussi de créer facilement des graphiques afin de déterminer la fréquence des marqueurs des tâches. À partir de la distribution des types de marqueurs, nous pouvons déduire la distribution des composantes de l'apprentissage collaboratif, ce qui nous permet d'analyser la collaboration et les interactions entre les sujets. Nous avons enregistré 2 136 marqueurs qui désignent le nombre global des interventions (échange verbal, action, participation ou langage gestuel). La figure 30 indique le nombre d'interventions par équipe. Nous constatons que l'équipe Na a fait le nombre le plus élevé d'échanges dans la première phase, soit 712 avec un gain normalisé moyen de 0.6, contre la plus petite valeur des échanges pour l'équipe Cu1, soit 169 avec un gain normalisé de 0.61. De même, nous remarquons que l'équipe MC1 a également fait le nombre le plus élevé d'échanges dans la seconde phase, soit 158 avec un gain normalisé de 0,64, contre la plus petite valeur des échanges pour l'équipe MC3, soit 35 avec un gain normalisé de 0.39.

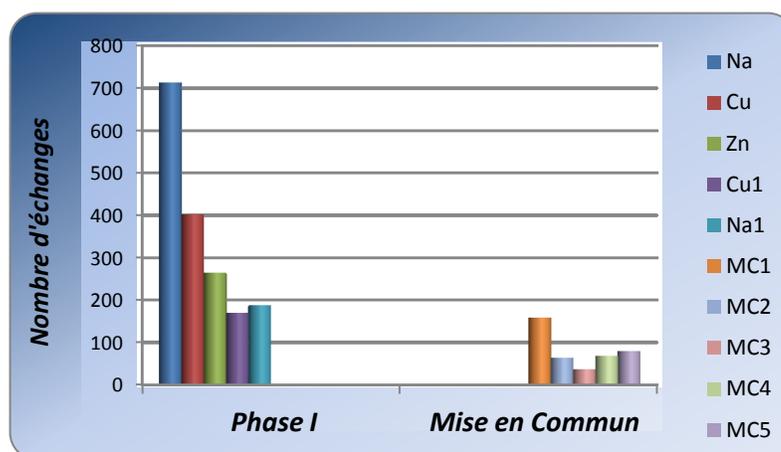


Figure 30. Nombre d'interventions par équipe³⁴

La grille de codage et analyse des vidéos avec MORAE (Annexe IX) contient les types de marqueurs utilisés, chaque marqueur correspondant à une ou des actions (ou interventions), associées à leur tour à une ou des composantes de l'apprentissage collaboratif (voir chapitre II) : Clarification/explication (CE); Partage du travail collaboratif (PTC); Recherche des informations (RI); Construction de connaissances (CC); Gestion de groupe/équipe (GG); Conflit (conflit); Compromis (Compromis); Encouragement (ENC); Socialisation (SOC); Interactions (INT); nous distinguons aussi entre interactions apprenant-contenu (INT-AC), interactions apprenant-interface (INT-AI), interactions apprenant-apprenant (INT-AA) et interactions apprenant-professeur (INT-AP).

Nous avons calculé le pourcentage de chaque composante et nous l'avons représenté à la figure 31 pour les deux phases de l'expérimentation.

³ Pour la phase I Les équipes Na, Cu, Zn, Cu1 et Na1 ont travaillé respectivement sur les métaux suivants Sodium, Cuivre, Zinc, Cuivre et Sodium.

⁴ Pour la Mise en commun Les équipes MC1, MC2 et MC3 sont formés à partir des équipes Na, Cu et Zn chaque membre de chaque équipe (métal) et les équipes MC4 et MC5 sont formés à partir des équipes Na 1 et Cu1 chaque membre de chaque équipe (métal).

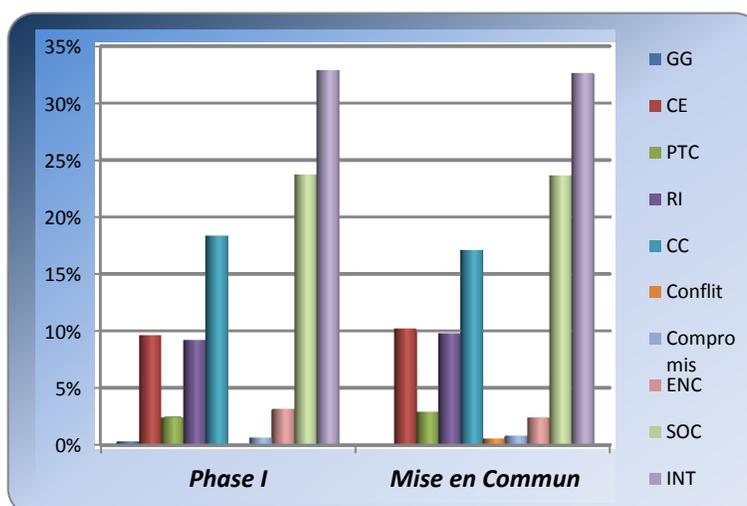


Figure 31. Pourcentage des composantes de l'apprentissage collaboratif

Les résultats montrent qu'il y a une faible différence entre les pourcentages de certaines composantes, entre la première phase et la phase de mise en commun. Notons une différence de 1 % pour les composantes suivantes : recherche d'information (RI), encouragement (ENC), interactions et construction des connaissances (CC). Nous constatons que le pourcentage des interactions et de la socialisation occupe plus de 50 % de l'ensemble des composantes (56 % pour la première phase et 57 % pour la seconde phase de mise en commun). Pour explorer les relations de dépendance entre le gain normalisé d'apprentissage et le pourcentage de chaque composante de l'apprentissage collaboratif, nous avons calculé les coefficients de corrélations non paramétriques de Spearman (tableau XXVI). Les résultats montrent que le gain normalisé dépend significativement des composantes suivantes : Clarification/explication (CE), Interactions (INT) et Compromis. Nous enregistrons respectivement des coefficients de corrélations de -0,675, 0,669 et 0,634 avec des significations de 0.032, 0.035 et 0.049 (<0.05).

Tableau XXVI. Corrélations non paramétriques de Spearman entre le gain normalisé de chaque équipe et les différentes composantes de l'apprentissage collaboratif

	GG	CE	PTC	RI	CC	Conflit	Compromis	ENC	SOC	INT
Coefficient de corrélation	-,123	-,675*	-,012	-,438	,328	,168	,634*	,128	,018	,669*
Sig. (unilatérale)	,735	,032	,973	,206	,354	,643	,049	,725	,960	,035

*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Si nous comparons les pourcentages des interactions apprenant-apprenant et des interactions entre apprenant-professeur (figure 32), nous constatons que le pourcentage des interactions apprenant-professeur reste très faible (il varie entre 0 % et 8 %) par rapport aux interactions apprenant-apprenant (entre 86 % et 100 %). Ce qui nous laisse croire que les sujets travaillaient d'une façon très autonome durant toute l'expérimentation et n'ont fait appel au professeur que rarement.

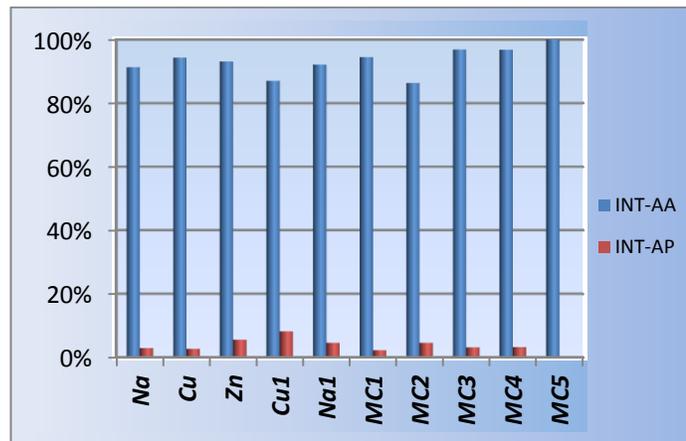


Figure 32. Pourcentage d'interactions apprenant-apprenant et apprenant-professeur pour chaque équipe

Nous accordons ainsi, dans ce qui suit, une attention plus particulière aux interactions apprenant-apprenant. Les figures 33 et 34 nous indiquent que plus le pourcentage des interactions augmente, plus le gain d'apprentissage est élevé.

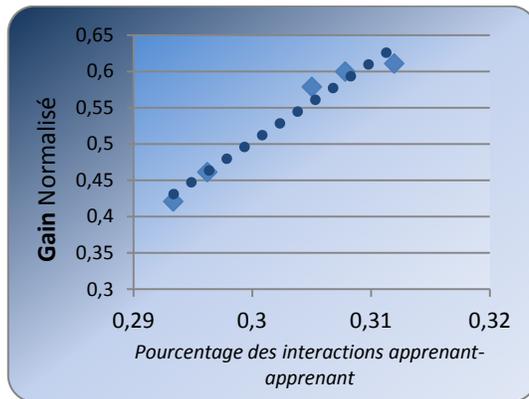


Figure 33. Gain d'apprentissage normalisé en fonction par équipe des interactions apprenant-apprenant pendant la phase I

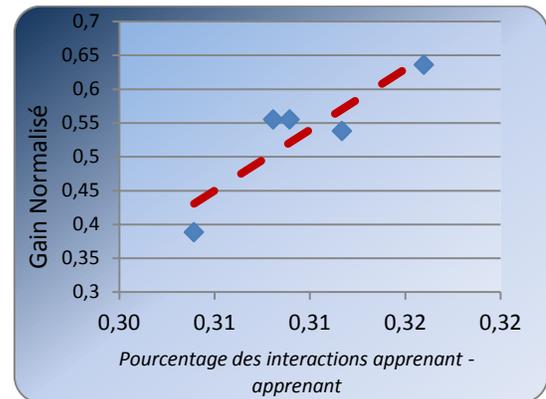


Figure 34. Gain d'apprentissage normalisé par équipe en fonction des interactions apprenant-apprenant pendant la phase de Mise en commun

Le tableau XXVII montre que le gain d'apprentissage normalisé est significativement corrélé avec les interactions apprenant-apprenant dans la première phase de l'expérimentation avec une signification pratiquement nulle.

Tableau XXVII. Coefficient de corrélation de Spearman entre le gain d'apprentissage et les interactions apprenant-apprenant

	Phase I	MC
Coefficient de corrélation de Spearman	1,000**	0,667
signification	0,00	0,219

** . La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

3. 3.1.2. Résultats du questionnaire et du traitement des entrevues

Les sujets ont complété la grille (Annexe VIII) qui porte sur les mécanismes de collaboration rencontrés lors de l'accomplissement de leurs activités d'apprentissage. Les sujets sont invités à répondre à la question sur une échelle Lickert à 5 niveaux : « 1. Toujours, 2. Fréquemment, 3. Parfois, 4. Rarement, 5. Jamais. »

Les résultats montrent que les mécanismes de collaboration tels que la clarification et l'explication ont été utilisés très fréquemment par la majorité des sujets (85,7 %); onze sujets ont discuté très fréquemment sur la manière de partager le travail collaboratif et ils ont participé à la gestion de groupe pour s'assurer que le travail soit achevé.

Concernant le partage des connaissances, les sujets E1 et E13 expliquent leurs points de vue :

E1 : ...Comme j'avais dit partage des connaissances même si tu es fort, tu ne connais pas toutes les choses, tu le sauras parce que tu parles avec les autres à mon avis, c'est ça.

E13 : Vraiment le travail du groupe donne beaucoup de chose, on partage les idées, on partage le travail; on partage beaucoup de choses.

Notons également que onze sujets ont l'occasion de se socialiser. Les verbalisations suivantes tentent d'appuyer ce constat :

E1 : Bien sûr, moi je ne connaissais personne, mais après j'ai connu les gars, ça aide à la socialisation c'est mieux.

E11 : Tout en me basant sur l'expérience de jeudi, il faut dire que je ne connaissais personne et ça s'est bien passé on a même discuté de l'expérience de l'école et tout ça. Oui on a créé des liens.

E5 : Hm.. Par exemple en faisant l'expérience on a pu se présenter et puis donner nos arrières plans personnels (background) puis on s'est mis à parler : commencer à se connaître et puis on s'est mis au travail puis on s'est dit si quelqu'un a fait à ce cours là, peut être l'autre ne l'a pas fait. On s'est vraiment entraîné...Oui ça a aidé la socialisation

La figure 35 nous montre que dix sujets ont procédé à des recherches d'informations, neuf sujets croient que l'abondance d'idées dans un travail collaboratif peut mener à construire des nouvelles connaissances comme l'indiquent les verbalisations suivantes :

E11 : ... travailler en groupes à 2 ou 3 personnes, ça veut dire énormément d'idées... puisque l'autre a complété ton idée ou bien l'autre t'a éclairé quelque chose que tu ne savais pas, donc à la fin tu as gagné.

E2 : Oui, si une personne dans le groupe a mis un commentaire peut être quelqu'un d'autre dans le groupe pense à d'autres choses ça lui donne une idée et ça lui donne des pistes de travailler pour justement découvrir d'autres choses, oui, oui absolument ça peut fonctionner de cette façon aussi...

E14 :... Si quelqu'un possède des informations, tu peux acquérir des nouvelles connaissances.

Une portion des participants (64.3 %) pensent qu'ils ont eu l'occasion de s'encourager.

E12 : un encouragement ? Oui, si j'étais seul je ne pourrais pas faire une tâche de plus de 4 heures.

E13 : un encouragement, c'est tout à fait normal. Si quelqu'un fait une erreur on désespère. Il y en a toujours un autre qui reste pour l'exciter...

Plus loin, le sujet E4 dit que le travail collaboratif a été pour lui, en quelque sorte, un engagement pour effectuer les différentes tâches de l'activité :

E4 :... J'ai fouillé dans la documentation que vous nous avez fourni, j'ai lu des trucs, j'ai écouté la communication et ça m'a forcé et m'a permis de poser des questions et de fouiller et chercher au lieu de rester assis.

En outre, une minorité de sujets (respectivement 3 et 6) ont fait preuve de comportements sociaux positifs envers le conflit et le compromis. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il n'y avait pas assez de conflits entre les membres du groupe comme l'explique le sujet E11 :

Ben, c'est-à-dire, on a juste évité le conflit. On a tout fait pour éviter les conflits. On a préféré des discussions appuyées des arguments plutôt de dire non, tu n'as pas raison et dire n'importe quoi. C'était une bonne ambiance.

Au niveau des interactions, les sujets ont reconnu qu'il y a eu des échanges entre apprenant et professeur (71,4 %), entre apprenant et apprenant (100 %), entre apprenant et interface et apprenant et professeur (71,4 %).

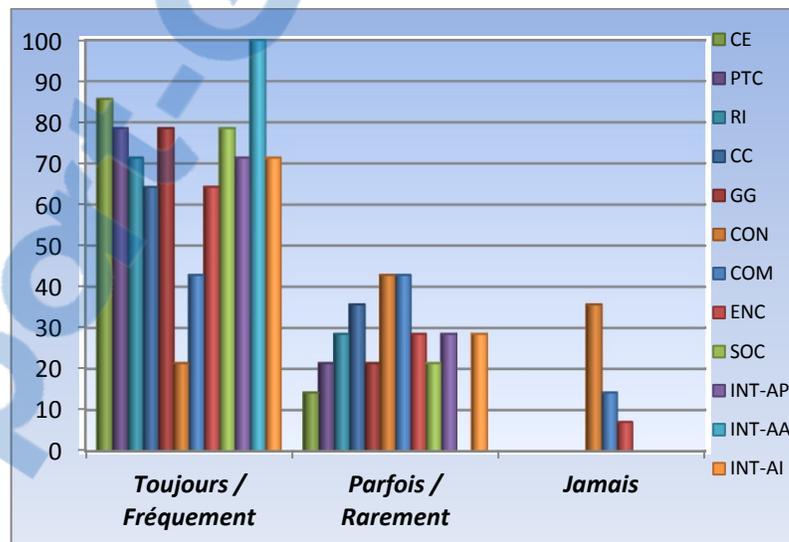


Figure 35. Résultats du questionnaire portant sur les mécanismes de la collaboration

Les participants ont ensuite été invités à remplir la grille (Annexe VIII) qui porte sur le rôle de l'apprenant dans l'apprentissage collaboratif, avec une échelle de Lickert à 5 niveaux : « 1. Complètement d'accord, 2. D'accord, 3. Pas d'accord, 4. Pas du tout

d'accord, 5. Sans objet ». Pour faciliter l'analyse des résultats, les réponses sont regroupées en trois catégories : « 1. Accord, 2. Désaccord, 3. Sans objet ». La figure 36 indique que dix sujets croient que le rôle du sujet est d'interagir positivement avec ses pairs, neuf pensent que les sujets participent activement à leur apprentissage, partagent leurs connaissances avec leurs pairs et procèdent à l'utilisation de certains des mécanismes de collaboration à différents degrés, tels que l'explication (sept sujets), la négociation (huit participants), le partage (neuf sujets), la recherche (sept sujets) et l'analyse (huit participants).

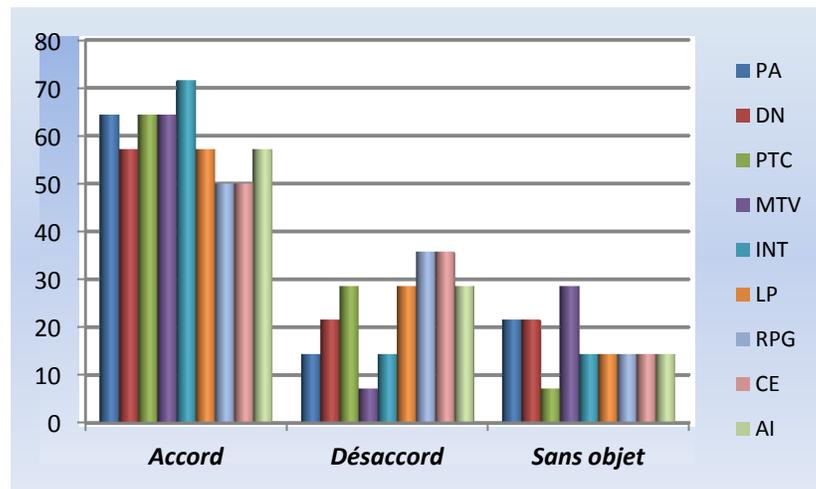


Figure 36. Résultats du questionnaire portant sur le rôle d'étudiant dans un apprentissage collaboratif.

3.3.2. Analyse et interprétation

Rappelons qu'au chapitre 3, nous avons formulé les questions suivantes concernant l'utilisation de la simulation :

Comment pouvons-nous assurer une collaboration efficace parmi les apprenants ? Quels sont les parcours pris par les apprenants pour compléter les tâches collaboratives ? Quel genre d'interaction favorise l'apprentissage collaboratif ? Est-ce que l'activité basée sur la simulation favorise ou non une collaboration entre sujets ?

Notre objectif est d'étudier la nature et l'importance de la collaboration entre les étudiants, notamment de leurs interactions dans la situation d'apprentissage créée. Nous avons donc prêté une attention particulière à ces interactions. L'analyse des enregistrements

vidéo nous renseigne sur la durée et le type des communications entre les étudiants et nous avons pris en considération étape par étape.

Nos résultats ont indiqué que tous les étudiants avaient une attitude positive face à la collaboration avec un partenaire. Ceci s'est traduit par l'absence de conflits interpersonnels et par le fort pourcentage de socialisation enregistré. Par ailleurs, l'analyse du comportement des étudiants durant ces interactions nous indique qu'ils se sont montrés motivés, participants et impliqués dans l'apprentissage proposé : au total dans les dix équipes (les cinq de la première phase et les trois de la deuxième), une dynamique différente a pu être observée, avec des discussions plus ou moins animées selon les équipes, mais aucun des étudiants n'est resté complètement passif ou à l'écart. Dans les équipes, les communications se déroulent de façon tout à fait naturelle, avec des interactions à la fois verbales, visuelles et gestuelles, comme si la technologie était absente. Dans l'approche socioconstructiviste adoptée, nous soulignons ainsi le rôle des interactions sociales dans l'apprentissage, mais il nous paraît également important de rappeler que l'aspect de construction individuelle et collective des connaissances a été mis en évidence lors de l'analyse des enregistrements vidéo. En effet, les étudiants, tout en discutant, ont fréquemment recours aux documents disponibles ou à la simulation : la construction des connaissances ne se fait pas de façon linéaire pour chacun, ni de façon identique pour les différents étudiants.

Nous avons observé que les interactions entre les étudiants ont bien fonctionné lors de ces activités collaboratives. Lorsque les étudiants ont travaillé ensemble, la grille a démontré que les mécanismes de collaboration utilisés étaient la clarification et l'explication, et ensuite un partage du travail collaboratif.

Mis à part l'élément social, l'étudiant procédait à d'autres types d'interaction : une interaction apprenant-professeur (en faisant appel au professeur), une interaction apprenant-apprenant (discussion, négociation, prédictions, explication, etc.), une interaction entre apprenant-interface (utilisation de la plateforme mobile et du simulateur) et une interaction entre apprenant-contenu. Dans cette étape d'apprentissage, l'apprenant est tenu de participer

activement à son apprentissage en collaborant avec des pairs pour construire de nouvelles connaissances.

Ainsi, notre expérimentation nous a permis d'apporter une réponse à notre deuxième question de recherche sur les activités collaboratives. Nous avons ainsi observé que les activités collaboratives ont favorisé des interactions entre partenaires durant l'expérimentation. Nos résultats affirment que pour assurer des interactions pertinentes, les étudiants doivent être capables de s'exprimer et de représenter leurs idées d'une manière claire et succincte. Cette représentation des idées abstraites énoncées par les étudiants peut être rendue possible par les outils interactifs comme la simulation et par les dispositifs mobiles. Rappelons que l'interaction entre apprenants est la faculté d'échange entre deux personnes, nous avons observé que ces interactions ont permis aux étudiants de partager et d'apprendre avec leurs pairs.

Repman et Logan (1996) ont identifié quatre types d'interaction en mode réseau : les interactions entre apprenant et apprenant, apprenant et interface, apprenant et contenu et apprenant et professeur. Rappelons que nous avons constaté que le pourcentage des interactions apprenant-professeur est très faible (varie entre 0 % et 8 %) par rapport aux interactions apprenant-apprenant (entre 86 % et 100 %). Ce qui nous laisse croire que les étudiants travaillaient d'une façon très autonome durant toute l'expérimentation et n'ont fait appel au professeur que rarement.

En ce qui concerne les interactions apprenant-apprenant, nous avons observé que le gain d'apprentissage normalisé dépend fortement des interactions apprenant-apprenant dans la première phase de l'expérimentation : plus le pourcentage des interactions augmente, plus le gain d'apprentissage est élevé. Nous pouvons ainsi conclure que ces activités de collaboration basées sur simulation ont été bénéfiques aux sujets. Quand on analyse plus finement la nature de ces interactions, nous avons mis en évidence que la majorité des sujets ont utilisée très fréquemment les mécanismes de collaboration tels que la clarification et l'explication; ils ont discuté très fréquemment sur la manière de partager le travail

collaboratif; ils ont participé à la gestion de groupe pour s'assurer que le travail soit achevé; et enfin, ils ont eu l'occasion de se socialiser et s'encourager.

3.4. Effet de la mobilité

Rappelons qu'au chapitre 3, nous avons formulé les questions suivantes concernant l'effet de la mobilité :

En quoi les dispositifs mobiles facilitent-ils ou entravent-ils la collaboration entre apprenants ? Permettent-ils d'établir une communication (discussion, négociation) efficace aux étudiants durant l'activité ? Quel est l'effet de ces dispositifs sur l'engagement des étudiants pour travailler ensemble ? Que se passe-t-il quand on met les étudiants en présence d'un tel environnement, quant à l'usage de la simulation, quant à la nature des échanges et interactions entre les étudiants et quant à l'utilisation des dispositifs mobiles ?

Notre objectif consiste à explorer le rôle de la technologie mobile dans la situation d'apprentissage créée. C'est d'une part l'analyse des enregistrements vidéo et, d'autre part, les entrevues des sujets et les résultats de la question portant sur la mobilité, qui nous donnent des indications sur le rôle de la mobilité.

Nous pouvons tout d'abord noter que les sujets sont très attirés par le PDA. Au moment de sa remise, ils ont montré une grande curiosité pour découvrir le simulateur sur l'ordinateur de poche, presque tous les sujets abandonnant leur tâche en cours pour se précipiter sur le PDA afin de l'ouvrir et de l'essayer. Toutefois, nous remarquons que, sur l'ensemble de la séance, le temps passé par chaque sujet avec le PDA est peu important : 41 minutes auxquelles s'ajoutent quelques recours ponctuels pendant la mise en commun et la rédaction des explications. Nous pouvons aussi noter que tous les sujets se comportent de la même façon : ils ne prennent que quelques minutes pour se familiariser avec le PDA et l'interface du simulateur et ils utilisent ensuite le PDA pendant toute l'activité de simulation. L'usage du PDA en réseau local et hors connexion Internet a évité aux sujets d'être divertis, ce qui a impliqué un plus grand engagement actif de leur part.

Comme nous l'avons déjà signalé, au changement de groupe pour la mise en commun finale, les sujets de chaque équipe qui ont rédigé le premier compte rendu sur

l'ordinateur portable, n'ont pas changé de place tandis que les autres membres de l'équipe se sont déplacés pour changer d'équipe, tout en gardant leur PDA à la main.

La technologie mobile a permis aux sujets de se déplacer librement dans la classe pour aller rejoindre une autre équipe, tout en apportant avec eux les résultats qu'ils ont obtenus sur un métal donné (cuivre, zinc ou sodium) lors de l'expérimentation virtuelle. Cela leur a aussi permis d'explorer l'effet du changement du métal sur les résultats de l'expérience de l'effet photoélectrique. Dans les entrevues, les sujets ont exprimé leur intérêt pour ce type d'apprentissage et les avantages de l'utilisation de l'ordinateur de poche.

3.4.1. Autonomie

Les sujets n'ont fait appel au professeur que rarement et ils ont exprimé qu'ils étaient plus autonomes lors de l'apprentissage.

E 2 : le PDA a apporté de l'autonomie dans le sens d'un apprentissage dans le sens que toi-même qui est responsable de l'apprentissage et de faire quelque chose et pour arriver à un objectif

E 8 : ... c'est la première fois, quand on fait des travaux d'équipes au secondaire, il n'y avait pas de machine, il y avait un seul ordinateur...

3.4.2. Collaboration

La collaboration a été facilitée par l'utilisation de l'ordinateur de poche. Les sujets sont à l'aise avec la technologie mobile; ils peuvent échanger leur PDA et se montrer leurs résultats pendant les discussions ou la collaboration comme le montrent les réponses des sujets à la question suivante : *la collaboration peut-elle être facilitée par l'utilisation de l'ordinateur de poche ?*

E2 : Oui, parce que pas tout le monde est à l'aise avec la technologie, moi j'ai travaillé trois ans sur les ordinateurs du bureau, un PDA peut être moins, donc le fait d'être avec quelqu'un et puis lui m'explique; Ah regarde c'est comme ça; c'est pratique d'être en groupe ...

E6 : Hier, c'est plus mobile, tu peux même donner ton PDA à ton ami

E9 : il y a une différence : le PDA plus mobile, plus flexible, faire des recherches, on se montre les résultats entre nous, on peut faire l'activité n'importe où et n'importe quand c'est-à-dire en différents lieux et facilite la discussion avec les autres....

E 7 : c'est vraiment important pour l'apprentissage ... Mais c'est vraiment bien pour l'apprentissage si on a tous en classe il reste vraiment un support...

E13 : non, en fait l'ordinateur fixe ça reste pour un travail collectif dans un local donné par contre le PDA ça permet de déplacer l'outil pédagogique entre le groupe et vraiment bien travailler et faciliter la tâche... oui, il peut même souvent lui montrer la simulation qu'il a faite.

3.4.3. Communication face-à-face

Les communications face-à-face (contact visuel et langage gestuel) sont soutenues et favorisées par l'usage des dispositifs mobiles lors des interactions entre sujets ou entre les sujets et le professeur. Nous avons demandé aux sujets si l'usage du PDA peut influencer la nature des communications entre les participants. Nous résumons leurs réponses :

E9 : oui le PDA pour communiquer et discuter avec les autres.

E1 : facile à communiquer, on peut facilement montrer aux autres par exemple mon collègue ne savait pas utiliser moi je lui ai montré quoi faire et je crois ça l'a aidé.

E7 : Non avec les PDA; oui c'est vrai avec les PDA parce qu'on se montre des graphiques un moment donné ...

E8 : J'ai toujours travaillé avec l'ordinateur.... oui parce que à un moment donné, ... on s'est échangé les PDA

E12 : Non, ça serait mieux avec le PDA par exemple c'est plus facile à montrer à ton partenaire. Ce que tu as fait.

E4 : le PDA a permis à chacun de faire le test lui-même. C'est une partie individuelle dans le groupe qui peut être intéressante quand même ce n'est pas juste comme une personne à l'ordinateur les autres le regardent...

E13 : évidemment, s'il y a des grandes ordinateurs PC ça serait beaucoup d'encombrement et par conséquent influencer les interactions...

3.4.4. Flexibilité

L'ordinateur de poche a en fait été utilisé comme une calculatrice scientifique, comme l'indique les sujets E7 et E13, que les sujets en sciences sont habitués à utiliser de façon ponctuelle dans un cours, son utilisation étant complètement intégrée aux activités d'apprentissage. D'autres étudiants soutiennent que l'utilisation du PDA est facilement maniable, portable, mobile et flexible (mentionné par E5, E6, E8, E9, E12 et E13). Les sujets E2 et E8 ont mis l'accent sur le fait que la simulation sur PDA offre la possibilité de

visualier le phénomène de l'effet photoélectrique, d'obtenir la rétroaction immédiate de toute manipulation quels que soient le lieu et le moment, et elle permet plus d'interactions.

3.4.5. Motivation et engagement

Le fait que chacun puisse, au moment où il en a besoin et à sa façon, interagir avec le simulateur, favorise l'engagement cognitif individuel des sujets. L'usage des PDA a un rôle d'attraction en focalisant l'attention des sujets.

E 3 : Oui, surtout si les gens sont motivés, Ah ou si tu veux vraiment le faire, comme je te dis je suis chanceux, on est tombé dans une équipe...

E 2 : Ils sont extrêmement motivés à découvrir le PDA ... je sais que la technologie ça aide, il m'a beaucoup aidé personnellement en tout cas pour moi la, comprendre comment les électrons fonctionnent quel l'effet du voltage... (PDA et SIM)

3.4.6. Limites

À l'instar de tous les avantages présentés ci-dessus, les sujets ont indiqué quelques limites, surtout techniques, de l'utilisation des dispositifs mobiles comme la dimension de l'écran, les problèmes de connexion et le manque d'options :

E1 : Il y a une contrainte dans l'application, dimensions de l'image et aussi connexion, il ne faut pas avoir des problèmes de connexion comme ça... j'ai trouvé un peu difficile de comprendre ce qui est avant.... la connexion a tombé plusieurs fois... peut-être plus de 5 fois ...

E4 : les désavantages du PDA est que l'écran est petit mais pas d'options...

CHAPITRE 6. CONCLUSIONS

Le but de la présente recherche était de déterminer si, dans le cadre d'un cours de physique de niveau collégial, la simulation de l'effet photoélectrique et l'utilisation des dispositifs mobiles en situation de collaboration favorisent une évolution des conceptions des étudiants au sujet de la lumière.

Nous avons procédé à l'élaboration d'un scénario d'apprentissage collaboratif intégrant une simulation de l'effet photoélectrique sur un ordinateur de poche. La conception du scénario a d'abord été influencée par notre vision socioconstructiviste de l'apprentissage. Nous avons effectué deux études préliminaires afin de compléter et de valider notre scénario d'apprentissage, la plateforme et l'interface du simulateur, que nous avons utilisés dans notre expérimentation : la première avec des ordinateurs de bureau et la seconde avec des ordinateurs de poche. Nous avons fait suivre à deux groupes d'étudiants deux cours différents, l'un portant sur une approche traditionnelle d'enseignement, et l'autre basé sur le scénario d'apprentissage collaboratif élaboré. Nous leur avons fait passer un test évaluant l'évolution conceptuelle sur la nature de la lumière et sur le phénomène de l'effet photoélectrique et de concepts connexes, à deux reprises : la première avant que les sujets ne s'investissent dans le cours (prétest) et la seconde après la réalisation des expérimentations (post-test). Nos résultats aux prétest et post-test ont été complétés par des entrevues individuelles semi-dirigées avec tous les sujets, par des enregistrements vidéo et par des traces récupérées lors des séances d'apprentissage (fichiers logs ou papier).

Nous pouvons considérer que ce projet de recherche est d'abord une réussite pour la conception d'un scénario d'apprentissage relatif à un phénomène aussi complexe que celui de l'effet photoélectrique, en respectant de nombreux critères (collaboration, simulation, dispositifs mobiles) qui nous paraissaient à priori extrêmement utopiques de réunir dans une situation d'apprentissage en classe. De plus, cette étude présente un exemple de guide possible destiné aux professeurs pour élaborer des scénarios d'apprentissage collaboratif

basés sur des simulations en utilisant des dispositifs mobiles. Rappelons que pour l'élaboration d'un protocole expérimental adapté spécifiquement à notre recherche, nous avons procédé à deux études exploratoires et nous nous sommes inspirés des grandes lignes issues du modèle de Zurita et Nussbaum (2007). Nous récapitulons ici les principaux éléments de la démarche que nous avons suivie pour concevoir notre scénario :

- Identification de l'objectif d'apprentissage.
- Mise en place des compétences visées d'ordre social. Influencés par une vision socioconstructiviste de l'apprentissage, nous avons opté pour l'apprentissage collaboratif dans le but de stimuler les interactions sociales entre les membres. Ce type d'apprentissage exige des compétences sociales telles que la communication en face-à-face, la discussion, le consensus, la coordination et la négociation.
- Choix du type d'activité de collaboration. Parmi les trois types d'activité de collaboration proposés par Zurita et Nussbaum (2007), nous avons choisi une activité de construction puisque notre objectif d'apprentissage vise la construction d'un modèle explicatif de l'effet photoélectrique. Pour ce faire, nous avons élaboré une stratégie basée sur le conflit cognitif dans le but de stimuler un changement conceptuel auprès des sujets. Dans un premier temps, les étudiants identifient les variables qu'ils jugent pertinentes et font leurs prédictions des résultats attendus; puis ils font leurs propres expériences; ensuite, vient une étape de comparaison, de discussion des résultats et de proposition d'une explication et d'un modèle; enfin, pour optimiser les interactions sociales et mettre en évidence la mobilité des apprenants, nous avons envisagé une dernière étape de mise en commun pour l'élaboration d'une explication et d'un modèle complet.
- Définition des tâches d'activité. Les membres de l'équipe doivent exécuter des tâches variées, soit individuellement ou en équipe; pour les tâches individuelles, chaque membre doit vérifier séparément l'influence des différents paramètres

(l'intensité lumineuse, la fréquence de la lumière et la tension électrique) sur le courant photoélectrique, en effectuant ses propres expériences sur son ordinateur de poche; pour les tâches en équipe, les élèves sont contraints à collaborer pour faire des prévisions et discuter les résultats obtenus dans le but de construire un modèle explicatif de l'effet photoélectrique.

- Précision des rôles et des règlements qui aident à optimiser les interactions sociales productives. Notons trois types de relations qui peuvent surgir entre les membres lors d'une interaction sociale : le soutien entre les membres, le conflit sociocognitif et l'interdépendance sociale. La technologie fournit un espace de négociation pour soutenir le travail de collaboration. Les rôles d'activité suivants sont soutenus par la technologie : 1) le travail en équipe pour maximiser l'interdépendance positive et pour organiser et répartir les tâches au sein du groupe; 2) un espace de négociation, d'interactions et d'échange d'informations.

Les sujets qui ont suivi ce type de laboratoire ont obtenu de très bons résultats au post-test par rapport à ceux qui ont suivi le cours d'une manière traditionnelle. Nous avons enregistré un gain moyen d'apprentissage qualifié de niveau modéré selon Hake (1998). Les résultats des entrevues ont permis de repérer quelques difficultés conceptuelles d'apprentissage chez les sujets et nous avons constaté que les conceptions issues de ces difficultés d'apprentissage concordent en majorité avec celles dépistées par Ambrose et al. (1999), McKagan et al. (2009) et Steinberg et al. (1996). Nous révélons ainsi chez les sujets des difficultés telles que :

- une croyance que la loi d'Ohm ($V = IR$) s'applique à l'expérience photoélectrique;
- une incapacité à différencier entre l'intensité de la lumière, et par conséquent le flux de photons, et la fréquence de la lumière, et donc de l'énergie de photon,
- une croyance qu'un photon est un objet chargé;
- une incapacité de faire toute prévision d'un graphique d'intensité électrique en fonction de la tension (I-V) pour l'expérience photoélectrique;

- une incapacité à donner toute explication reliant des photons à l'effet photoélectrique.
- une incapacité à tracer un graphique Intensité-Tension qualitativement correct;
- une inaptitude à interpréter le schéma de circuit (particulièrement à tension variable);
- une difficulté à comprendre que la lumière et non la tension cause l'émission d'électron;
- une difficulté à comprendre significativement l'expérience de l'effet photoélectrique.
- une difficulté à comprendre qu'un photon est une particule avec une onde à l'intérieur;
- une difficulté à comprendre que les photons d'une fréquence plus élevée sont plus grands que ceux d'une fréquence plus basse;
- une difficulté à comprendre que tous les photons ont la même énergie;

L'analyse des données recueillies lors des enregistrements des séquences vidéo, des questionnaires et des traces récupérées nous a permis de mieux comprendre le processus d'apprentissage collaboratif, notamment comme processus continu, non linéaire, et variable selon les étudiants : recours ponctuels aux documents, à la simulation et aux échanges avec les pairs, pas de réelle rupture entre les étapes, rôles dans les groupes selon le profil (l'étudiant « montre » son PDA aux autres) et selon l'utilisation des technologies. Cette étude nous a dévoilé que le nombre et la durée des interactions entre les sujets sont fortement corrélés avec le gain d'apprentissage.

L'analyse des relations de dépendance entre le gain normalisé d'apprentissage et le temps employé par tâche montrent que le gain dépend significativement du temps réel de la tâche des prédictions (nous enregistrons un coefficient de corrélations de 0,9 avec une signification de 0.037). Nous avons également observé un engagement de la part des sujets durant cette tâche des prévisions. Il nous semble que la tâche des prédictions a plus d'influence sur le changement conceptuel des sujets que les autres tâches.

Pour explorer les relations de dépendance entre le gain normalisé d'apprentissage et le pourcentage de chaque composante de l'apprentissage collaboratif, nous avons calculé les coefficients de corrélations non paramétriques de Spearman. Les résultats montrent que

le gain normalisé dépend significativement des composantes suivantes : Clarification/explication (CE), Interactions (INT) et Compromis. Nous pouvons ainsi dire que les mécanismes de clarification/explication, d'interactions et de compromis, semblent influencer le plus le changement conceptuel chez les étudiants.

En examinant les interactions, les résultats montrent que le pourcentage des interactions entre professeur et apprenant reste très faible (ne dépasse pas 8 %) par rapport aux interactions entre apprenants (entre 86 % et 100 %). Ceci nous laisse croire que les sujets ont travaillé d'une façon très autonome durant toute l'expérimentation et n'ont fait appel au professeur que rarement.

Nous avons également enregistré une corrélation très significative entre le gain normalisé d'apprentissage et les interactions apprenant-apprenant dans la première phase de l'expérimentation avec une signification pratiquement nulle.

Selon les participants, l'utilisation de la simulation a été très bénéfique du fait qu'elle a favorisé la mise en situation de conflit cognitif et d'expérimentation concrète avec détermination préalable de variables et prédictions, puis la vérification d'hypothèses et l'élaboration d'explications. La visualisation du phénomène sur le simulateur a permis aux sujets de faire des liens entre la variation des paramètres et ses effets, via la construction des courbes correspondantes. Nos résultats ont montré également que les technologies mobiles ont contribué à l'amélioration de l'apprentissage en favorisant les communications naturelles entre les sujets (verbales, visuelles et gestuelles) et des déplacements dans la classe, facilitant le recours possible aux ressources disponibles (documents, simulation, etc.) au moment où l'étudiant en a besoin pour construire ses nouvelles connaissances et en stimulant l'engagement cognitif de chacun.

Nous sommes conscients que cette recherche exploratoire présente des limites et les conclusions que nous en tirons doivent être pondérées, notamment en raison :

- Du nombre restreint de sujets impliqués dans cette étude qui ne permet pas de prétendre à une très large représentativité. La thèse ne tient pas compte non plus

des profils hétérogènes des participants, notamment des différences garçons-filles, étudiants de niveau universitaire ou collégial, habiles ou non avec les technologies.

- Des contextes différents dans lesquels la recherche a eu lieu et qui introduisent des biais, tant pour la situation d'apprentissage elle-même que pour la cueillette des données, ce qui rend la généralisation difficile. Notamment, les tests ont également été menés de façon individuelle. La recherche s'est déroulée dans le cadre d'une classe expérimentale où le professeur est lui-même le chercheur. Par ailleurs, les sujets qui forment les équipes ne se connaissent pas et ne sont pas impliqués dans des relations préalables de collaboration ou dans un même programme éducatif, ce qui modifie probablement leur motivation, leur engagement et la nature de leurs interactions.
- De l'aspect artificiel de nos expérimentations pour lesquelles nous mettons à disposition des étudiants, pour une courte durée et sans qu'ils aient vraiment le temps de se familiariser avec lui, un ordinateur de poche, fort probablement différent des appareils mobiles auxquels ils sont habitués et, qui plus est, présente des limites certaines qui entravent les interactions (sensibilité de l'écran tactile par exemple).
- De la quantité et de la variété des données recueillies qui peuvent être analysées sous des angles différents : enregistrement vidéo des séances d'apprentissage, traces sur papier, enregistrement des actions des étudiants à l'ordinateur, résultats des prétests et des post-tests, entrevues individuelles, questionnaires concernant le rôle de la simulation et la collaboration. ,

Pour améliorer une expérience similaire avec les étudiants, nous recommandons aux enseignants les points suivants :

- La planification de plusieurs d'activités préparatoires pour établir le profil des fausses conceptions des étudiants sur notions de la physique classique nécessaires

et préalables à la compréhension de l'effet photoélectrique : onde électromagnétique, interférence, diffraction et plus particulièrement la notion du courant électrique, car les résultats de la question montre une compréhension insuffisante de la façon de production d'un courant par un champ électrique.

- L'expérimentation montre des limitations techniques, par exemple : problèmes de connexion, d'affichage... Nous pensons que ces problèmes disparaissent avec l'émergence et le développement rapide des dispositifs mobiles. Ce point peut orienter les enseignants le choix de l'appareil à utiliser dans le cours.
- Nous avons observé que la collaboration a été fortement influencée par le choix de membres d'équipes. Nous recommandons ainsi d'accorder une attention particulière à cette première étape de choix.

Dans la continuité de cette thèse, certaines pistes de recherches sont apparues et d'autres se sont confirmées. Bien entendu, du point de vue méthodologique, il serait fort intéressant, avec davantage de moyens, de reproduire la recherche à plus grande échelle et avec plus de sujets, mais d'autres possibilités se dessinent également. Il serait également possible d'effectuer cette recherche dans un contexte scolaire d'un même programme éducatif au collégial.

La plateforme MobileSIM ouvre des perspectives très intéressantes, autant pour la recherche qui vise à mieux comprendre les processus complexes, individuels et collectifs, en jeu dans l'apprentissage collaboratif des sciences, que pour l'évaluation personnalisée de chaque étudiant. L'étudiant, de son côté, se connecte lui aussi à la plateforme avec un code d'accès personnel qui lui a été attribué par le professeur. Cet accès personnalisé à la plateforme (installée sur l'ordinateur portable du professeur pour une connexion en wifi dans la classe) est possible à la fois à partir de son PDA et de l'ordinateur portable qui est utilisé pour les rapports après mises en commun; il est aussi possible par Internet, en tout temps, en dehors de la classe. Avec une telle plateforme, divers scénarios d'apprentissage pourront être élaborés par le professeur, basés sur d'autres simulations et intégrant des activités en classe et hors de la classe. Cela ouvre à la didactique des sciences un important

champ d'investigation pour la recherche et l'innovation pédagogique. Le scénario d'apprentissage que nous avons élaboré autour de la simulation de l'effet photoélectrique pourra être adapté pour l'apprentissage d'autres notions de la physique et pourra être considéré pour la conception d'environnements collaboratifs d'apprentissage mobile innovants, centrés sur les besoins des apprenants et intégrant les technologies au bon moment et pour la bonne activité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adams, D., Carlson H. et Hamm, M. (1990). *Cooperative Learning & Educational Media Collaborating with Technology and Each Other*. New Jersey Educational Technology Publications.
- Alessi, S. M. et Trollip, S. R. (1991). *Computer Based Instruction: Methods and Development*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ambrose, B. S., Heron, P. R. L., Vokos, S., et McDermott, L.C. (1999). *Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena*. American Journal of Physics 67 (10), 891-898.
- Astolfi. J-P,(1997). *Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies*, Bruxelles, De Boeck, pp. 61-65.
- Attewell, J., Savill-Smith, C. (2003). *Mobile Learning and Social Inclusion: Focusing on Learners and Learning*. SLN Learning, United Kingdom.
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational Psychology, A Cognitive View*. New York: Holt, Rinehart and Winston
- Bachelard, G. (1969). *La formation de l'esprit scientifique*. Librairie philosophique J. Vrin, Paris.
- Beaufils, D., Durey, A., Journeaux, R., (1987). *La simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques ; quelques aspects didactiques*, in Modèles et simulation, Actes des 9e journées sur l'éducation scientifique, 507-514.
- Beaufils, D. (2001). « *Expérimentation d'une utilisation de logiciels de simulation comme aide à la consolidation des connaissances en physique*»; Rapport d'étude (septembre 1998-décembre 2000), IUFMV-Paris 11.
- Beaufils, D. et Richoux, B. (2003). *Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique*, Didaskalia, n°23, 9-38.

- Blumenfeld, P. C., et Marx, R. W., Krajcik, J. S., et Soloway, E. (1996). *Learning with peers: From small group cooperation to collaborative communities*. Educational Researcher. 25 (8), 37-40.
- Bodker, S. (1997). *Computers in mediated human activity*. Mind Culture and Activity, 4, 3, 149–158.
- Bransford, J. D., Brown, A. L., Cocking, R. R. (Eds.). (2000). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*. National Academy Press.
- Brooks, J. G. et Brooks, M. G. (1993), *In Search of Understanding. The Case for Constructivist Classrooms*. Alexandria, Virginia: Association for Supervision and Curriculum Development. (VII-136 p)
- Brown, T. (2003). *The role of m-learning in the future of e-learning in Africa*. Presented at the 21st ICDE World Conference. Retrieved 28, August 2012, from : <http://www.tml.hut.fi/Opinnot/T-110.556/2004/Materiaali/brown03.pdf>
- Brown, J. S., Collins, A., Duguid, P. (1989). *Situated Cognition and the Culture of Learning*. Educational Researcher, volume 18, number 1, 32-42.
- Brufee, K. A., (1993). *Collaborative Learning: Higher Education, Interdependence and the Authority of Knowledge*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.
- Buty, C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*, thèse, Lyon 2.
- Buty, C. (2003). *Richesses et limites d'un «modèle matérialisé »informatisé en optique*. Didaskalia, n°23, 39-63.
- Buty, C. et Cornuéjols, A. (2003). *Évolution des connaissances chez l'apprenant*. in Des connaissances naïves au savoir scientifique (Ed. Andrée Tiberghien)
- Calvin, S. (2004). *Following in Einstein's Footsteps: Teaching the Photoelectric effect*. The Physics Teacher. Vol.42.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge: MIT Press.
- Carey, S. (1999). *Sources of conceptual change*. In E. K. Scholnick, K. Nelson, S. A. Gelman et P. Miller (Eds.), *Conceptual development: Piaget's legacy* (pp. 293-326). Hillsdale: Erlbaum.

- Carlsen, D., et Andre, T. (1992). *Use of a microcomputer simulation and conceptual change text to overcome student preconceptions about electric circuits*. *Journal of Computer-based Instruction*, 19, 105–109.
- Carroll, J. (2000). *Making Use – Scenario-Based Design of Human-Computer Interactions*. The MIT Press, London.
- Chabra, T. Figueirido, J., (2001). *How to Design and deploy Handheld Learning*. Retrieved on 28, August 2011:
www.empoweringtechnologies.net/eLearning/eLearning_expov5_files/v3_document.htm
- Chauvet, F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception*. Thèse de doctorat. Paris VII
- Chi, M. T. H. (1992). *Conceptual change within and across ontological categories: examples from learning and discovery in science*. In R. N. Giere (Ed.), *Cognitive models of science* (pp. 129-186). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Chi, M. T. H. (1997). *Creativity: shifting across ontological categories flexibly*. In T. B. Ward, S. M. Smith & J. Vaid (Eds.), *Creative thought: an investigation of conceptual structures and processes* (pp. 209-234). Washington, DC: American Psychological Association.
- Chi, M. T. H. (2005). *Commonsense conceptions of emergent processes: why some misconceptions are robust*. *Journal of the Learning Sciences*, 14(2), 161-199.
- Chi, M. T. H. (2008). *Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift*. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 61- 82). New York, London: Routledge.
- Chi, M. T. H., Slotta, J. D. and de Leeuw, N. (1994). *From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts*. *Learning and Instruction*, 4: 27-43.
- Chinn, C. A. & Samarapungavan A. (2008). *Learning to use scientific models: Multiple dimensions of conceptual change*. In R. A. Duschl & R.E. Grandy (Eds.),

- Establishing a Consensus Agenda for K-12 Science Inquiry (pp. 191-225). Sense Publishers, Rotterdam, NL, 2006.
- Christian, W., Belloni, M. (2001). *Physlets: Teaching Physics with Interactive Curricular Material*. Prentice-Hall.
- Choi, B. S., et Gennaro, E. (1987). *The effectiveness of using computer simulated experiments on junior high students' understanding of the volume displacement concept*. *Journal of Research In Science Teaching*, 24, 539-552.
- Clements, D. H. et McMillen, S. (1996). *Rethinking "Concrete" Manipulatives*. *Teaching Children Mathematics*, 2(5), 270-279.
- Cobern, W (1993). *Contextual Constructivism: The impact of culture on the learning and teaching of science*. In: K. Tobin (Ed) *The Practice of Constructivism in Science Education*, pp 51-69, Lawrence-Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- Colella, V. (2000). *Participatory Simulation: Building collaborative understanding through immersive dynamic modeling*. *Journal of the Learning Sciences*, 9(4), 471-500
- Cuppari, A., Rinaudo, G., Robutti, O., et Violino, P. (1997). *Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum*. *Physics Education*, 32(5), 302-308.
- Curtis, D., et Lawson, M. (1999), *Collaborative on line learning: an exploratory case study*. HERDSA Annual International Conference, Retrieved July 15, 2012 from: <http://www.herdsa.org.au/branches/vic/Cornerstones/pdf/Curtis2.PDF>
- Cholmsky, P. (2003). *Why GIZMOS Work: Empirical Evidence for the Instructional Effectiveness of Explore Learning's Interactive Content*. Retrieved July 15, 2012 from: <http://www.explorelearning.com>
- Damon, W. et Phelps, E. (1989). *Critical distinctions among three approaches to peer education*. *International Journal of Educational Research*, 13(1), 9-19.
- Davier, D. Urhahne, H. Precht, M. Schenzer, M. Prenzel. (1999). *Self-regulation, motivation, learning preferences, and animations in a computer-based learning environment*, in: *Research in Science Education—Past, Present, Future*, IPN, Kiel.

- De Jong, T., et Van Joolingen, W. R. (1998). *Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains*. Review of Educational Research, 68, 179-201.
- De Vecchi, G., Giordan, A., *L'enseignement scientifique: comment faire pour que "ça marche"?*, Nice: Z'édicions, 1988.
- Dillenbourg, P. (1999). *Collaborative learning: cognitive and computational approaches*. In Dillenbourg, P. (Ed.). Pergamon, Elsevier Science.
- Dillenbourg, P., M. Baker, A. Blaye et C. O'Malley (1996). *The evolution of research of collaborative Learning*. Dans H. Spada et P. Reiman (dir.), Learning in Humans and Machines: Towards an Interdisciplinary Learning Science, Oxford, Elsevier, 189-211.
- Dillenbourg, P. et Schneider, D. (1995). *The Mechanisms of Collaborative Learning*. University of Geneva, Switzerland. Retrieved July 15, 2012 from http://tecfa.unige.ch/tecfa/research/CMC/colla/iccai95_4.html
- diSessa, A. A. (1982). *Unlearning aristotelian physics*. Cognitive Science, 6(1), 37-75.
- diSessa, A. A. (1988). *Knowledge in pieces*. In G. Forman et P. Pufall (Eds.), Constructivism in the computer age (pp. 49-70). Hillsdale: Erlbaum.
- diSessa, A. A. (1993). *Toward an epistemology of physics*. Cognition and Instruction, 10(2 et 3), 105-225.
- diSessa, A. A., et Sherin B. L. (1998) «*What Changes in Conceptual Change?* », International Journal of Science Education, vol.20, p.1155-1191.
- Driver, R. (1989). *Student's Conceptions and the Learning of Science*. International Journal of Science Education, vol. 11, p. 481-490.
- Driver, R., et Easley, J. (1978). *Pupils and paradigms*. Studies in Science Education, 5, 61-84.
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., et Wood-Robinson, V. (1994). *Making sense of secondary science: Research into children's ideas*. New York: Routledge.
- Driver, R. Asoko, H. Leach, J. Mortimer, E. Scott, P. (1994). *Constructing Scientific Knowledge in the Classroom*. Educational Researcher, Vol. 23, No. 7. pp. 5-12.

- Droui, M., Martial, O., Kébreau, S., Pierre, S. et Vázquez-Abad, J. (2010) « *Les technologies mobiles pour mieux comprendre l'apprentissage coopératif dans un cours de physique* », dans Utilisation des technologies pour la recherche sur l'éducation scientifique sous la direction de Riopel, M., Potvin, P. et Vázquez-Abad, J., Les Presses de l'Université Laval, Chapitre 4, p.79-110.
- Dufresne, R., Gerace, W., Leonard, W., Mestre, J. and Wenk. L. (1996). *Classtalk: A classroom communication system for active learning*. Journal of Computing in Higher Education, 7:3-47,.
- Duffy, T. M., et Cunningham, D. J. (1996). *Constructivism: Implications for the design and delivery of instruction*. In D. H. Jonassen (Ed.), Educational communications and technology (pp. 170-199). New York: Simon et Schuster Macmillan.
- Duit, R. (1991). *Students' conceptual frameworks: Consequences for learning science*. In Glynn, S. M., Yeany, R. H., and Britton B. K. (Eds.), The Psychology of Learning Science. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Duit, R. (1999) «*Conceptual Change Approaches in Science Education*», dans Wolfgang Schnotz, Stella Vosniadou et Maria Carretero (dir.), New Perspectives on Conceptual Change, New York, Pergamon, p. 263-282.
- Duit, R et Haeussler, P (1994) '*Learning and teaching energy*' In P Fensham, R Gunstone et R White (Eds) The content of science: A constructivist approach to its teaching and learning, London: The Falmer Press, pp 185-200.
- Duit, R. et Treagust, D. (2003). *Conceptual Change - A powerful framework for improving science teaching and learning*. International Journal of Science Education 25, 671-688.
- Durey, A., (1987). *Vers des activités didactiques de mise au point de modèle de physique avec des micro-ordinateurs. Exemples: trajectoires, frappes et rebonds de balles en rotation*, Thèse d'état.
- European Physics Education Network (EUPEN). (2000). *Inquiries into European higher education in physics*. Université Gent.

- Engeström, Y. (1987). *Comment on Blackler et al activity theory and the social construction of knowledge: a story of four umpires*. *Organization—the Interdisciplinary Journal of Organisation, Theory and Society Studies*, 7, 2, May 2000, 301–310.
- Feher, E., et Rice, K. (1988). *Shadows and anti-images: children's conception of light and vision II*. *Science Education*, 72(5), 637-649.
- Feher, E., et Rice, K. (1992). *Children's conception of color*. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 505-520.
- Fischler, H., et Lichtfeldt, M. (1992). *Modern physics and students' conceptions*. *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.
- Fleck, M., Frid, M., Kindberg, T., O'Brien-Strain, E., Rajani, R., and Spasojevic, M. (2002) *From informing to remembering: ubiquitous systems in interactive museums*, *Pervasive Computing*, 1(2), 13-21
- Fleer, M. (1992). *Identifying Teacher-Child Interaction which Scaffolds Scientific Thinking in Young Children*. *Science Education*, vol. 76, no4, and p. 373-397.
- Fleury, M. (1993). *Jeu informatisé et simulation en milieu scolaire: impact potentiel*. *Revue électronique ÉducaTechnologies*. Vol. 1. No. 2. Décembre 1993.
- Funderstanding. (2001). *Constructivism*. Consulté le Juillet 15, 2012 à: <http://www.funderstanding.com/constructivism.cfm>
- Fiolhais, C., et Trindade, J. A. (1998). *Use of Computers in Physics Education*, in: *Proceedings of the Euroconference'98—New Technologies of Higher Education*, Aveiro, Portugal.
- Forinash, K., et Wisman, R. (2001). *The viability of distance education science laboratories*. T. H. E Journal Online. Retrieved July 15, 2011 from <http://www.thejournal.com/magazine/vault/A3639.cfm>
- Gallas, K. (1995). *Talking their way into science: Hearing children's questions and theories, responding with curricula* (1 ed). New York: Teachers College Press.
- Galili I. (1996), *Students' conceptual change in geometrical optics*, *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, 847-868.

- Galili, I., Bendall, S., Goldberg, F. (1993). *The effect of prior knowledge and instruction on understanding image formation*. Journal of Research in Science Teaching, vol. 30 n° 3, p. 271-301.
- Grabe, M. et Grabe, C. (1996). *Integrating Technology for Meaningful Learning*. Boston: Houghton Mifflin Co.
- Gredler, M. (2004). *Games and simulations and their relationships to Learning*. In D. H. Jonassen (Ed.), Handbook of research for educational communications and technology (2nd edition)., Mahwah (NJ): Laurence Erlbaum Associates, p. 571-581.
- Gil, D., et Solbes, J. (1993). *The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science*. International Journal of Science Education, 15(3), 261-272.
- Gil, D. (1993). *Apprendre les sciences par une démarche de recherche scientifique*, Aster, vol.17, pp.41-64.
- Gilbert, J. and Boutler, C. (1998). *Learning science through models and modelling*. In B. Fraser and K. Tobin (eds), International Handbook of Science Education (Netherlands: Kluwer), 52-66.
- Giordan, A. (1989). *Vers un modèle didactique d'apprentissage allostérique*. Dans " construction des savoirs sous la direction de Bednarz, N et Garnier, C. colloque CIRADE. Agence d'Arc,inc.
- Giordan, A., et Martinand, J.-L. (1987), *Modèles et simulation*, Actes JIES 9, A. Giordan et J.-L. Martinand (éd).
- GOLDBERG F., MCDERMOTT L.(1986). *Student difficulties in understanding image formation by a plane mirror*. Physics Teacher, novembre 1986, pp. 472-480.
- Goldberg, F. McDermott, L. (1987). *An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror*. American Journal of Physics, Vol. 55 n° 2, pp.108-119.
- Gredler, M. (1996). *Educational games and simulations: A technology in search of a (research) paradigm*. In D. H. Jonassen (Ed.), Handbook of research for educational communications and technology (pp. 521-540). New York: Macmillan.

- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. and Smith, C. (1991) *Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts*. Journal of Research in Science Teaching, 28, 799–822.
- Gunstone, R. F. (1990). '*Children's science*': *A decade of developments in constructivist views of science teaching and learning*. Australian Science Teachers Journal, 36(4), 1990.
- Gutwin, C., Roseman, M., et Greenberg, S. (1996). *A usability study of awareness widgets in a shared workspace groupware system*. In Proceedings of ACM CSCW'96. Conference on Supported Cooperative Work. Boston, MA, ACM Press.
- Hake, R.R. (1998). *"Interactive-engagement vs traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses,"* Am. J. Phys. 66(1): 64-74.
- Hand, B., Treagust, D. F., et Vance, K. (1997). *Student perceptions of the social constructivist classroom*. Science Education, 81, 561-575.
- Harper, B., Squires, D. and McDougall, A. (2000). *Constructivist simulations in the multimedia age*. Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 9, 115-130.
- Harrison, A., Treagust, D. (2000). *A typology of school science models*. International Journal of Science Education, 22, 1011 (2000).
- Hasson R.; Manners J. (1995). *A CAL package for teaching elementary quantum mechanics*. Physics Education. 30 (1), 33-37.
- Hawkins, J., et Pea, R. D. (1987). *Tools for bridging everyday and scientific thinking*. Journal for Research in Science Teaching, 24(4), 291-307.
- Hebenstreit, J (1992). *Une rencontre du troisième type: simulation et pédagogie*. In G. -L. Baron et J. Baudé (Eds), Actes du Colloque L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants (pp. 80-87). Paris: INRP.
- Henri, F., Lundgren-Cayrol, K. (2001). *Apprentissage collaboratif à distance: pour comprendre et concevoir les environnements d'apprentissage virtuels*. Sainte-Foy (Québec, Canada): Presses de l'Université du Québec, 181 p.

- Hestenes, D. & Halloun, I. (1992). *Interpreting the FCI*. *The Physics Teacher*, 33, 502-506
- Hofstein, A. et Lunetta, V. N. (2003). *The Laboratory in science education: foundations for the twenty-first century*. National Association for Research in Science Teaching.
- Honebein, J. (1996) “*Seven Goals for the Design of Constructivist Learning*”, Retrieved July 11, 2011 from: http://cster.ed.uiuc.edu/JimL_Courses/edpsy490i/su01/readings/honebein.Htm
- Howse, M. A. (1998). *Student ecosystems problem solving using computer simulation*. Washington D. C.: Office of Educational Research and Improvement. (ERIC Document Reproduction Service No. ED419679).
- Hucke, L. et Fischer, H. E. (2002). *The link of theory and practice in traditional and in computer-based university laboratory experiments* In: D. Psillos et H. Niedderer (Eds.) *Teaching and learning in the science laboratory - A book based on the European Project "Labwork in Science Education"*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers
- Ireson, G. (1999). *A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena*. *European Journal of Physics*, 20(3), 193-199.
- Jimoyiannis, A., and V. Komis. 2001. *Computer Simulations in Physics and Learning: A Case Study on Students' Understanding of Trajectory Motion*. *Computers and Education*. 36: 183-204.
- Jipping, M., Dieter, S., Krikke, J., et Sandro, S. (2001). *Using handheld computers in the classroom: laboratories and collaboration on handheld machines*. In Proceedings of the 2001 SIGCSE Technical Symposium, SIGCSE Technical Bulletin. 33, (pp. 169–173). 1 Charlotte, North Carolina, United States.
- Johnson, D. W., et Johnson, F. P. (1987). *Joining together: Group theory and group skills* (3rd edition). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- Johnson, D. W., Johnson, F. P. (1995). *Teaching students to be peace makers*. Edina, MN, Interaction Book Company. International Editions
- Johnston, I. D., Crawford, K. et Fletcher, P. R. (1998). *Student difficulties in learning quantum mechanics*. *International Journal of Science Education*, 20 (4), 427-446

- Johsua S. et Dupin J. -J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, PUF, coll. Premier cycle, Paris.
- Johsua, S., Dupin, J. J. (1999). *Introduction à la Didactique des Sciences et des Mathématiques*. Paris, PUF. 2ème édition.
- Jonassen, D. H. (1994). *"Thinking technology: Toward a constructivist design model. "* Educational Technology Research and Development 34(4): 34-37
- Jonassen, D. H. (1995). *Computers as cognitive tools: Learning with technology, not from technology*. Journal of Computing in Higher Education, 6 (2), 40-73.
- Jonassen, D. Peck, K. et Wilson, B. (1999). *Learning with Technology: A Constructivist Perspective*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Jonassen, D. H. et Rohrer-Murphy, L. (1999). *Activity theory as a framework for designing constructivist learning environments*. Educational Technology Research et Development 47, 1, 61–79.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., et Stavrou, D. (2003). *An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts*. Science Education, 87(2), 257-280.
- Kelly, G. et Crawford, T. (1996). *Students' interaction with computer representation: Analysis of discourse in laboratory groups*. Journal of Research in Science Teaching, 33(7), 693-707.
- Kennepohl, D. (2001). *Using computer simulations to supplement teaching laboratories in chemistry for distance delivery*. Journal of Distance Education, 16(2), 58-65.
- Knight, R. (2004). *Five Easy Lessons: Strategies for Successful Physics Teaching*. Addison Wesley.
- Kreijns, K., Kirschner, P., et Jochems, W. (2002). *The sociability of computer-supported collaborative learning environments*. Educational Technology et Society, 5(1).
- Kovacevic, M.S. et Djordjevich, A. (2006). *A mechanical analogy for the photoelectric effect*. Physics Education . 41 (6), 551-555.

- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.
Traduction utilisée : Kuhn, T. S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- Kuutti, K., (1996). *Activity theory as a potential framework for human-computer interaction research*. In B. A. Nardi (Ed.), *Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction* (p. 27). Cambridge, MA: MIT.
- Lajoie, S. P., Lavigne, N. C., Guerrera, C. et Munsie, S. (2001). *Constructing knowledge in the context of BioWorld*. *Instructional Science*, 29, 155-186.
- Lakatos, I. (1970). *Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes, in Criticism and the Growth of Knowledge*, eds. Lakatos and Musgrave, Cambridge University Press.
- Laplante, B. (1997) «*Le constructivisme en didactique des sciences - dilemmes et défis*», *L'apprentissage et l'enseignement des sciences et des mathématiques dans une perspective constructiviste*, Éducation et francophonie, vol. 25, no1.
- Lara, J., et Alfonseca, M. (2001). *Using simulations and virtual reality for distance education*. In Ortega, M., Bravo, J., (Eds.), *Computers and Education, Towards an Interconnected Society*. Kluwer Academic Publishers, 199-206.
- Larochelle, M. et Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science. Itinéraires cognitifs d'étudiants et d'étudiantes*. Sainte-Foy, Canada: Presses de l'Université Laval.
- La Rosa, C., Mayer, M., Patrizi, P., et Vicentini-Missoni, M. (1984). *Commonsense knowledge in optics: Preliminary results of an investigation into the properties of light*. *European Journal of Science Education*, 6(4), 387-397.
- Lave, J. et Wagner, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. New York: Cambridge University Press.
- Lavoie, D. R., et Good, R. (1988). *The nature and use of prediction skills in a biological computer simulation*. *Journal of Research in Science Teaching*, 25, 335- 60.
- Lazarowitz, R., et Huppert, J. (1993). *Science process skills of 10th-grade biology students in a computer-assisted learning setting*. *Journal of Computing In Education*, 25, 366-382.

- Lederman, L. M. (1998). *ARISE: American Renaissance in Science Education*, FERMILAB-TM-2051, 1998.
- Legendre, M. -F. « *Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement* ». Dans Rodolphe Toussaint (dir). *Changement conceptuel et apprentissage des sciences: recherche et pratiques* (p. 177-203). Montréal: Éditions Logiques. 2002
- Lemke, J. L. (1990). *Talking science: Language, learning and values*. Norwood: Ablex Publishing Company.
- Leont'ev, A. N. (1981). *The problem of activity in psychology*. In J. V. Wertsch (Ed.), *Activity in soviet psychology* (pp. 37–71). M. E. New York: Sharpe, Inc.
- Linn, M. C. (2003). *Technology and science education: starting points, research programs, and trends*. *International Journal of Science Education*, 26, 6.727-758.
- Linn, M. C., and Hsi, S. (2000). *Computers, teachers, peers: science learning partners*. Mahwah, NJ, Lawrence Erlbaum Associates.
- Linn, M. C., et Burbules, N. C. (1993). *Construction of knowledge and group learning*. In K. G. Tobin (Ed.), *The practice of constructivism in science education*, (pp. 91-119). Washington, DC: American Association for the Advancement of Science (AAAS) Press.
- Lin, X., Hmelo, C., Kinzer, C. K. et Secules, T. J. (1999). *Designing technology to support reflection*. *Educational Technology Research et Development*, 47(3), 43-62.
- Luchini, K., Quintana, C., Krajcik, J., Farah, C., Nandihalli, N., Reese, K., Wiczorek, A., et Soloway, E. (2002). *Scaffolding in the small: designing educational supports for concept mapping on handheld computers*. In *Human Factors in Computing Systems: CHI 2002 Extended Abstracts*, Minneapolis, MN. ACM Press.
- Maor, D. et Taylor, P. C. (1995). *Teacher epistemology and scientific inquiry in computerised classroom environments*. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, 839-854.
- Marks, G. H. (1982). *Computer simulations in science teaching: An introduction*. *The journal of computers in Mathematics and Science Teaching*, 1(4),18-20.

- Martinand, J.-L. (1992). *Présentation*. In J.-L., Martinand (coord.). Enseignement et Apprentissage de la modélisation en sciences. Paris : INRP, p. 7-22.
- Martinand, J.-L. (2002). *Apprendre à modéliser*. Dans Rodolphe.M.J. Toussaint “ changement conceptuel et apprentissage des sciences- Recherches et pratiques”. Les éditions logiques inc.
- Mashhadi, A. (1996). *Students' conceptions of quantum mechanics*. In G. Welford, J. Osborne et P. Scott (Eds.), Research in science education in Europe: current issues and themes (pp. 254-265). London: FalmerPress.
- Matthews, M. R. (1992), '*Constructivism and the Empiricist Legacy*'. In M. K. Pearsall (Ed.) Scope, Sequence and Coordination of Secondary School Science: Relevant Research, National Science Teachers Association, Washington, DC, pp. 183-196.
- Mazur, E. (1997). *Peer instruction: A user's Manual*, Prentice Hall, upper Saddle River, NJ
- Mayer, R. E. (1993). *Illustrations that instruct*. In R. Glaser (Ed.), Advances in instructional psychology. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- McIntyre, T. (1998). *A study of Internet use in undergraduate Physics teaching at the University of Queensland*, ED500 Report, Dept. Physics, Univ. of Queensland.
- McIsaac, M. S. et Gunawardena, C. N. (1996). *Distance education*. In D. H. Jonassen, (Ed.), Handbook of research for educational communications and technology: a project of the Association for Educational Communications and Technology (pp. 403-437). New York: Simon et Schuster Macmillan.
- McKinney, W. J. (2001). *The educational use of computer based science simulations: some lessons from the philosophy of science*. Science et Education, 6, 591-603.
- McKagan, S. B., Handley, W., Perkins, K. K. And Wieman, C. E. A. (2009) *Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect*, American Journal of Physics: Volume 77, Issue 1, Pages 87-94
- McLean, N., (2003). *The M-learning Paradigm: an Overview*. Retrieved 30, Aout 2011 from: <http://www.oucs.ox.ac.uk/ltg/reports/mlearning.doc>
- McRobbie, C. et Tobin, K. (1997). *A social constructivist perspective on learning environments*. International Journal of Science Education, 19, 193-208.

- Milrad, M., (2004). *Mobile Learning: Challenges, Perspectives and Reality*. Retrieved 30, August 2011 from: http://21st.century.phil-inst.hu/vol2_milrad.pdf
- Milrad, M. (2006). *How should learning activities using mobile technologies be designed to support innovative educational practices?* Slides from the presentation given at the “Big Issues in Mobile Learning Workshop”, Nottingham June 1st, 2011. <http://w3.msi.vxu.se/~mmilrad/Kaleidoscope/Milrad.pps>
- Ministère de l'Éducation de Québec. (1998). 200.B0. Sciences de la nature, description du programme menant au diplôme d'études collégial, Gouvernement du Québec, 102 p.
- Mintz, R. (1993). *Computerized simulation as an inquiry tool*. *School Science and Mathematics*, 93(2), 76-80.
- Mwanza, D. (2001). *Changing tools, changing attitudes: effects of introducing a CSCL system to promote learning at work*. Proceedings of the Euro-CSCL 2001: 1st European Conference on Computer-Supported Collaborative Learning (pp. 470–477), Maastricht, The Netherlands.
- Nardi, B. A. (1996). *Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction*. Cambridge: MIT Press. Cambridge, MA: MIT Press.
- Naismith, L., Lonsdale, P., Vavoula, G., and Sharples, M.(2005). *Literature Review in Mobile Technologies and Learning*. Retrieved 30, August, 2011 from: http://www.futurelab.org.uk/resources/documents/lit_reviews/Mobile_Review.pdf
- National Science Education Standards,(1996). National Academy Press, Washington, DC, Page 2.
- Nersessian, N. J. (1992). *How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science*. In R. N. Giere (Ed.), *Cognitive models of science* (pp. 3–44). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Nersessian, N. J. (1995). *Constructive modeling in creating scientific understanding*. *Science Education*, 4, 203–226.
- Niaz M. (1995). *Cognitive conflict as a teaching strategy in solving chemistry problems : a dialectic - constructivist perspective*. *Journal of research in science teaching*, vol. 32, n° 9, pp. 959-970.

- Njoo M. & DE JONG T. (1993). *Exploratory learning with a computer simulation for control theory : Learning processes and instructional support*. Journal of research in science teaching, vol. 30, n° 6, pp. 821-844.
- Novak, J. D. (1977). *An alternative to Piagetian psychology for science and mathematics education*. Science Education, 61(4): 453-477.
- Novak, J. D. (1985). *Application of advances in learning theory and philosophy of science to the improvement of higher education*. HERDSA News, 7(1): 7-14
- The Open and Distance Learning Quality Council (2005). *A Definition of E-Learning*, Retrieved 30, August 2011 from: <http://www.odlqc.org.uk/odlqc/n19-e.htm>
- Olenick, P. S. (2005), *Comprehensive Conceptual Curriculum for Physics (C3P) Project* at: <http://phys.udallas.edu/>
- Olsen, R. V. (2002). *Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway*. International Journal of Science Education, 24(6), 565-574.
- O'Malley, C., Vavoula, G., Glew, J., Taylor, J., Sharples, M. et Lefrere, P. (2003). *Guidelines for learning/teaching/tutoring in a mobile environment*. Mobilelearn project deliverable. Available from <http://www.mobilelearn.org/download/results/guidelines.pdf>, last accessed 27th August 2011.
- Osborne, J., et Squires, D. (1987). *Learning science through experiential software*. In J. Novak (Ed.), Proceedings of the Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Vol. 1 (pp. 373–380). Ithaca, NY: Cornell University.
- Oxford, R. (1997). *Cooperative Learning, Collaborative Learning, and Interaction : Three Communicative Strands in the Language Classroom*. The Modern Language Journal, 81 (iv), 443-456.
- Padilla, M. J., Okey. J. R., Dillashaw. F. G. (1983). *The relationship between science process skill and formal thinking abilities*. Journal of Research in Science Teaching, 20, 239-246.

- Paulsen, M.F, Keegan, D., Dias, A., Dias, P., Pimenta, P., Fritsch, H., Föllmer , H., Micincova, M., Olsen, G. (2002). *Web-Education Systems in Europe*. Ziff Papiere, 118. FernUniversität . Hagen,ISSN1435-9340, pg. 23
- Perkins, D. (1991). *Educating for insight*. *Educational Leadership*, 49, 4-8. [EJ 432 771]
- Pea, R. D. (1993c). *Learning scientific concepts through material and social activities: Conversational analysis meets conceptual change*. *Educational Psychologist*, 28(3), 265-277
- Perkins, D. N., et Simmons, R. (1988). *Patterns of misunderstanding: An integrative model for science, math, and programming*. *Review of Educational Research*, 58, 303–326.
- Piaget, J. (1970). *L'épistémologie génétique*. Paris. Presse Universitaire Francaise.
- Pintrich, P. R., Marx, R. W., et Boyle, R. A. (1993). *Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change*. *Review of Educational Research*. 63(2), 167-199.
- Pospiech, G. (2000). *Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics*. *Physics Education*, 35(6), 393-399.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., et Gertzog, W. A. (1982). *Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change*. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Potvin, P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*. Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- Prawat, R. S. (1993) *The value of ideas: Problems versus possibilities in learning*. *Educational Researcher*, 22 (6), pp. 5-16
- Proctor, N., and Tellis, C. (2003) *The state of the art in museum handhelds in 2003*. Retrieved August, 2011 <http://www.archimuse.com/mw2003/papers/proctor/proctor.html>
- Quinn, C. (2000) *mLearning: Mobile, Wireless, InYour -Pocket Learning*. Retrieved August, 2011 from: <http://www.linezine.com/2.1/features/cqmmwiyp.htm>

- Quinn, Z., Johnson, D. W., et Johnson, R. T. (1995). *Cooperative versus competitive efforts and problem-solving*. *Review of Educational Research*, 65(2), 129-143.
- Rebello, N. S. and Zollman D. (1999). *Conceptual understanding of quantum mechanics after using Hands-on and visualization instructional materials*. Presented at the Annual Meeting National Association For Research in Science Teaching (March 1999)
- Reiner, M. (1992). *Patterns of thought on light, and underlying commitments*. In R. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (pp. 99-109).
- Repman, J. et Logan, S. (1996). *Interactions at a Distance : Possible Barriers and Collaborative Solutions*. *TechTrends*, November/December, 35-38.
- Richoux B., Salvétat C. et Beaufile D. (2002). *Simulation numérique dans l'enseignement de la physique: enjeux, conditions*, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°842, 497-522.
- Riopel, M. (2005). *Conception et mises à l'essai d'un environnement d'apprentissage intégrant l'expérimentation assistée par ordinateur et la simulation assistée par ordinateur*. Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- Robblee, K. M., Garik, P. and Abegg, G. (1999). *Using computer visualization to teach quantum science on pedagogical content knowledge*. Presented at NARST 99.
- Robles, A. (1997). *La vidéo comme support didactique en physique. Interprétation microscopique d'un phénomène macroscopique : la propagation du son*. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, juillet 1997.
- Robardet G. et Guillaud J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris, PUF.
- Rogers, Y., et Price, S. (2004). *Playing and Learning in Digitally-Augmented Physical Worlds*. In M. Tokoro et L. Steel (Eds.), *A Learning Zone of one's own: Sharing Representations and Flow in Collaborative Learning Environments*. Amsterdam: IOS Press.
- Rogoff, B. (1990). *Apprenticeship in thinking*. New York: Oxford University Press.

- Ronen M., Bat-Sheva E., Rivlin O., Ganiel U.,(1993). *Designing and using an open graphic interface for instruction in geometrical optics*, Computer Education, Vol 20, n°4,299-309.
- Roschelle, J., Pea, R., Hoadley, C., Gordin, D., et Means, B. (2000). *Changing how and what children learn in school with computer-based technologies*. The Future of Children, 10(2), 76-101.
- Roth, W. -M. (1995). *Authentic school science: Knowing and learning in open-inquiry science laboratories*: Kluwer Academic publishers.
- Roth, W. M., Roychoudhury. A. (1993).*The development of science process skill in authentic context*. Journal of Research in Science Teaching, 30, 127-152.
- Sadler, P. M., et al. (1999). Visualization and Representation of Physical Systems: Wavemaker as an Aid to Conceptualizing Wave Phenomena. Journal of Science Education and Technology, 8, 197-209.
- Salomon G and Globerson T (1987). *Skill may not be enough: The role of mindfulness in learning and transfer*. International Journal of Educational Research 11(6) 623-637.
- Salomon, G. (1998). *Novel constructivist learning environments and novel technologies: some issues to be concerned with*. Learning and Instruction, Volume 8(1), 3-12.
- Saxena, A. B. (1991). *The understanding of the properties of light by students in India*. International Journal of Science education, 13, 3, 283-289.
- Schunk, D. H. (2004). *Learning Theories: An Educational Perspective (pp 136-189)*. Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Scott, S. D., Shoemaker, G. B. D., et Inkpen, K. M. (2000).*Towards seamless support of natural collaborative interactions*.In Proceedings of Graphics Interface (pp. 103–110).May, Montreal, Canada.
- Sharples, M. (2003). *Disruptive Devices: Mobile Technology for Conversational Learning*. International Journal of Continuing Engineering Education and Lifelong Learning, 12, 5/6, pp. 504-520
- Sharples, M. (2006). *How can we address the conflicts between personal informal learning and traditional classroom education?* In Big Issues in Mobile Learning. Report of a

- workshop by the Kaleidoscope Network of Excellence. Mobile Learning Initiative. Edited by Mike Sharples. University of Nottingham.
- Sharples, M., Taylor, J., and Vavoula, G. (2005). *Towards a Theory of Mobile Learning*. Proceedings of mLearn 2005 Conference, Cape Town.
- Shneuwly, B. et Bronckart, J. P., (1985). *Vygotski aujourd'hui* (pp. 95-117); Paris: Delachaux et Niestlé.
- Slavin, R. E. (1990). *Cooperative learning: Theory, research and practice*. Prentice Hall
- Slotta, J. (2002). *Designing the web-based inquiry science environment (wise)*. Educational Technology, September, 15-20.
- Solomon, J. (1987). *Social influences on the construction of pupil's understanding of science*. Studies in Science Education, 14, 63-82.
- Stanton, D., et Neale, H. (2002). *Designing mobile technologies to support collaboration*. (Technical Report Equator-02-028). Equator, Available at: <http://www.equator.ac.uk/papers/Abstracts>.
- Stone A., Briggs J., Smith C.: *SMS and Interactivity – Some Results from the Field, and its Implications on Effective Uses of Mobile Technologies in Education*, Proc. of IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies in Education (WMTE 2002), (p. 147-151), Växjö, Sweden, August 2002.
- Strauss, R., and Kinzie, M. B., (1994). *Student achievement and attitudes in a pilot study comparing an interactive videodisc simulation to conventional dissection*. American Biology Teacher 56, 398–402.
- Steinberg, R. N., Oberem, G. E., and McDermott, L. C. (1996). *Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect*, Am. J. Phys. 64, 1370.
- Steinberg, R. N., Wittmann, M. C., Bao, L., et Redish, E. F. (1999). *The influence of student understanding of classical physics when learning quantum mechanics*. Article présenté à la conférence 'NARST 99'.
- Taber, K. S. et Watts, M. (1997). *Constructivism and concept learning in chemistry- Perspectives from a case study*. Research in Education, 58, 10-20.

- Taber, K. S. (2002). *Conceptualizing quanta - illuminating the ground state of student understanding of atomic orbitals*. Chemistry Education: Research and Practice in Europe, 3, 145-158.
- Taylor, P. C. S., Fraser, B. J., et White, L. R. (1994). *A classroom environment questionnaire for science educators interested in the constructivist reform of school science*. A paper presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Anaheim, CA.
- Taylor, J., Sharples, M., O'Malley, C., Vavoula, G. et Waycott, J. (2006). *Towards a task model for mobile learning: a dialectical approach*. Available from <http://kn.open.ac.uk/public/document.cfm?docid=5374>.
- Thomas, R., et Hooper, E. (1991). *Simulations: An opportunity we are missing*. Journal of Research on Computing in Education, 23, 497-513.
- Tiberghien, A. (1994). *Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations*. Learning and Instruction, vol. 4. 71-87.
- Tobin, K. (1990). *Social constructivist perspectives on the reform of science education*. Australian Science Teachers Journal, 36(4), 29-35
- Tobin, K. et Tippins, D. J. (1993). *Constructivism as a referent for teaching and learning*. In Tobin, K. (Ed.), The practice of constructivism in science education. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum et Associates. Chapter 1, 3-21.
- Torres, S.E. et Garcia, J. J. (1997). *Los suelos en la enseñanza de la teoría ácido-base de Lewis. Una estrategia didáctica de aprendizaje por investigación*. Enseñanza de las ciencias, vol. 15, n° 1, pp. 59-71.
- Toulmin, S. (1972). *Human understanding*. Princeton University Press. New Jersey.
- Traxler, J. (2005). *Mobile Learning: It's here but what is it?* Available At: <http://www2.warwick.ac.uk/services/cap/resources/interactions/archive/issue25/traxler/>
- Trifanova A., Ronchetti M., (2003). *A General Architecture for M-learning*. Retrieved 30, August 2007 from: <http://www.dit.unitn.it>

- Ulrich, H. (2006). *How can we integrate mobile devices with broader educational scenarios?* In M. Sharples (Ed.), *Big issues in mobile learning: Report of a workshop by the Kaleidoscope Network of Excellence Mobile Learning Initiative* (31-34). Nottingham: University of Nottingham.
- Vergnaud, G. (2000). *Lev Vygotski pédagogue et penseur de notre temps*. Paris Hachette Education.
- Vermersch P. (1994). *L'Entretien d'explicitation en formation continue et initiale*. Paris, ESF.
- Vermersch P., Maurel M. (1997). *Pratiques de l'entretien d'explicitation*. Paris, ESF.
- Viennot, L., (1996). *Raisonnement en physique (la part du sens commun)*, Paris, Bruxelles : De Boeck Université.
- Vosniadou, S. (1994). *Capturing and modeling the process of conceptual change*. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Vosniadou, S. (2002). *On the nature of naïve physics*. In M. Limón et L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change* (pp. 61-76). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Vosniadou, S., et Ioannides, C. (1998) «*From Conceptual Development to Science Education: a Psychological Point of View*», *International Journal of Science Education*, vol. 20, p. 1213-1230.
- Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A., Papademetriou, F. (2001). *Designing Learning Environments to Promote Conceptual Change in Science*. *Learning and Instruction* 11 (2001) 381–419.
- Vygotsky, L. (1978). *Mind in Society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Vygotsky, L. (1981). *The development of higher forms of attention in childhood*. In J. V. Wertsch (Ed.), *The concept of activity in Soviet psychology*. Armonk, N. Y.: Sharpe.
- Vygotsky, L. (1997). *Pensée et langage*. (F. Sève, Trans.). La dispute. Paris.

- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., et Novak, J. D. (1994), *Research on alternative conceptions in science*, dans Handbook of research on science teaching and learning sous la direction de D. L. Gabel, New York, Macmillan, 1994, pp. 177-210.
- Wegerif, R. et Mercer, N. (1996). *Computers and reasoning through talk in the classroom*. Language and Education, 10, 1: 47- 64.
- Wetherill, Karen, Carol Midgett et Marguerite McCall. (2002). *Determining the Impact of Applet-Based Instructional Materials on Teacher Knowledge of Content and Pedagogy, Instructional Planning, and Student Learning of Fractions*. University of North Carolina at Wilmington. Retrieved July 10, 2011 from: <http://illuminations.nctm.org/downloads/UNCWrschReport.pdf>
- White, B., et Frederiksen, J. (2000). *Technological tools and instructional approaches for making scientific inquiry accessible to all*. In M. Jacobson and R. Kozma (Eds.), *Innovations in Science and Mathematics Education: Advanced Designs for Technologies of Learning* (pp. 321-359). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wilensky, U., et Stroup, W. (2000). *Networked gridlock: Students enacting complex dynamic phenomena with the HubNet architecture*. Paper presented at the Fourth Annual International Conference of the Learning Sciences, Ann Arbor, MI.
- Williams, G. (2004). *Photoelectric effect can be memorable without being expensive*. Physics Education. 39(2), 132-134.
- Wilson, S. W. (1996). *Explore/exploit strategies in autonomy*. In From Animals to Animats 4. Proceedings of the 4th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, pages 325-332.
- Wilson, B. G., Jonassen, D. H., et Cole, P. (1993). *Cognitive approaches to instructional design*. In G. M. Piskurich (Ed.), *The ASTD handbook of instructional technology* (pp. 21. 1-21. 22). New York: McGraw-Hill.
- Windschitl, M. et Andre, T. (1998). *Using computer simulations to enhance conceptual change: The roles of constructivist instruction and student epistemological beliefs*. Journal of Research in Science Teaching, 35(2), 145-160.

- Windschitl, M. (2000). *Supporting the development of science inquiry skills with special classes of software*. Educational Technology Research et Development, 48, 81-95.
- Winer, L. R., Chomienne, M., Vázquez-Abad, J. (2000). *A distributed collaborative science learning laboratory on the Internet*. The American Journal of Distance Education, 14, 47-61.
- Winn, W. D. (1993). *A constructivist critique of the assumptions of instructional design*. In T. Duffy, J. Lowyck, et D. Jonassen (Eds.), *Designing environments for constructive learning*. New York: Springer.
- Winters, N. (2006). *What is mobile learning?* In *Big Issues in Mobile Learning*. Report of a workshop by the Kaleidoscope Network of Excellence. Mobile Learning Initiative. Edited by Mike Sharples. University of Nottingham.
- Wosilat, K., Heron, P. R. L., Shaffer, P. S., and McDermott, L. C. (1998). *Development and assessment of a research-based tutorial on light and shadow*, American Journal of Physics. 66 (10), 906-913.
- Zietsman, A. I., et Hewson, P. W. (1986). *Effect of instruction using microcomputer simulations and conceptual change strategies on science learning*. Journal of Research in Science Teaching, 23, 27-39.
- Zollman, D. A., Rebello, N. S., et Hogg, K. (2002). *Quantum mechanics for everyone: hands-on activities integrated with technology*. American Journal of Physics, 70(3), 252-259.
- Zurita, G. and Nussbaum, M. (2004). *Computer supported collaborative learning using wirelessly interconnected handheld computers*, Computers and Education, 42, 289-314
- Zurita, G. and Nussbaum, M. (2007). *A conceptual framework based on Activity Theory for mobile CSCL*, British Journal of Educational Technology, 38 (2), 211-235.

ANNEXES

ANNEXE I

Objectifs, standards et activités d'apprentissage concernant l'objectif 00UT (Ministère de l'éducation de Québec 1998, p. 73)

<i>CODE : 00UT</i>	
<i>OBJECTIF</i>	<i>STANDARD</i>
<p><i>Énoncé de la compétence</i> <i>Analyser différentes situations ou phénomènes physiques reliés aux ondes, à l'optique et à la physique moderne à partir de principes fondamentaux.</i></p> <p><i>Éléments</i> <i>1. Appliquer les principes de base de la physique à la description des vibrations, des ondes et de leur propagation.</i> <i>2. Appliquer les lois de l'optique géométrique.</i> <i>3. Appliquer les caractéristiques des ondes aux phénomènes lumineux.</i> <i>4. Analyser quelques situations à partir de notions de la physique moderne.</i> <i>5. Vérifier expérimentalement quelques lois et principes reliés aux ondes, à l'optique et à la physique moderne.</i></p>	<p><i>Critères de performance</i> <i>1. Utilisation appropriée des concepts, des principes et des lois.</i> <i>2. Schématisation adéquate des situations physiques.</i> <i>3. Représentation graphique adaptée à la nature des phénomènes.</i> <i>4. Justification des étapes retenues pour l'analyse des situations.</i> <i>5. Application rigoureuse des principaux modèles.</i> <i>6. Jugement critique des résultats.</i> <i>7. Interprétation des limites des modèles.</i> <i>8. Expérimentation minutieuse.</i> <i>9. Rédaction de rapports de laboratoire selon les normes établies.</i></p>
<i>ACTIVITÉS D'APPRENTISSAGE</i>	
<p><i>Champ d'études : Sciences de la nature</i> <i>Discipline : Physique</i> <i>Pondération : 3-2-3</i> <i>Nombre d'unités : 2^{2/3}</i> <i>Précisions</i> <i>Cinématique et dynamique des vibrations.</i> <i>Ondes longitudinales et transversales.</i> <i>Ondes progressives et stationnaires, résonance.</i> <i>Ondes sonores.</i> <i>Éléments de physique moderne.</i> <i>Optique géométrique et physique.</i></p>	

ANNEXE II : Questionnaire pour prétest et post-test

Nom : _____ Date : _____

Choisissez la réponse que vous jugez la plus proche de votre conception

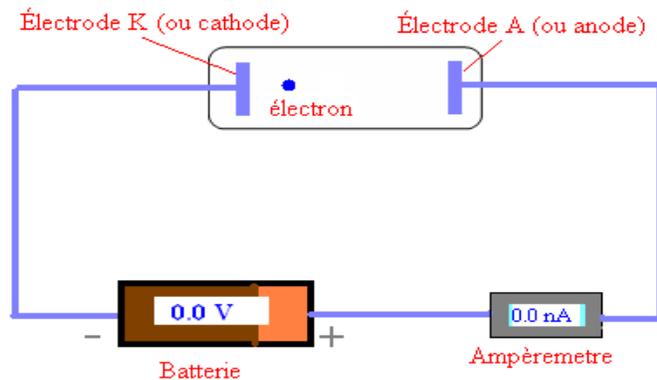
1. Si on augmente la valeur de fréquence de la lumière :

- L'amplitude de la lumière augmente aussi.
- La vitesse de la lumière augmente aussi.
- L'énergie de la lumière augmente aussi.
- La longueur d'onde augmente aussi.
- Aucune de ces réponses.
- Je ne sais pas.

2. L'énergie d'extraction d'un métal est :

- La quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la chaleur de 1 cm^3 de ce métal par 1 degré C .
- La quantité d'énergie produite par le courant d'électrons émis par une surface.
- La quantité d'énergie nécessaire pour produire 1 kg de métal pur à partir de minerai.
- La quantité d'énergie nécessaire pour enlever un électron de la surface du métal.
- Aucune de ces réponses.
- Je ne sais pas.

3. On considère le circuit électrique suivant, qu'est ce qui se passe pour les électrons si la tension de la batterie varie de 0V jusqu'à $+5\text{V}$?



- Il n'y aura plus d'émission des électrons.
- Il y aura un ralentissement du mouvement des électrons lorsqu'ils s'approchent de l'anode.
- Il y aura une accélération du mouvement des électrons lorsqu'ils s'approchent de l'anode.
- Aucune de ces réponses.
- Pas de changement.
- Je ne sais pas.

4. Nous avons une lumière rouge qui illumine le métal. Si on change la fréquence de la lumière de telle façon qu'on obtienne la couleur violette (avec la même intensité lumineuse), quel est l'effet sur la quantité d'électrons qui sortent ?

- a) Moins d'électrons éjectés.
- b) Même nombre d'électrons.
- c) Plus d'électrons émis.
- d) Pas assez d'informations pour répondre.
- e) Je ne sais pas.

5. La lumière est définie comme :

- a) Une pression transmise dans un milieu parfaitement élastique.
- b) Une onde électromagnétique longitudinale dont la propagation est rectiligne.
- c) Des fines particules porteuses d'une quantité élémentaire d'énergie qui dépend de l'amplitude.
- d) Une onde électromagnétique transversale dont la propagation est rectiligne.
- e) Un ensemble de particules porteuses d'une quantité élémentaire d'énergie qui dépend de la fréquence.
- f) Aucune de ces réponses.
- g) Je ne sais pas.

6. Qu'est-ce que vous visualisez quand vous pensez à un photon voyageant dans l'espace ?

- a) Une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se propage en ligne droite.



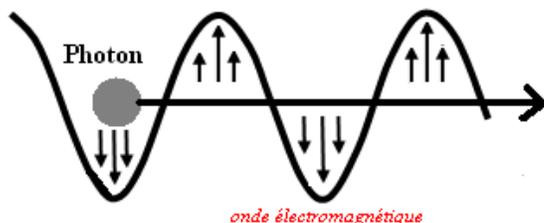
- b) Une particule de lumière avec une énergie spécifique voyageant le long d'une trajectoire sinusoïdale.



- c) Une faible parcelle (paquet) des ondes électromagnétiques avec une certaine quantité d'énergie voyageant le long d'une ligne droite.



- d) Une particule de lumière avec une énergie spécifique qui se déplace à côté une onde électromagnétique.



- e) Aucune de ces réponses.
- f) Je ne sais pas.

7. Une plaque métallique reliée à un électroscope est éclairée par une lumière ultraviolette. Laquelle de ces propositions est vraie ?

- a) Si l'électroscope est initialement chargé positivement, il se décharge.
- b) Si l'électroscope est initialement chargé négativement, il se décharge.
- c) Rien ne se passe.
- d) Les deux propositions a) et b).
- e) Aucun des propositions mentionnées ci-dessus.
- f) Je ne sais pas.

8. On considère que l'intensité de la lumière reste constante. Si on augmente la valeur de la fréquence de la lumière,

- a) Le potentiel d'arrêt reste invariable.
- b) Le potentiel d'arrêt augmente.
- c) Le potentiel d'arrêt diminue.
- d) Aucun des propositions mentionnées ci-dessus.
- e) Je ne sais pas.

9. On considère le circuit électrique de la question 3. Si l'électrode K est éclairé par la lumière, la valeur de la fréquence seuil dépend de

- a) La nature du métal qui constitue l'électrode K.
- b) L'énergie de la lumière.
- c) L'intensité du courant électrique produit.
- d) La valeur de la tension de la batterie.
- e) Aucun des propositions mentionnées ci-dessus.
- f) Je ne sais pas.

10. Le terme « photoélectrons » se réfère :

- a) Aux électrons émis par une surface en raison de son éclairage à la lumière.
- b) Aux électrons, qui sont utilisés pour bombarder une surface afin de produire la lumière.
- c) À une particule dans la nature qui a certaines caractéristiques d'un électron et certaines caractéristiques d'un photon.
- d) Aux particules de lumière qui sortent de la surface lorsqu'elle est chauffée par la circulation d'un courant électrique qui la traverse.
- e) Aucune des catégories précitées.
- f) Je ne sais pas.

ANNEXE III

L'effet photoélectrique

Situation d'apprentissage et d'évaluation utilisant un simulateur de
« l'effet photoélectrique »



L'effet photoélectrique

Introduction

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau, généralement métallique lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée. Cette fréquence dépend du matériau, alors que le nombre des électrons émis, qui détermine l'intensité du courant électrique produit, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse. Ce phénomène a été découvert en 1887 par le physicien allemand **Heinrich Rudolf Hertz**.

Philip Lenard (1902) a répété l'expérience d'Hertz avec des appareils semblables en mettant à l'essai l'influence de plusieurs facteurs (tension, fréquence, intensité lumineuse et la nature de métal) sur le courant électrique produit par la lumière (circuit). Non seulement leurs résultats appuyaient-ils les théories de **Planck (1900)**, mais ils fournissaient aussi les fondements de l'analyse d'Einstein sur l'effet photoélectrique.

Einstein était bien au fait de ces nouvelles expériences et de l'hypothèse du corps noir de Planck (1900). Il connaissait aussi la théorie atomique de la lumière de **Newton**, dont il a retenu certains aspects pour avancer une hypothèse audacieuse sur la nature de la lumière pour expliquer certains résultats d'expériences portant sur l'effet photoélectrique, tout en prévoyant de nouveaux effets. Cette introduction du nouveau modèle de la lumière était considérée par Einstein comme sa contribution la plus révolutionnaire et fut la moins bien acceptée par ses contemporains. Pourtant c'est elle, et non la relativité, qui devait valoir à Einstein le prix Nobel de physique en 1922 !

Objectif

L'étude de l'expérience de l'effet photoélectrique vous présente une opportunité importante pour acquérir la compétence d'analyser un phénomène physique relié à la physique moderne à partir de principes fondamentaux. Elle vous présente également une occasion d'appliquer une démarche scientifique en faisant appel aux concepts, aux lois et aux principes de la physique. De plus, elle peut vous mener à une redécouverte guidée, à une amélioration de votre compétence d'analyser les graphiques et à une meilleure communication scientifique.

Mise en situation

L'énergie solaire est une ressource importante comme ressource alternative à d'autres formes d'énergie. Cette énergie peut être transformée en énergie électrique par l'intermédiaire des plaques solaires. L'effet photoélectrique constitue le processus de base de cette transformation. On vous demande de trouver une explication à ce phénomène en vous basant sur la nature quantique de la lumière.

Vous êtes appelés à rédiger un compte rendu qui présente **les observations de l'effet photoélectrique** que la théorie classique ne pouvait pas expliquer et en **proposant un modèle de la lumière** qui peut expliquer ces observations ainsi que la **démarche choisie ou suivie**. Afin de préparer adéquatement votre travail; on met à votre disposition deux vidéos pour la mise en évidence de l'effet photoélectrique et un simulateur qui vous permet de varier plusieurs facteurs (tension, fréquence, intensité lumineuse et la nature de métal) et d'explorer l'effet de la modification de ces paramètres sur le courant des photoélectrique.

Vous êtes tenus de travailler en **collaboration dans des équipes de trois étudiants**. On vous laisse la liberté de choisir la démarche qui vous convient pour vous organiser et effectuer cette tâche.

Finalement, votre texte devra être composé d'une petite introduction, d'une partie pour la description de la démarche choisie, d'une partie pour l'explication du phénomène (différentes observations, modèle de la lumière) et d'une conclusion.

Exemple d'une démarche suivie

- Vos devez travailler en équipe de trois personnes. Chaque équipe choisit un métal (Cu, Zn ou Na).
- Faites vos prédictions sur le comportement de la lumière lorsqu'elle interagit avec un métal (Zn, Cu ou Na), en vous basant sur la théorie ondulatoire de la lumière. (Document 1).
- Identifiez les variables qui peuvent influencer l'émission des électrons par un métal lorsqu'il est exposé à la lumière.
- Vérifiez vos prédictions et notez vos observations en variant les différents facteurs qui peuvent influencer le courant électrique résultant et en utilisant les deux vidéos 1 et 2 ainsi que le simulateur. (Document 2)
- Trouvez la relation entre l'énergie de la lumière et sa fréquence.
- En utilisant le modèle quantique de la lumière, expliquez toutes vos observations.
- Vous changez de groupe tel que chaque nouvelle équipe doit avoir trois étudiants qui ont travaillé sur des métaux différents. Expliquer l'effet du changement du métal sur les résultats de l'effet photoélectrique.

Enfin, nous vous demandons **d'expliquer** la démarche que vous aurez suivie et **d'inscrire** sur le document tout commentaire – sur l'activité, le protocole, le simulateur – que vous désirez nous transmettre. Nous sommes convaincus que votre participation nous aidera de manière cruciale à perfectionner le protocole.

Merci pour votre précieuse collaboration !

Les étapes suggérées :

Phase de préparation (en équipe)

Activité 1 : *Prendre connaissance de la tâche dans son ensemble. Trouver ou revoir les connaissances nécessaires (histoire, lois, concepts,...) et se familiariser avec le simulateur.*

Activité 1 : Étape 1	Appropriation de la tâche et mise à jour des connaissances et familiarisation avec le simulateur	Matériel, ressources
Durée : 50 min	<ul style="list-style-type: none"> • Prendre connaissance de la tâche à réaliser • Revoir les concepts et principes scientifiques et mathématiques pertinents • Se familiariser avec le simulateur • Faire des prédictions 	<ul style="list-style-type: none"> • Pocket PC (iPAQ 210) • Logiciel de simulation (document 4). • Document 5 : Considérations historiques et théoriques. • Document 1 : Prédications (à remettre).

Phase de réalisation :

Activité 2 :

- Réaliser l'expérience de simulation (individuellement)

- Comparer et discuter les résultats (en équipe)

Activité 2 : Étape 2	Utilisation du simulateur et les deux vidéos	Matériel, ressources :
Durée : 50 min	<ul style="list-style-type: none"> • Planifier l'activité d'expérimentation • Mise en évidence de l'effet photoélectrique • Vérification des lois de l'effet photoélectrique • Remplir les documents 2 et 6 (à remettre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vidéo1 et Vidéo2 • Logiciel de simulation • Document 2 : Résultats • Document 6 : Rédaction

Phase d'intégration (en équipe)

Activité 3 : Regrouper les apprentissages et les manipulations effectués dans le but de produire un texte pour expliquer le phénomène de l'effet photoélectrique.

Activité 3 : Étape 3	Assemblage des connaissances, des résultats et des ressources et rédaction du rapport.	Matériel, ressources :
Durée : 50 min	<ul style="list-style-type: none"> • Planifier la production du texte • Rassembler les connaissances et résultats de l'expérimentation afin de structurer la rédaction • Rédiger le texte 	<ul style="list-style-type: none"> • Ordinateur • Résultats

ANNEXE IV

Prédictions (à remettre avant l'utilisation de simulation)

Nom _____ Date _____

P-1. Si on éclaire une plaque métallique (zinc, cuivre ou sodium) avec une onde lumineuse de grande intensité (intensité maximale). En se basant sur la théorie ondulatoire de la lumière, peut-on avoir une émission des électrons dans les cas suivants ? Justifiez vos réponses.

P-1-1. L'onde lumineuse est ultraviolette de fréquence $f = 1.2 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 250$ nm.

P-1-2. L'onde lumineuse est bleue de fréquence $f = 0.67 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm.

P-1-3. L'onde lumineuse est rouge de fréquence $f = 0.44 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 680$ nm.

P-2. Si on éclaire une plaque métallique (zinc, cuivre ou sodium) avec une onde lumineuse de faible intensité. En se basant sur la théorie ondulatoire de la lumière, peut-on avoir une émission des électrons dans les cas suivants ? Justifiez vos réponses.

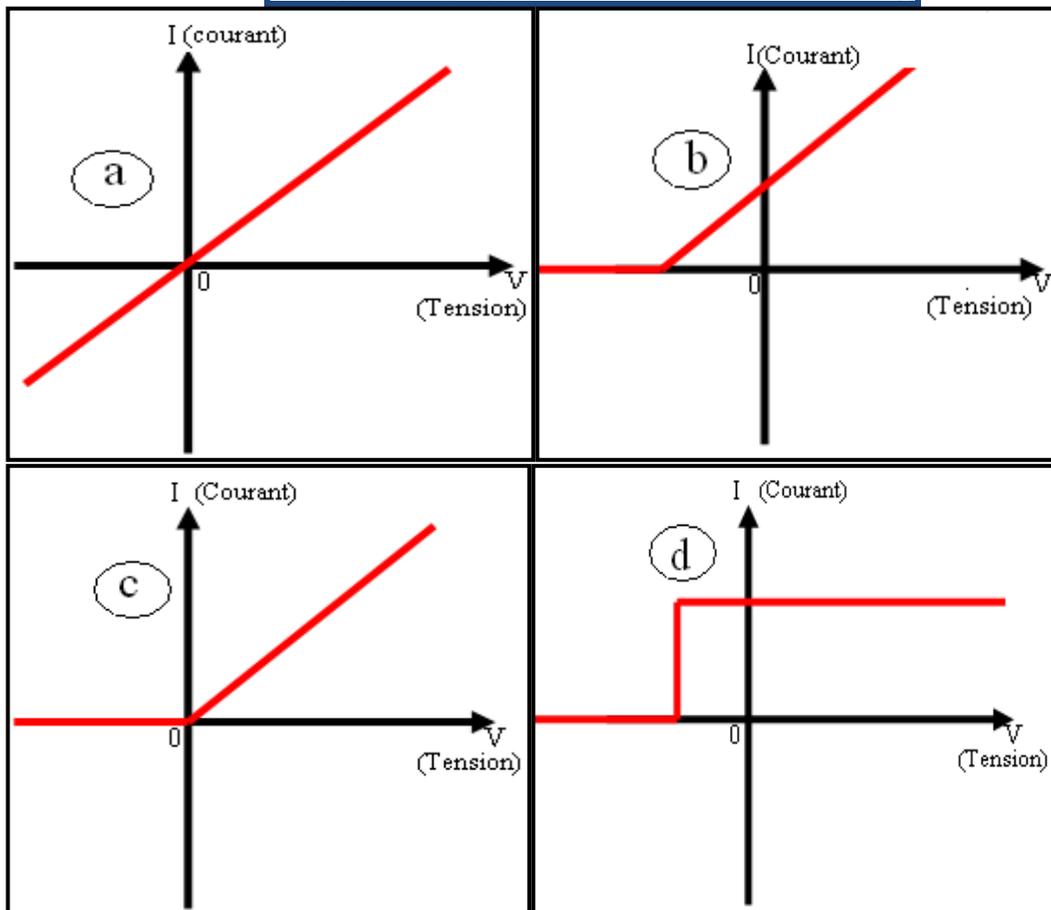
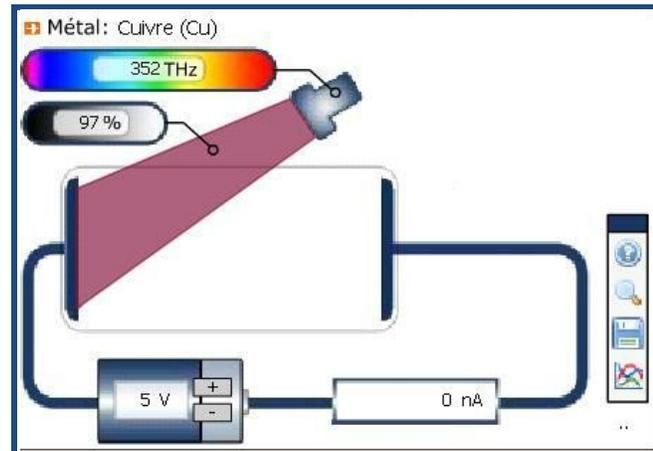
P-2-1. L'onde lumineuse est ultraviolette de fréquence $f = 1.2 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 250$ nm.

P-2-2. L'onde lumineuse est bleue de fréquence $f = 0.67 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm.

P-2-3. L'onde lumineuse est rouge de fréquence $f = 0.44 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 680$ nm.

P-2. L'émission des électrons dépend elle de l'énergie (ou l'intensité lumineuse) de l'onde lumineuse ? Expliquer

P-3. On considère le circuit électrique représenté par la figure suivante, quelle va être la forme du graphique représentant l'intensité I du courant mesuré par l'ampèremètre lorsque vous faites varier progressivement la tension de la batterie entre deux valeurs extrêmes (entre $-8V$ et $+8V$ par exemple) ?

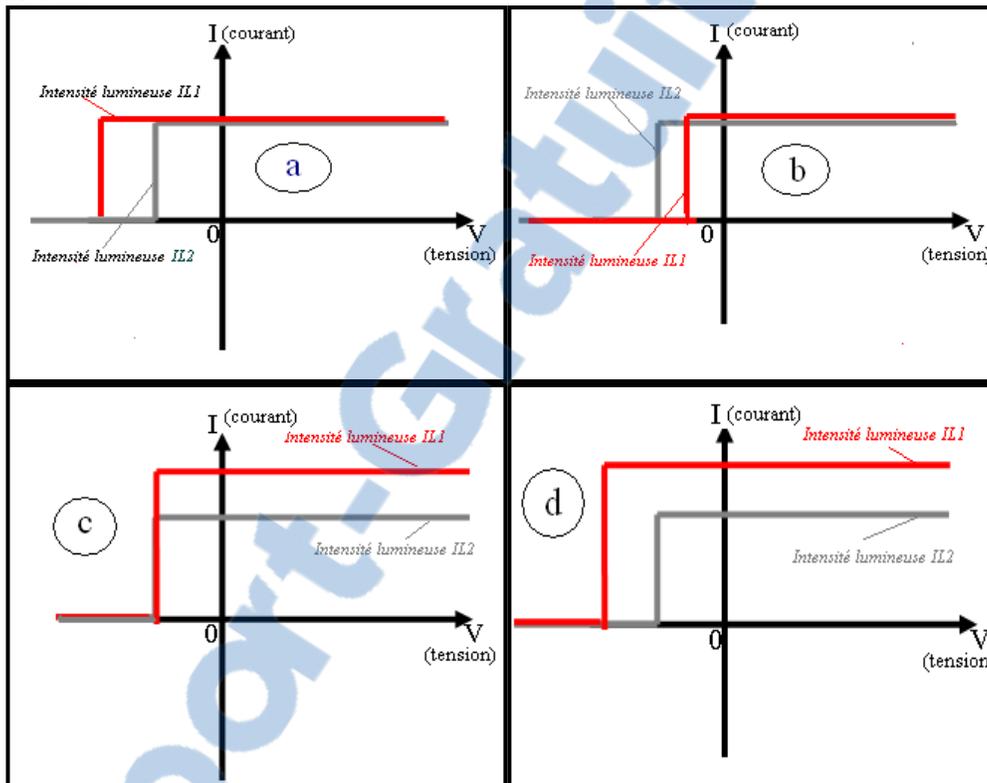


e) Aucune de ces courbes.

Justification : -----

-

P-4. Les graphes sont composés de deux courbes représentant l'intensité I du courant en fonction de la tension de la batterie respectivement pour deux puissances lumineuses différentes P_1 (rouge et qui correspond à l'intensité lumineuse $IL1$) et P_2 (gris et qui correspond à l'intensité lumineuse $IL2$). Si la valeur de la puissance lumineuse P_1 est plus grande que P_2 , choisissez la forme du graphique que vous attendriez. Justifier votre choix.



e) aucun changement du graphe

Justification : -----

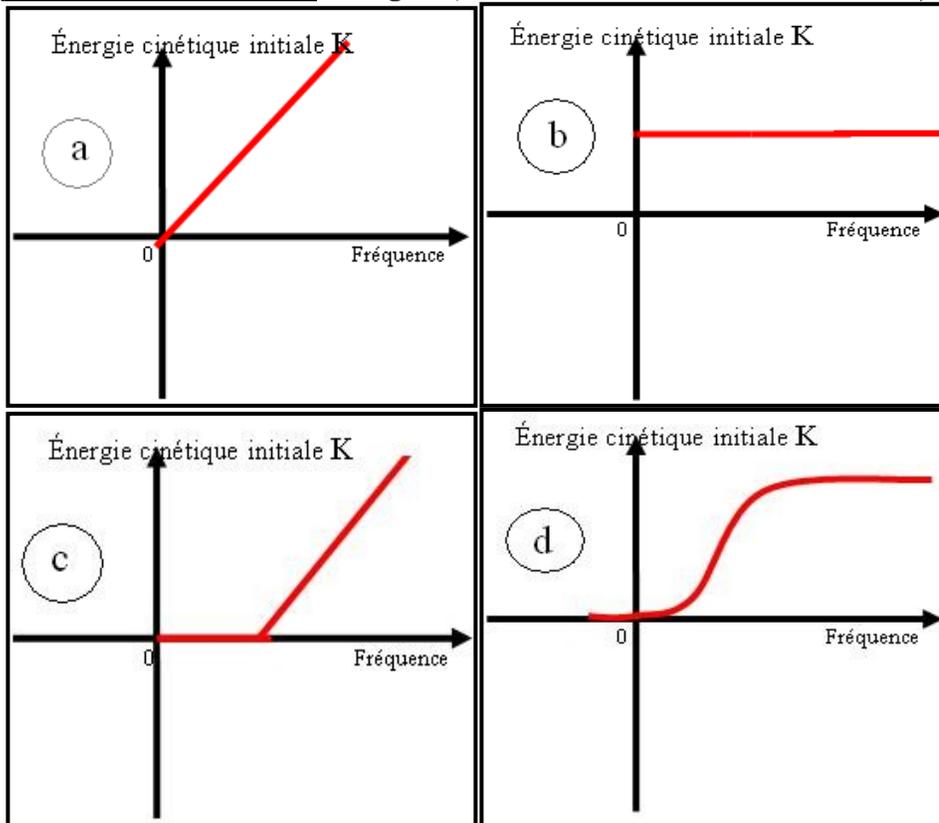
-

P-5. L'émission des électrons dépend elle de la longueur d'onde (ou la fréquence) de l'onde lumineuse ? Expliquez

P-6. Si l'énergie absorbée par le métal est croissante, la vitesse des électrons émis (et par conséquent leur énergie cinétique) devrait-elle être croissante ou décroissante ? Justifiez.

P-7. Si on varie la longueur d'onde de l'onde lumineuse, comment varie la vitesse des électrons émis (et par conséquent leur énergie cinétique) ? Justifier

P-8. Les électrons sont éjectés avec une énergie cinétique initiale K . Quelle va être la forme du graphique qui représente l'énergie cinétique initiale K des électrons lorsque la fréquence de la lumière change ? (L'intensité lumineuse est constante). Justifiez.



e) aucune de ces courbes.

Justification :-----

ANNEXE V

Résultats de la simulation

P-1. Si on éclaire une plaque métallique (zinc, cuivre ou sodium) avec une onde lumineuse de grande intensité (intensité maximale). En utilisant la simulation, peut-on avoir une émission des électrons dans les cas suivants ?

P-1-1. L'onde lumineuse est ultraviolette de fréquence $f = 1.2 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 250$ nm.

P-1-2. L'onde lumineuse est bleue de fréquence $f = 0.67 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm.

P-1-3. L'onde lumineuse est rouge de fréquence $f = 0.44 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 680$ nm.

P-2. Si on éclaire une plaque métallique (zinc, cuivre ou sodium) avec une onde lumineuse de faible intensité. En utilisant la simulation, peut-on avoir une émission des électrons dans les cas suivants ?

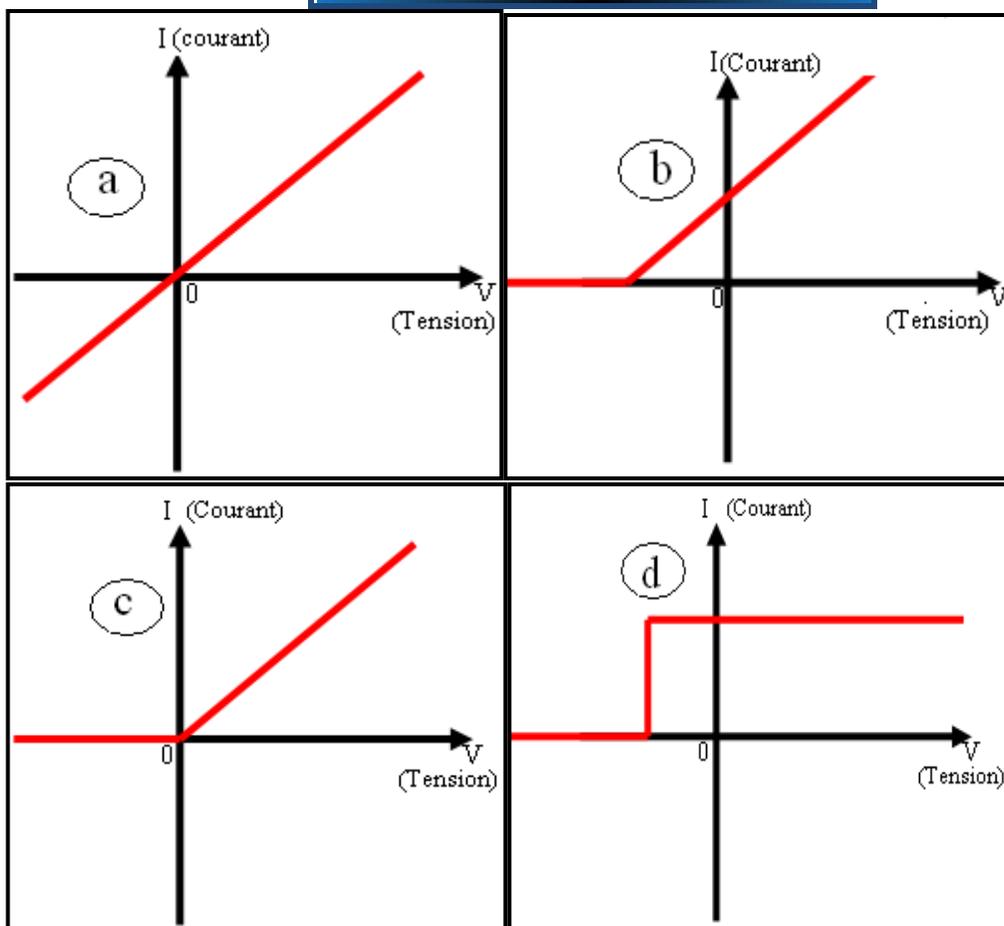
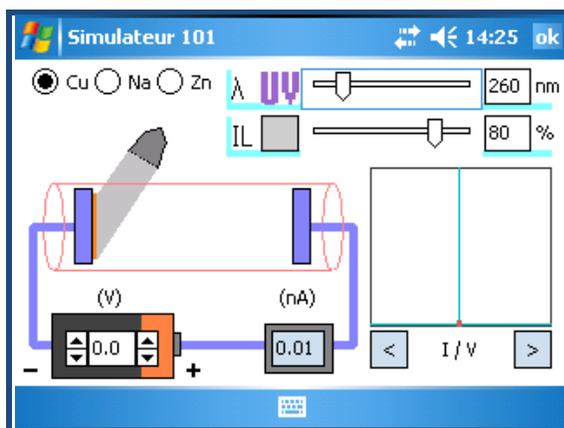
P-2-1. L'onde lumineuse est ultraviolette de fréquence $f = 1.2 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 250$ nm.

P-2-2. L'onde lumineuse est bleue de fréquence $f = 0.67 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm.

P-2-3. L'onde lumineuse est rouge de fréquence $f = 0.44 \times 10^{15}$ Hz et de longueur d'onde $\lambda = 680$ nm.

P-2. L'émission des électrons dépend elle de l'énergie (ou l'intensité lumineuse) de l'onde lumineuse ? Expliquer

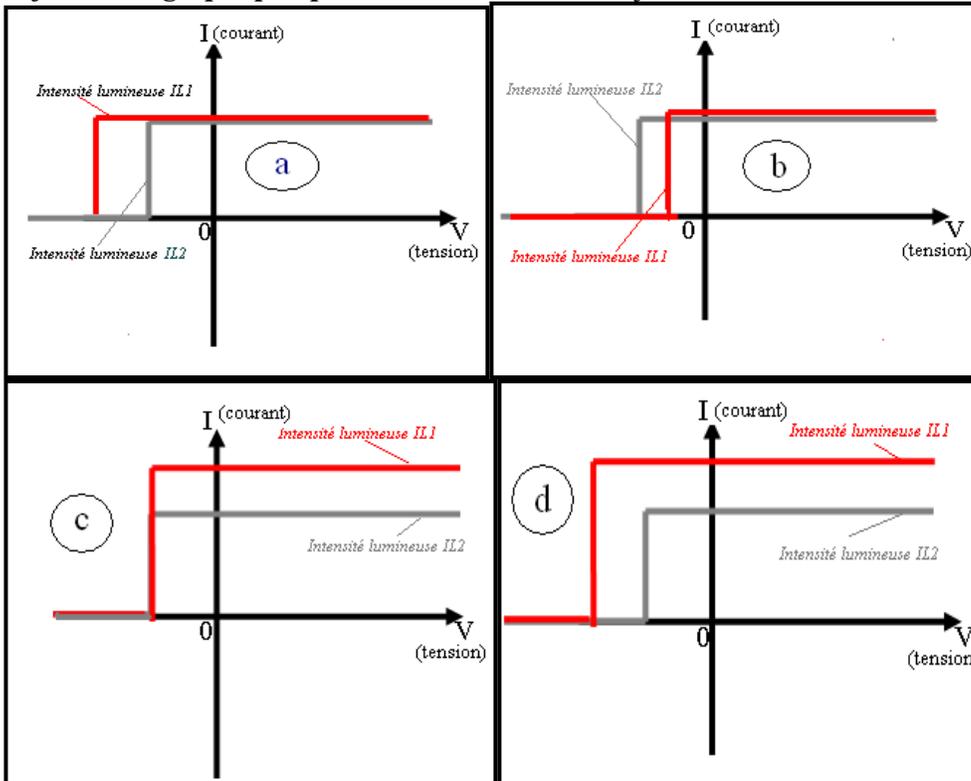
P-3. On considère le circuit électrique représenté par la figure suivante, quelle va être la forme du graphique représentant l'intensité I du courant mesuré par l'ampèremètre lorsque vous faites varier progressivement la tension de la batterie entre deux valeurs extrêmes (entre $-8V$ et $+8 V$ par exemple) ?



e) Aucune de ces courbes.

Justification : -----

P-5. Les graphes sont composés de deux courbes représentant l'intensité I du courant en fonction de la tension de la batterie respectivement pour deux intensités lumineuses différentes IL_1 (rouge) et IL_2 (gris). Si la valeur de IL_1 est plus grande que IL_2 , choisissez la forme du graphique que vous attendriez. Justifier votre choix.



e) aucun changement du graphe

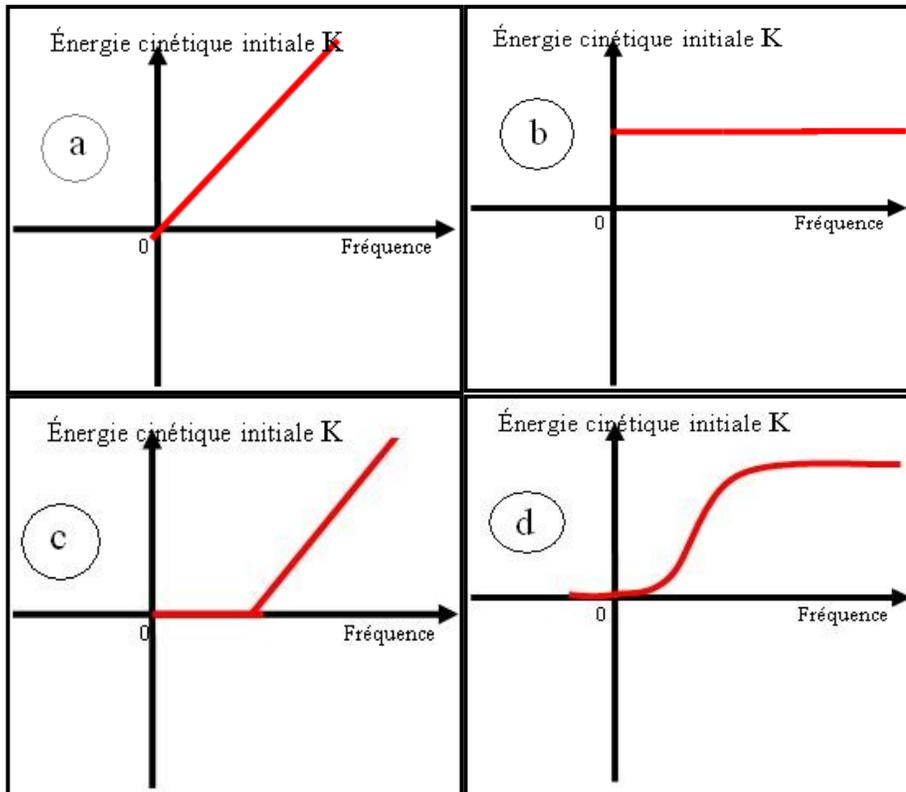
Justification : -----

P-5. L'émission des électrons dépend-elle de la longueur d'onde (ou de la fréquence) de l'onde lumineuse ? Expliquez

P-6. Si l'énergie absorbée par le métal est croissante, la vitesse des électrons émis (et par conséquent leur énergie cinétique) devrait-elle être croissante ou décroissante ? Justifiez

P-7. Si on varie la longueur d'onde de l'onde lumineuse, comment varie la vitesse des électrons émis (et par conséquent leur énergie cinétique) ? Justifier

P-8. Les électrons sont éjectés avec une énergie cinétique initiale K. Quelle sera la forme du graphique qui représente l'énergie cinétique initiale K des électrons lorsque la fréquence de la lumière change ? (L'intensité lumineuse est constante). Justifiez.



e) aucune de ces courbes.

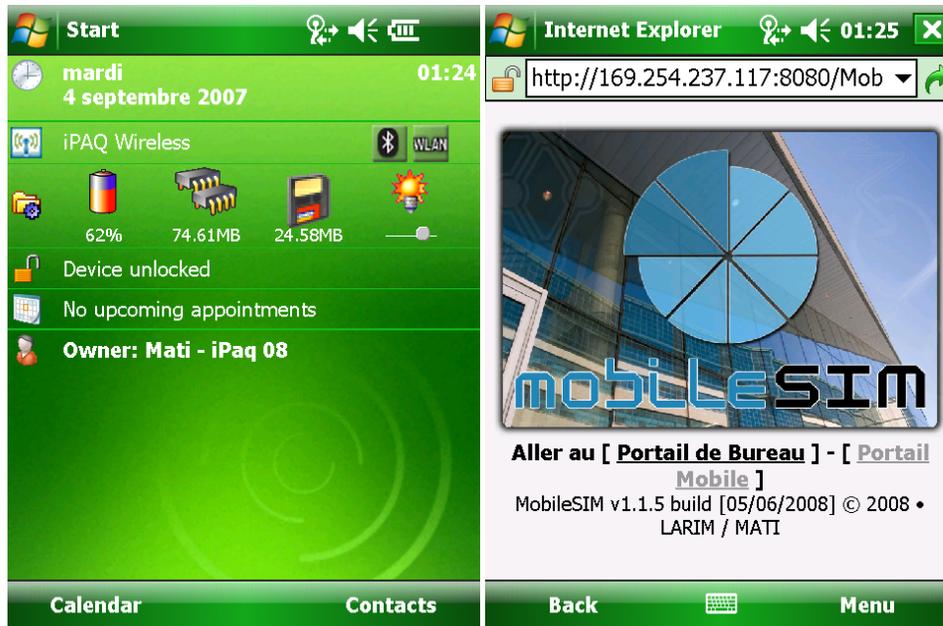
Justification : -----

ANNEXE VI

Ressources pédagogiques

1- Accès au simulateur MobileSIM :

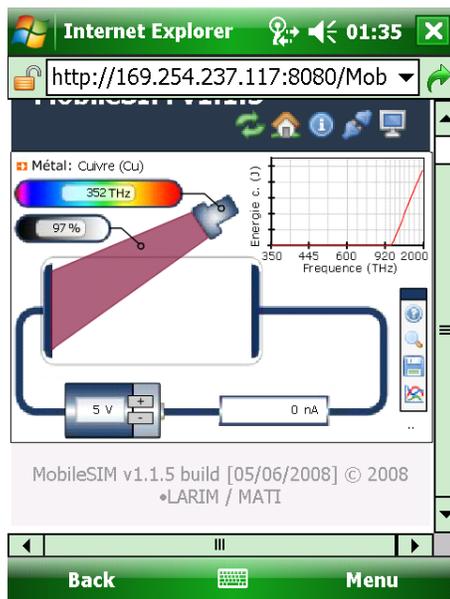
Pour accéder au portail, cliquez sur **Start** puis sur **Internet Explorer**.



Ensuite cliquez sur **Portail Mobile**, choisissez une séance de laboratoire et entrez votre clef d'accès; Ainsi vous aurez accès à **la liste des activités** à faire :



Vous cliquez sur l'activité que vous aller faire et vous aurez :



2- Description de la simulation

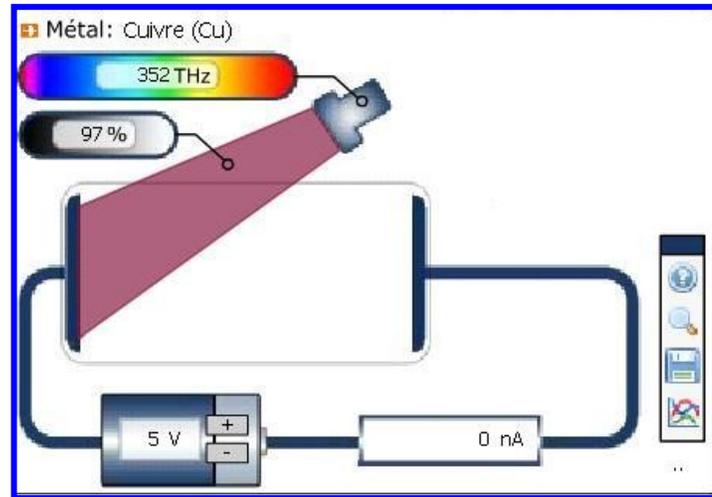


Figure X : Aperçu de la simulation de l'effet photoélectrique

Pour étudier l'effet photoélectrique, Lenard a utilisé un tube en quartz vidé d'air afin d'éviter le choc des électrons émis sur des molécules. Un tel appareillage s'est révélé très efficace pour l'analyse de l'effet photoélectrique. En utilisant des tubes ayant un vide poussé, Lenard a fait toute une série d'observation sur les facteurs qui influencent le courant photoélectrique.

Ce simulateur simule le montage utilisé par Lenard. Il est formé d'un tube contient deux électrodes :

- une plaque de métal sensible à la lumière, appelée photocathode;
- une plaque métallique, appelé anode, destinée à collecter les électrons émis.

La plaque est éclairée par une lumière monochromatique émise par une source lumineuse dont la puissance (ou l'intensité lumineuse) et la longueur d'onde sont réglables à l'aide des curseurs.

Une batterie permet d'appliquer entre la photocathode et l'anode une tension réglable V .

Le courant d'intensité I , détecté par l'ampèremètre, ne peut provenir que d'une circulation d'électrons émis par la plaque (effet photoélectrique) et attirés par le fil.

Au coté droit de l'écran, vous pouvez visualiser trois graphiques représentant : l'intensité du courant électrique en fonction de la tension, l'intensité du courant électrique en fonction de l'intensité lumineuse (ou la puissance lumineuse) et l'énergie cinétique des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse pour chaque type de métal.

Fonctionnalités du simulateur

	rafraîchir la simulation
	retourner à la liste des activités

	Informations sur les notions utilisées en effet photoélectrique
	retour à la page d'accès au portail
	Aide sur les composantes du simulateur
	« zoomer » la courbe
	sauvegarder la courbe
	charger les courbes enregistrées
	se déconnecter

Pour sauvegarder les résultats, vous pouvez utiliser deux méthodes :

- 1) on utilise le logiciel magic ss, il suffit de presser sur le bouton gauche, puis nommer et sauvegarder le fichier de type. bmp dans le répertoire MATI par exemple. Ainsi, vous pouvez récupérer ce fichier sur ordinateur portable par l'intermédiaire du câble USB.
- 2) vous cliquez sur le bouton de sauvegarde pour enregistrer le fichier et vous pouvez le récupérer en vous connectant au portail sur l'ordinateur portable.

3- Deux vidéos

Nous mettons à votre disposition deux vidéos qui permettent de mettre en évidence l'effet photoélectrique (**expérience d'Hertz**) Dans les deux vidéos, on considère une plaque de Zinc, de forme circulaire et en contact avec un électroscope, qui est chargée négativement. Le vidéo1 illustre l'effet de la lumière blanche riche en UV sur la plaque de zinc (sur la position des tiges métalliques de l'électroscope) tandis que le vidéo2 montre le comportement de l'électroscope lorsqu'on intercale une plaque de verre (qui bloque généralement les rayons ultraviolets).

ANNEXE VII

Considérations historiques et théoriques

1- Considérations historiques

Pendant plus de deux siècles, deux conceptions sur la nature de la lumière allaient se développer et s'affronter : la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire. La première sera défendue par **Isaac Newton** pour qui la lumière est composée de particules dont les masses différentes provoquent sur notre rétine des sensations distinctes : les couleurs. La propagation rectiligne de la lumière et la réflexion découlent tout logiquement de ce concept. Quant à la réfraction, son explication est plus délicate : elle fait appel à la masse des particules et à une action attractive qu'exerce un corps transparent sur les corpuscules de lumière qui le traverse. L'autorité de Newton imposera cette conception bien longtemps encore après sa mort survenue en 1727.

James Clark Maxwell, en 1865 puis en 1873, précisera la nature électromagnétique de cette onde. Cela faisait de la lumière un membre parmi d'autres de la grande famille des ondes électromagnétiques.

En essayant de confirmer la nature ondulatoire de la lumière décrite par Maxwell, Hertz (1887) a trouvé que le quartz (qui est transparent aux rayons ultraviolets) n'affecte pas le phénomène tandis que le verre et le mica, et dans une moindre mesure le gaz de houille, sont « opaques au rayonnement à l'origine du phénomène observé » (c'est-à-dire aux UV). En juillet 1887, Hertz fait part de ses résultats à la communauté scientifique en publiant un article intitulé : « Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques ». Il précise dans cet article qu'il se « borne à présent à communiquer les résultats obtenus, sans essayer de bâtir une théorie expliquant l'origine des phénomènes observés ». Ce que Hertz vient de découvrir c'est « l'effet photoélectrique ».

L'étude de cet effet photoélectrique va être poursuivie par plusieurs scientifiques comme Wilhelm Hallwachs (1888), Branly (1889) etc. les travaux les plus marquants à l'époque étaient ceux de **Philip Lenard** (1862-1947). Il a commencé ses travaux sur l'effet photoélectrique à partir de 1899 dans la suite logique de ceux qu'il a réalisés sur les rayons cathodiques et qui seront récompensés par l'attribution du prix Nobel de physique en 1905. Lenard a étudié avec Hertz les rayons cathodiques et met au point lors de ses recherches un appareillage qui va se révéler très efficace pour l'analyse de l'effet photoélectrique découvert par son maître. Entre 1899 et 1902, en utilisant des tubes ayant un vide poussé, il fait toute une série d'observation :

- Les UV arrachent des particules d'électricité négative aux métaux.

- Ces particules d'électricité négative (« électrons ») ont le même rapport charge / masse (e/m) que les « rayons cathodiques ».
- Le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à l'intensité lumineuse.
- L'énergie cinétique des électrons est indépendante de l'intensité lumineuse.
- L'énergie cinétique des électrons augmente quand la fréquence de la lumière incidente augmente.

En 1902, Einstein a pris connaissance des travaux de Lenard et a exprimé sa passion pour l'interprétation de l'effet photoélectrique en écrivant à sa fiancée, Mileva Maric : « Je viens juste de lire un article formidable de Lenard sur la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette. Ce morceau de choix m'a fait une telle impression, il me met dans un tel bonheur et une telle joie qu'il faut absolument que je t'en fasse profiter ».

Non seulement les résultats des travaux de Lenard appuyaient-ils les théories de Planck, mais ils fournissaient aussi les fondements de l'analyse d'Einstein sur l'effet photoélectrique. Einstein a bien tiré profit des travaux de Lenard, de l'hypothèse du corps noir de Planck et de la théorie atomique de la lumière de Newton, dont il a retenu certains aspects pour avancer une hypothèse audacieuse sur la nature de la lumière pour expliquer certains résultats d'expériences portant sur l'effet photoélectrique, tout en prévoyant de nouveaux effets. À l'époque, Einstein était le seul physicien à croire à cette interprétation. Ce n'est que onze ans plus tard, en 1916, après des mesures très précises, que Millikan a annoncé qu'Einstein avait prédit exactement les résultats observés. Il a passé dix ans de sa vie à vérifier expérimentalement l'équation trouvée par Einstein en 1905, et contrairement à toutes ses prévisions, il a confirmé l'équation d'Einstein.

C'est pour ses mérites en physique mathématique, spécialement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique qu'Einstein a reçu le prix Nobel de physique en 1922.

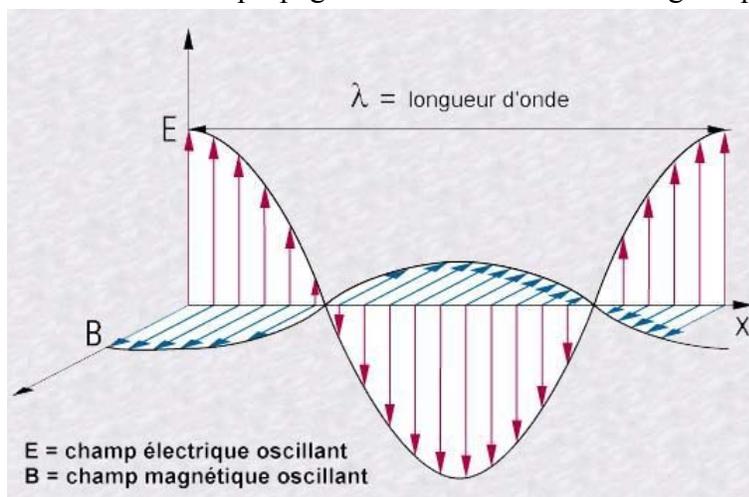
2- Considérations théoriques

2-1- Théorie ondulatoire de la lumière (Maxwell)

La théorie ondulatoire de la lumière a gagné ses lettres de noblesse lorsque James Clerk Maxwell associa la lumière à un phénomène électromagnétique. Ainsi, la lumière est une onde électromagnétique constituée de la superposition d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillant dans le temps avec une **fréquence** f et se déplaçant, dans le vide, à une vitesse c . L'amplitude du champ électrique associé à l'onde lumineuse se propageant le long de l'axe x est alors décrite par la relation suivante :

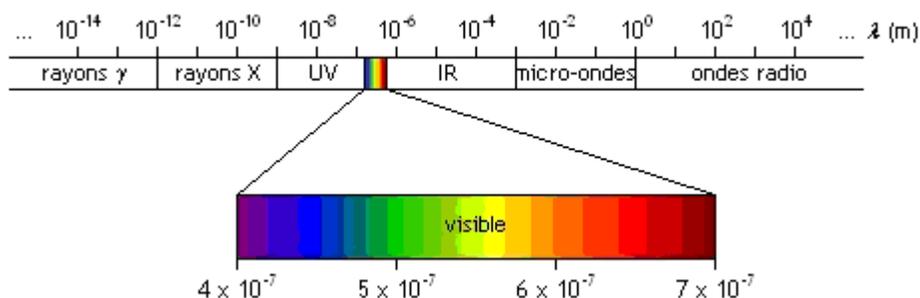
$$E(x,t) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$
 où $E(x, t)$ est l'amplitude du champ électrique au point x et au temps t , E_0 est l'**amplitude maximale** du champ électrique, λ est la **longueur d'onde** et T est la **période d'oscillation**. La période et la fréquence de l'onde sont reliées par la relation suivante : $f = \frac{1}{T}$.

Si l'unité de temps utilisée pour mesurer la période T est la seconde (s), l'unité de la fréquence f est l'inverse de la seconde (s^{-1}) ou le hertz (Hz). Enfin, la théorie électromagnétique de la lumière nous offre une relation entre la longueur d'onde, la fréquence et la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique : $c = \lambda * f$



2-2. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique prévoit l'étendue des ondes électromagnétiques (y compris la lumière) de toutes les longueurs d'onde (ou, de façon équivalente, de toutes les fréquences). Le spectre électromagnétique s'étend donc au-delà de la lumière visible. Des basses fréquences aux hautes fréquences (ou des grandes longueurs d'onde aux petites longueurs d'onde) on retrouve les ondes radio, les micro-ondes, les infrarouges (IR), la lumière visible, les ultraviolets (UV), les rayons X et les rayons gamma. On constate, à l'aide de la figure suivante, que la lumière visible ne couvre qu'une infime partie du spectre électromagnétique.



2-3. Échange d'énergie entre la matière et la lumière

Selon la théorie ondulatoire de la lumière, les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement électromagnétiques se font d'une manière continue. Le flux d'énergie traversant par unité de temps l'unité de surface perpendiculaire à la direction de

propagation est proportionnelle au carré de la valeur efficace du champ électrique, ne dépend *ni de la fréquence* (ou, de façon équivalente, *de la longueur d'onde*) de l'onde lumineuse. Ainsi, la puissance lumineuse transportée par une onde lumineuse est proportionnelle au carré de son amplitude.

La matière absorbe l'énergie lors de son interaction avec une onde lumineuse jusqu'à ce que les électrons libres aient une énergie suffisante pour s'échapper de la surface et ceci *indépendamment de la fréquence* (ou de la couleur de la lumière). Ainsi l'émission d'électrons devrait être observée pour toute gamme de fréquences pourvu que l'intensité soit suffisante.

Si l'intensité du rayon lumineux est **faible**, il ne suffirait que d'attendre le temps nécessaire pour que ce peu d'énergie transmise à un électron **s'accumule**, et atteigne une valeur suffisante pour qu'il soit extrait du métal. Avec la croissance de l'énergie absorbée, les électrons recevant une plus grande quantité d'énergie devraient être émis avec une vitesse également croissante.

2-4. Extraction des électrons : Comment peut-on extraire un électron d'un métal ?

Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs entre lesquels circulent des électrons liés au réseau, mais libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau. Pour extraire un électron, il faut lui fournir une énergie W_s , appelée **travail de sortie ou travail d'extraction**. (W_s représente l'énergie de liaison de l'électron au réseau métallique.

- A l'intérieur du métal, l'électron a le moins d'énergie, car il est lié au réseau;
- Lorsque l'électron a capté l'énergie $E = W_s$, il est sorti du métal, mais il est au repos ($K = 0$);
- Lorsque l'électron a capté une énergie $E > W_s$, il est sorti du métal et a une énergie cinétique $K = E - W_s$.

2-5. Fréquence seuil

La valeur à partir de laquelle le courant est non nul est appelé longueur d'onde seuil λ_s . La valeur maximale du courant est appelée intensité de saturation $I_{sat} = ne/\Delta t$ où n est le nombre d'électrons émis pendant l'intervalle de temps Δt .)

2-6. Tension d'arrêt

La valeur de la tension appliquée pour laquelle le courant s'annule est appelé potentiel d'arrêt et notée : V_{stop} .

2-7. Relation entre l'énergie cinétique maximale et la tension d'arrêt

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique au cas où la tension entre la photocathode et l'anode est : V_{stop} . Considérons un électron partant de la photocathode avec l'énergie cinétique K_{max} , et qui se dirige tout droit vers l'anode. Cet électron est freiné par la force électrique (due au champ électrique entre P et F) tel qu'il s'arrête juste devant l'anode (vitesse nulle !)

$\Delta K = \Sigma W(\text{Fext})$ c'est-à-dire : $0 - K_{\text{max}} = W(\text{Fe}) + W(\text{P})$. Or le travail du poids est nulle du fait que le déplacement est horizontal, ainsi : $0 - K_{\text{max}} = W(\text{Fe})$ c'est-à-dire :
 $-K_{\text{max}} = e V_{\text{stop}}$ et finalement : $K_{\text{max}} = e |V_{\text{stop}}|$

D'autre part, une partie de l'énergie lumineuse E fournit au métal est utilisée pour extraire les électrons (W_s) et l'autre partie est communiquée aux électrons sous formes d'énergie cinétique K_{max} . On peut donc écrire : $E = K_{\text{max}} + W_s$. En utilisant cette relation et relation entre l'énergie cinétique, on peut déduire la relation entre l'énergie de la lumière E et la fréquence f .

2-8. Fonctionnement de l'électroscope

L'électroscope est un appareil qui permet de déterminer si un corps est ou n'est pas chargé en électricité. Il s'agit de l'électroscope. L'aiguille ou la tige métallique est déviée lorsqu'on touche le dessus de l'électroscope avec un bâton électrisé. Au départ, l'électroscope est neutre, c'est-à-dire que l'ensemble des électrons libres du métal est réparti de façon homogène. Lorsqu'un objet chargé (ici négativement) entre en contact avec l'électroscope il va lui transmettre ses électrons en excès. Les électrons repoussent les électrons libres du tube de cuivre. Leur mobilité permet à l'excédent de charges négatives de se répartir à la surface de l'ensemble des parties métalliques en particulier au niveau des tiges verticales. Elles portent une charge de même signe (ici négative). Elles se repoussent : la tige mobile s'éloigne de la tige fixe. Globalement, l'ensemble des conducteurs métalliques porte maintenant une charge électrique négative. Cet état électrique se conserve même en l'absence du bâton d'ébonite.

Lorsque l'on extrait des électrons du métal, ce dernier diminue son excès d'électrons. L'électroscope va alors retrouver sa neutralité. Ainsi, les électrons en excès de l'électroscope vont avoir tendance à se déplacer vers la zone déficitaire. La répartition des charges dans l'ensemble des conducteurs métalliques étant toujours homogène : la tige mobile revient à sa position initiale. La décharge de la plaque de zinc chargé négativement se traduit par la perte des électrons (ou extraction des électrons).

Pour plus d'informations, consulter le site suivant qui contient une animation du

fonctionnement de l'électroscope : <http://ici.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/jgiasson/nyb/animations/electroscope.html>

2-9. Hypothèse de Planck (1900)

Au début des 1900, le physicien allemand Max Planck proposait une nouvelle théorie radicale pour expliquer les données recueillies, il avançait que les molécules ou atomes en vibration dans une matière chauffée ne vibrent qu'à des quantités spécifiques d'énergie et que l'énergie des molécules ou atomes en vibration n'est pas émise de façon continue, mais plutôt en lots ou paquets que Planck appelait des quanta. Il avançait même que l'énergie d'un seul quantum E était le quantum d'énergie en joules, f , la fréquence en hertz, et h , la constante en joules par seconde appelée constante de Planck. ($h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J. s).

Planck a également mis l'hypothèse que l'énergie émise doit être un multiple intégral de l'énergie minimale, qu'elle ne peut être que hf , $2hf$, $3hf$, : $E = nhf$ ou $n=1, 2, 3, \dots$

Si l'énergie lumineuse est quantifiée et que l'énergie de chaque lot est déterminée par le rapport $E = hf$, les lots de la zone rouge produiront une faible émission d'énergie et ceux de la zone ultraviolette une forte émission d'énergie.

L'hypothèse des quanta de Planck était révolutionnaire pour deux raisons :

- elle défiait la théorie ondulatoire de la lumière classique en avançant que les ondes électromagnétiques ne transmettaient pas l'énergie de façon continue, mais plutôt en petits paquets ou lots;
- elle défiait les fondements de la physique classique de Newton, car elle suggérait qu'un objet physique n'est pas libre de vibrer avec n'importe quel type d'énergie et que l'énergie était limitée à certaines valeurs discrètes.

2. 10. Postulat D'Einstein

Einstein était bien au fait des expériences de Philip Lenard (1902) et de l'hypothèse du corps noir de Planck (1900). Il connaissait aussi la théorie atomique de la lumière de Newton, dont il a retenu certains aspects pour avancer une hypothèse audacieuse sur la nature de la lumière pour expliquer certains résultats d'expériences portant sur l'effet photoélectrique, tout en prévoyant de nouveaux effets. Cette introduction du nouveau modèle de la lumière était considérée par Einstein comme sa contribution la plus révolutionnaire et fut la moins bien acceptée par ses contemporains. C'est elle, et non la relativité, qui devait valoir à Einstein le prix Nobel de physique en 1922 !

3. Applications de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique constitue le processus de base pour plusieurs dispositifs qu'on utilise dans la vie quotidienne. Parmi ces dispositifs, on trouve le dispositif à transfert de charge (DTC) qui est utilisé dans les appareils photo numériques pour capter et traiter les images électroniquement d'une manière plus précise et pour l'enregistrement sur bande vidéo. Un réseau de (DTC) est en fait composé de couches de silicium semi-, et, il est divisé en nombreuses petites sections ou pixels. La lumière visible frappe le silicium, libérant des photoélectrons. *Cette émission des électrons sous l'effet de la lumière est appelée l'effet photoélectrique.*

On trouve également d'autres *applications importantes de l'effet photoélectrique*; Notons par exemple : les dispositifs antivols, les portes de garages, les dispositifs de fermeture de portes automatiques, les télécommandes de certaines télévisions et de magnétoscopes. De nombreux détecteurs de fumée utilisent l'effet photoélectrique. Un grand nombre de dispositifs détecte la présence de la lumière. *Ces dispositifs fonctionnent parce que la lumière frappant le matériel dépose une énergie dans ce matériel et résulte ainsi un changement dans le mouvement des électrons.* La détection de ce changement permet de déterminer le degré d'obscurité (dans le cas du commutateur pour l'éclairage automatique des rues par exemple), de déterminer le prix du `` chips `` de croustilles (dans le cas d'un scanner utilisé par le caissier dans un magasin par exemple) ou d'identifier le son produit par une chaîne stéréo (détecteur utilisé dans le lecteur CD).

L'effet photoélectrique a permis également des découvertes techniques comme les piles photovoltaïques et solaires. Les panneaux solaires et les cellules photovoltaïques

utilisent l'effet photoélectrique pour générer directement de l'énergie électrique à partir de la lumière du Soleil. Cette énergie sert également aux navettes spatiales. Depuis 1958, les circuits électriques de tous les engins spatiaux fonctionnent grâce aux piles photovoltaïques, constituées de deux feuilles de silicium.

4. Rappel des notions et formules pouvant être utiles

Rappel : L'équation mathématique d'une droite

Pour chercher l'équation mathématique d'une droite, on choisit deux points quelconques A et B de la droite; on cherche les coordonnées de chaque points A(x1, y1) et B(x2, y2). La pente de la droite est calculée par : $a = (y2-y1)/(x2-x1)$ et la valeur b à l'origine des ordonnées est : $b= y1-ax1$; l'équation de la droite est donc : $Y = ax+b$.

ANNEXE VIII

Questionnaire

Nom : _____ date : _____

1. Veuillez indiquer où vous classez les énoncés qui portent sur le rôle des apprenants dans l'approche collaborative. Utilisez l'échelle suivante :

1. complètement d'accord 2. d'accord 3. pas d'accord 4. pas du tout d'accord 5. sans objet

rôle de l'apprenant	1	2	3	4	5
participe activement à son apprentissage					
discute et négocie des solutions					
partage ses connaissances avec ses pairs					
se motive et motive ses pairs					
Interaction positive avec ses pairs					
Fait preuve de leadership partagé					
fait de la recherche en petits groupes					
clarifie ou élabore des informations					
analyse des informations					

Commentaires : Autres rôles ? Avantages et inconvénients ?

2. Lors de l'exécution de l'activité d'apprentissage collaboratif, lesquels des mécanismes de collaboration avez-vous rencontrés ? Veuillez utiliser l'échelle ci-dessous pour répondre à la question.

1. toujours 2. fréquemment 3. parfois 4. rarement 5. Jamais

	1	2	3	4	5
clarification/explication					
partage du travail collaboratif					
recherche des informations					
construction de connaissances					
gestion de groupe/équipe					
conflit					
compromis					
encouragement					
socialisation					
interactions entre :					
a) apprenant- contenu					

b) apprenant-apprenant					
c) apprenant-interface					

Commentaires facultatifs sur l'apprentissage collaboratif : aide à la compréhension ? Avantages et inconvénients ? etc.

3. Indiquer ou vous classez les énoncés qui portent sur le rôle des simulations sur le PDA dans l'apprentissage.

1. complètement d'accord 2. d'accord 3. pas d'accord 4. pas du tout d'accord 5. sans objet

la simulation sur le PDA m'a permis de :	1	2	3	4	5
mieux comprendre le phénomène de l'effet photoélectrique.					
visualiser le phénomène de l'effet photoélectrique.					
chercher des informations					
construire de connaissances					
manipuler les différentes notions théoriques (tension, intensité du courant électrique, puissance lumineuse, fréquence)					
Générer un conflit cognitif					
Réduire le temps requis pour effectuer la tâche demandée					
vérifier mes hypothèses et mes prédictions					

Commentaires facultatifs sur la simulation sur PDA : aide à la compréhension ? Interface ? Avantages et inconvénients ? etc.

ANNEXE IX

Grille de Codage et analyse des vidéos avec MORAE (envisagée)

Marqueurs	Actions	Composantes Associées
A	1) Tenir en compte de l'écoulement du temps / respecter les échéances.	• Gestion de groupe/équipe
B	2) Pratiquer l'écoute active / Écouter attentivement / contact visuel/ lire ce que les autres ont dit ou écrit/ Répondre aux idées exprimées	• Partage du travail collaboratif • Interaction -AA
F	3) S'intéresser aux autres/Se soucier des autres / Reconnaître le point de vue des autres.	• Socialisation • Interaction-AA
C	4) Encourager les autres	• Encouragement • Interaction -AA
D	5) Exprimer son soutien / offrir son aide	• Partage du travail collaboratif • Encouragement • Interaction -AA
G	6) Montrer aux autres comment faire les choses/ confirmer une information.	• Partage du travail collaboratif • Encouragement • Interaction -AA
H	7) Demander des éclaircissements/Clarifier des idées/Vérifier si on comprend / Interroger afin d'approfondir le sens / demander plus d'info	• Clarification/explication • Recherche des informations • Socialisation • Interaction - AA
I	8) Vérifier la compréhension des autres/Vérifier des réponses	• Construction de connaissances • Socialisation • Interaction – AA
J	9) Demander de l'aide extérieure (professeur)	• Interaction - AP
K	10) Demander de l'aide pour des problèmes informatiques	• Interaction - AI
L	11) Négocier/Justifier ses opinions/justifier ses actions	• Construction de connaissances • Socialisation • Interaction – AA
M	12) Apporter des idées / donner des précisions/Répondre à une interrogation / décrire des notions/répondre à une interrogation / Donner des précisions	• Construction de connaissances • Socialisation • Interaction – AA
N	14) Fait part de ses difficultés	• Construction de connaissances • Socialisation • Interaction – AA
O	15) Vérifier l'existence d'un consensus / Vérifier si le groupe est prêt à prendre une décision	• Compromis
P	16) Élaborer à partir des idées des autres/Approfondir les idées des autres	• Construction de connaissances • Interaction – AA
Q	17) Résumer a des fins de compréhension/paraphraser/Intégrer des idées/Comparer et mettre en opposition /Expliquer en disant comment et	• Construction de connaissances • interaction – AA

	pourquoi/Catégoriser/	
R	18) Proposer des solutions de rechange	<ul style="list-style-type: none"> • Clarification/explication • Construction de connaissances
T	19) Lire une référence et en ressortir les points principaux ou la décrire	<ul style="list-style-type: none"> • Construction de connaissances • Interaction -AA
U	20) Conflit	<ul style="list-style-type: none"> • Conflit

Composantes de l'apprentissage collaboratif et les marqueurs correspondants

composante	Marqueurs correspondants
Clarification/explication (CE)	H,R
Construction de connaissances (CC)	I, L M N P Q R T
Recherche d'information (RI)	H
Encouragement (ENG)	C D G
Conflit	U
Compromis	O
Socialisation (SOC)	F H L I M N
Partage du travail collaboratif (PTC)	B D G
Gestion du groupe (GG)	A
Interaction Apprenant - interface (INT AI)	K
Interactions Apprenant-Professeur (INT AP)	J
Interactions Apprenant-Apprenant (INT AA)	B F C D G H I L M N P Q T

ANNEXE X : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Titre de la recherche : Impact d'une simulation dans des environnements mobiles sur la compréhension conceptuelle de l'effet photoélectrique

Chercheur : Droui Mohamed, Étudiant au Ph.D., Département de didactique.

Directeur de recherche : Jésus Vazquez Abad, Professeur, Département de didactique

A) RENSEIGNEMENTS AUX PARTICIPANTS

1. Objectifs de la recherche

Ce projet vise à examiner l'apport d'une simulation de l'effet photoélectrique dans des environnements mobiles à une meilleure compréhension de la nature quantique de la lumière chez les élèves du niveau collégial.

2. Participation à la recherche

Votre collaboration consiste à participer à une activité qui comporte l'expérimentation d'un dispositif didactique, composé d'un protocole et d'un simulateur sur un ordinateur de poche. L'expérimentation aura lieu à la Maison des technologies de formation et d'apprentissage Roland-Giguère MATI-Montréal ou sur place (Cégep) et durera quatre heures. Dans cette activité, nous vous demandons de répondre à une série de questions et d'accomplir des tâches comprises dans le protocole que vous recevez avec cette feuille. Pour cela, il y a des démarches à suivre qui peuvent faire appel à l'utilisation de ressources informatiques, en particulier, un simulateur. Le protocole vous demande de travailler en équipe de trois personnes. Il est très important pour les fins de l'expérimentation de suivre cette directive. Nous vous demandons d'expliquer la démarche que vous aurez suivie et d'inscrire sur le document tout commentaire – sur l'activité, le protocole, le simulateur – que vous désirez nous transmettre. Une éventuelle entrevue (de 30 à 60min) peut être sollicitée après l'activité dans le but de vérifier les connaissances acquises. L'entrevue et les actions des étudiants seront enregistrées en vidéos, puis transcrites.

3. Confidentialité

Les données (vos réponses aux questions, vos notes et commentaires, votre éventuelle participation à un entretien) seront utilisées exclusivement aux fins de la recherche. Chaque participant à la recherche se verra attribuer un numéro et seul le chercheur principal et la personne déléguée par lui à cet effet auront la liste des participants et des numéros qui leur auront été attribués. Ainsi, les données seront gardées de manière confidentielle dans un classeur sous clé situé dans un bureau fermé et votre identification ne servira qu'aux fins de l'analyse de données. Ces renseignements seront détruits 7 ans après la fin du projet.

4. Avantages et inconvénients

En participant à cette recherche, vous pourrez contribuer à l'avancement des connaissances et au perfectionnement d'un dispositif didactique qui contribuera sans aucun doute à améliorer l'apprentissage des sciences. Votre participation à la recherche pourra également vous donner l'occasion de mieux comprendre l'effet photoélectrique et de vous familiariser avec un simulateur sur un ordinateur de poche.

5. Droit de retrait

Votre participation est **optionnelle et volontaire** : vous pouvez refuser de répondre aux questions, de participer à un éventuel entretien, ou de nous remettre votre document noté, en tout temps et sans aucune conséquence sur votre cheminement académique.

6. Indemnité s'il y a lieu

Afin de couvrir vos frais de déplacement, une compensation financière de vingt dollars vous sera versée après l'activité à laquelle vous participerez.

7. Diffusion des résultats

Les résultats sont diffusés dans le cadre d'une thèse en vue de l'obtention du grade de Ph.D en didactique des sciences et dans de la publication des articles.

B) CONSENTEMENT

Je déclare avoir pris connaissance des informations ci-dessus, avoir obtenu les réponses à mes questions sur ma participation à la recherche et comprendre le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de cette recherche.

Après réflexion et un délai raisonnable, je consens librement à prendre part à cette recherche. Je sais que je peux me retirer en tout temps sans aucun préjudice, sur simple avis verbal et sans devoir justifier ma décision.

Signature : _____ Date : _____

Nom : _____ Prénom : _____

Je consens à ce que les données anonymisées recueillies dans le cadre de cette étude soient utilisées pour des projets de recherche subséquents, conditionnellement à leur approbation éthique et dans le respect des mêmes principes de confidentialité et de protection des informations

Oui	Non
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Signature : _____ Date : _____

Nom : _____ Prénom : _____

Je déclare avoir expliqué le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de l'étude et avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature du chercheur

(ou de son représentant) : _____ Date : _____

Nom : _____ Prénom : _____

Pour toute question relative à la recherche ou pour vous retirer du projet, vous pouvez communiquer avec Droui Mohamed, Étudiant au Ph.D., Département de didactique à l'adresse courriel _____ ou avec Jesús Vázquez Abad, Professeur, Département de didactique, au numéro de téléphone : _____ ou à l'adresse courriel :

Toute plainte relative à votre participation à cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal, au numéro de téléphone (514) 343-2100 ou à l'adresse courriel suivante ombudsman@umontreal.ca (**l'ombudsman accepte les appels à frais virés**).