

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

VERS UN AGENT INTÉGRANT LES MESURES OCULOMÉTRIQUES ET
PHYSIOLOGIQUES POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU

DOCTORAT EN INFORMATIQUE COGNITIVE

PAR

FETHI GUERDELLI

JUIN 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Une thèse est un long voyage et une expérience assez enrichissante. Chaque étape franchie prouve notre capacité à persévérer et à aller toujours en avant. Tout ce parcours a été garanti grâce à des personnes qui m'ont accompagné et apporté leur soutien affectif, scientifique et matériel. Ma reconnaissance va à ces personnes qui sauront se connaître.

Je remercie chaleureusement Roger Nkambou et Aude Dufresne, mes directeurs de thèse, pour les conseils et leur rigueur scientifique, les encouragements et le soutien indéfectible qu'ils m'ont prodigués durant la réalisation de cette thèse. Je les remercie individuellement de m'avoir donné cette occasion de faire cette recherche et surtout de m'avoir donné envie de poursuivre au-delà. Qu'ils trouvent dans cette thèse un témoignage de mon profond remerciement.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS SIGLES ET ACRONYMES	xiii
RÉSUMÉ	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
PRÉSENTATION DE LA RECHERCHE.....	4
1.1 Problématique de la recherche.....	4
1.2 Objectif de la recherche	8
1.3 Approche méthodologique.....	9
1.4 Pertinence et retombées de la recherche	15
CHAPITRE II	
ÉTAT DE L'ART ET TRAVAUX RELIÉS.....	16
CHAPITRE III	
CADRE THÉORIQUE DE LA RECHERCHE	23
3.1 Les théories d'apprentissage.....	23
3.1.1 Le behaviorisme.....	24
3.1.2 Le constructivisme.....	26
3.1.3 Le conflit cognitif ou conceptuel	28
3.1.4 Socioconstructivisme	30
3.1.5 Le cognitivisme.....	30
3.2 L'aide à l'apprentissage	32
3.2.1 Soutien aux apprenants et à la tâche	32
3.2.2 Les systèmes d'aide	33

3.2.3	Les interfaces adaptatives	35
3.3	L'apprentissage en ligne	36
3.4	L'importance de la motivation pour l'apprentissage	37
3.5	L'apprentissage avec les simulateurs.....	39
3.5.1	Qu'est-ce qu'un simulateur.....	39
3.5.2	Les promesses des simulateurs	41
3.5.3	Les simulateurs et la compréhension	42
3.5.4	Les difficultés de l'utilisation des animations	44
3.5.5	Description du simulateur Phet.....	47
3.6	Le système visuel humain.....	49
3.6.1	Physiologie de l'œil	50
3.6.2	L'attention visuelle	53
3.6.3	Le regard	54
CHAPITRE IV		
CADRE PRATIQUE SUR LE SUIVI OCULAIRE		
4.1	Le suivi oculaire.....	58
4.1.1	Historique.....	58
4.1.2	Les techniques d'enregistrement des mouvements des yeux.....	62
4.1.3	Les différents types de mouvements oculaires	66
4.1.4	Mouvements oculaires et vision	68
4.1.5	L'activité de lecture	69
4.1.6	La lecture et la compréhension	71
4.1.7	Mouvement oculaire dans les interactions humain-machine	76
4.1.8	Oculométrie et cognition	78
4.2	Les mesures physiologiques	84
4.2.1	Le stress	84
4.2.2	L'activité électrodermale	85
4.2.3	Les capteurs physiologiques	86

CHAPITRE V	
MÉTHODOLOGIE.....	89
5.1	Introduction..... 89
5.2	Objectifs spécifiques de l'analyse des données 90
5.3	Dispositif expérimental..... 94
5.4	Sélection des candidats 95
5.5	Déroulement de l'expérimentation 96
5.5.1	Phase 1 : Présentation 96
5.5.2	Phase 2 : Expérimentation 97
5.5.3	Phase 3 : Questionnaire post-expérimentation..... 99
5.6	Description de l'environnement d'apprentissage 100
5.6.1	La capture des mouvements oculaires 104
5.6.2	La capture de la conductance de la peau..... 106
5.6.3	La capture des mouvements de la souris 108
5.6.4	Adaptation du simulateur..... 109
5.6.5	Les fonctions d'aide intégrées 116
5.6.6	Les modalités de présentation de l'aide..... 119
5.7	Les types d'aide 121
5.8	Recueil des données..... 124
5.8.1	Synchronisation des données..... 125
5.8.2	Validation et nettoyage des données..... 127
CHAPITRE VI	
ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES	132
6.1	Introduction..... 132
6.2	Observation des traces 133
6.3	Attribution d'une note..... 134
6.4	Analyses selon les objectifs 135
6.4.1	R1 : Comportement des apprenants lors de la lecture de la théorie..... 135
6.4.2	R2 : La résolution des problèmes 150

6.4.3	R3 : L'influence de l'aide et les causes de son déclenchement	166
6.4.4	R4 : L'attitude de l'apprenant face à l'erreur.....	181
6.4.5	R5 : Réaction à l'aide proposée	188
6.5	Analyse du questionnaire.....	190
6.6	Conclusions.....	194
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		199
BIBLIOGRAPHIE		205
APPENDICE A		
FORMULAIRE DE CONSENTEMENT		218
APPENDICE B		
LES VARIABLES DE SORTIE DE L'OCULOMETRE.....		223
APPENDICE C		
QUESTIONNAIRE POST EXPÉRIMENTATION		225

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1	Les composantes de l'environnement d'apprentissage..... 10
1.2	Interactions de l'apprenant avec le tuteur humain..... 11
1.3	Les activités d'aide du tuteur humain 12
3.1	Présentation du simulateur PhET 43
3.2	Processus de conception du simulateur PhET. 48
3.3	La structure de la rétine (Web, 2005) 52
3.4	Modèle de lecture de Just et Carpenter 56
4.1	Appareil d'Edmund Burke Huey 59
4.2	Le photochronographe de Raymond Dodge 60
4.3	Dispositif d'enregistrement de Yarbus (le photokymographe)..... 61
4.4	Dispositif de Yarbus grippé sur l'œil..... 62
4.5	Les muscles extra-oculaires et les directions de l'œil..... 62
4.6	Galvanométrie (gauche) Électro-oculographie (droite) 64
4.7	Technique de l'image de Purkinje (Mielliet, 2004)..... 65
4.8	Exemple d'illustration des indices spatiaux (Mielliet, 2004)..... 73
4.9	Schéma du modèle de compréhension de la lecture (Giasson, 1990)..... 79
4.10	Les composantes fonctionnelles de l'attention (Knudsen, 2007). 81
4.11	Chemin oculaire en fonction de l'objectif recherché..... 83
4.12	La réponse électrodermale et ses paramètres (Mardaga, 2009) 86

5.1	Les situations visées par l'étude	91
5.2	Ressources disponibles pour la résolution de problèmes.....	92
5.3	Dispositif expérimental.....	95
5.4	Installation du capteur de la conductance de la peau.....	98
5.5	Architecture globale du système PhetHI.....	103
5.6	Caméra 504 de ASL.....	105
5.7	Interface de capture de la RPG en temps réel.	107
5.8	Exemple d'une page du cours sur l'effet photoélectrique.....	111
5.9	Sélection d'un problème avec ses composants	112
5.10	Interface de conception des problèmes	114
5.11	Module de clavardage	116
5.12	Exemple d'aide à localiser la pile du simulateur	117
5.13	Exemple de découpage du simulateur en zones d'intérêts.....	118
5.14	Exemple de situations de lors de l'apprentissage	126
5.15	Variation de la RPG avant l'expérimentation.....	129
6.1	Temps de lecture de la théorie par candidat.....	138
6.2	Variation de la RPG des candidats durant la lecture de la théorie.....	139
6.3	Niveau moyen de la RPG des candidats durant la lecture de la théorie.....	141
6.4	Temps moyen de lecture de la théorie en fonction du nombre de tentatives	145
6.5	Récapitulation des relations R1-i.....	149
6.6	Temps moyen de lecture de l'énoncé et le nombre de tentatives.	152
6.7	Temps de lecture des choix de solutions en fonction du nombre de tentatives	154
6.8	Temps de lecture de la théorie cumulé pour les différents problèmes.....	155
6.9	Temps moyen cumulé de lecture de la théorie et l'obtention de la bonne solution	157
6.10	Variation de la RPG moyenne en fonction du nombre de tentatives.....	159
6.11	Temps moyen passé à lire chaque choix de solution et le choix sélectionné.....	163
6.12	Récapitulation des liens avec le nombre de tentatives.....	165

6.13	Aide fournie en fonction du niveau moyen du stress.....	167
6.14	Temps de lecture des solutions en fonction du nombre de fois d'aides.....	173
6.15	Temps de lecture des solutions en fonction du nombre de fois d'aides.....	175
6.16	Récapitulatif des relations R3-i sur l'aide non typée	176
6.17	Fréquence des types d'aide	177
6.18	Variation de la RPG et la pupille en fonction du type d'aide	179
6.19	Temps de lecture de l'énoncé et des solutions en fonction du type d'aide...	180
6.20	Nombre moyen de tentatives en fonction du type d'aide.....	180
6.21	Démarche en cas de solution erronée.....	182

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
4.1	Principales caractéristiques oculaires en fonction du type de tâches..... 63
5.1	Liste des ACAs utilisés..... 121
5.2	Les types d'aides employés..... 124
5.3	Liste des variables oculométriques étudiées. 125
5.4	Liste des variables physiologiques étudiées. 125
6.1	Note finale pour les différents apprenants pour la totalité des problèmes.... 134
6.2	Tableau récapitulatif des mesures lors de la lecture de la théorie..... 137
6.3	Variation de la RPG durant la lecture de la théorie 140
6.4	Résultat ANOVA de la différence du niveau moyen de la RPG 141
6.5	Résultat de la corrélation entre la RPG et le temps de lecture de la théorie par candidat 142
6.6	Corrélation entre la RPG et le temps de lecture de la théorie pour tous les candidats 143
6.7	Résultat de la corrélation entre le temps de lecture de la théorie et la pupille pour tous les candidats 144
6.8	Résultat de la corrélation entre le temps de lecture de la théorie et le nombre de tentatives pour tous les candidats..... 145
6.9	Résultat de la corrélation entre le temps de lecture de la théorie et le nombre de fois d'aides reçues pour tous les candidats..... 147
6.10	Synthèse des résultats des relations R1-1, R1-2, R1-3 et R1-4 148

6.11	Résultats de la corrélation entre le nombre de tentatives et le temps de lecture de l'énoncé	152
6.12	Résultats de la corrélation entre le nombre de tentatives et le temps de lecture des choix de solution.....	153
6.13	Résultats de la corrélation entre le temps cumulé de lecture de la théorie et le nombre de tentatives	156
6.14	Résultat de la corrélation entre le temps cumulé à utiliser le simulateur et le nombre de tentatives	158
6.15	Résultat de la corrélation entre le niveau de stress et le nombre de tentatives.	159
6.16	Exemple de données collectées sur le choix de solutions.....	161
6.17	Résultat temps moyen passé à lire chaque choix de solution et le choix sélectionné.....	162
6.18	Résultats de la comparaison de moyenne du temps passé à lire le choix	164
6.19	Statistiques de groupe RPG	167
6.20	Résultat de la corrélation entre le nombre total d'aides reçues et la RPG moyenne	168
6.21	Variation du diamètre de la pupille.....	169
6.22	Résultats de la corrélation entre le nombre total d'aides reçues et la dilatation moyenne de la pupille	170
6.23	Statistiques descriptives du temps de lecture de l'énoncé dans le groupe ayant reçu une aide versus le groupe n'ayant pas reçu d'aide	171
6.24	Résultats de la comparaison de la moyenne du temps de lecture de l'énoncé (Test d'échantillons indépendants)	171
6.25	Statistiques descriptives du temps de lecture des choix de solution en fonction de nombre d'aides	172
6.26	Résultats de la corrélation entre le temps de lecture des choix de solution et le nombre de fois d'aides.....	173
6.27	Statistiques descriptives du nombre de fois d'aides reçues	174
6.28	Résultats de la corrélation entre le nombre de fois d'aides reçues et le nombre de tentatives de choix de solution.	175
6.29	Les types d'aides employés.....	177
6.30	Tableau croisé du nombre d'aides par type et par question.....	178
6.31	Nombre de tentatives par problème et par apprenant	183

6.32	Variation du temps de lecture de l'énoncé entre les deux premières tentatives	184
6.33	Variation du temps de relecture des choix de solutions entre les deux premières tentatives	185
6.34	Résultats de la relecture de la théorie.....	187
6.35	Résultat de l'utilisation du simulateur	188
6.36	Lecture de l'aide.....	189
6.37	Cas de réussite ou d'échec après l'aide affichée.....	190
6.38	Résultat des réponses au questionnaire.....	193
6.39	Résultat des évaluations de l'apprentissage	193

LISTE DES ABRÉVIATIONS SIGLES ET ACRONYMES

AIED	<i>Artificial Intelligence in Education</i>
ACA	Agent conversationnel animé
CÉGEP	Collège d'enseignement général et professionnel
EAO	Enseignement assisté par ordinateur
EIAH	Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain
ExAO	Expérimentation Assistée par Ordinateur
GSR	<i>Galvanic Skin Response</i> ou Réponse Psycho-Galvanique (RPG)
IHM	Interface humain-machine
PhetHI	Nom de notre environnement d'apprentissage <i>(Physics Education Technology and Human Interaction)</i>
RPG	Réponse Psycho-Galvanique de la peau ou <i>Galvanic Skin Response</i> (GSR)
SDK	<i>System Development Kit</i>
STI	Système tutoriel intelligent
TICE	Technologies de l'Information et de la Communication en Éducation
XML	<i>Extensible Markup Language</i> traduit en langage extensible de balisage

RÉSUMÉ

Bien que les environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH) aient apporté une amélioration à la qualité de l'apprentissage, des recherches restent à mener pour bien comprendre et interagir avec l'apprenant. Dans notre recherche, nous avons tenté d'extraire des règles comportementales d'un agent artificiel pouvant offrir de l'aide à l'apprenant. Nous avons mis en place un environnement d'apprentissage d'un cours en sciences physiques sur l'effet photo-électrique vu sous l'angle quantique. Il s'agissait d'un apprentissage en sciences basé sur l'utilisation d'un simulateur et fondé sur l'expérimentation et le conflit cognitif. Les apprenants utilisaient des ordinateurs personnels dotés d'un oculomètre et de capteurs physiologiques et étaient connectés en réseau à un tuteur humain placé dans un local distant. Durant le déroulement du cours, les apprenants étaient soutenus par le tuteur humain avec qui ils pouvaient échanger des paroles ou des messages textuels pour surmonter les difficultés éprouvées et qui nuisaient à la qualité de l'apprentissage. Le tuteur humain était capable de déceler les faiblesses et de chercher des indices reflétant l'état de la compréhension des apprenants et intervenait pour aider et soutenir, malgré son éloignement et l'impossibilité de voir les gestes ou expressions faciales de l'apprenant.

Tout au long des expérimentations, nous avons recueilli des informations oculométriques, physiologiques, des mouvements et actions de la souris et sur les variations des variables du simulateur. Nous avons également enregistré une vidéo de l'apprenant et du dialogue avec le tuteur. Nous disposons de données qui n'étaient pas à la portée du tuteur humain. Dans nos analyses de ces données non verbales et des traces d'utilisation, nous avons essayé de trouver des indicateurs pouvant être associés aux interventions du tuteur humain. Ces indicateurs ont servi à l'élaboration de règles pouvant être utilisées par un agent tuteur artificiel lui permettant d'identifier le comportement de l'apprenant et d'agir de la même façon qu'un tuteur humain pour le soutien à l'apprentissage.

Mots clefs : Environnements informatiques pour l'apprentissage humain, Cyberapprentissage, Simulation informatique, Expérimentation assistée par ordinateur, Soutien à l'apprenant, Systèmes tutoriels intelligents, Apprentissage constructiviste, Modèle de l'apprenant, Suivi oculaire, Réponse psycho-galvanique.

INTRODUCTION

Le développement des applications en informatique couvre une multitude de domaines et s'intègre dans différentes disciplines. Parmi celles-ci, le domaine des environnements informatiques pour l'apprentissage humain fait intervenir plusieurs disciplines et expertises comme la psychologie cognitive, les sciences de l'éducation, l'intelligence artificielle et l'informatique. Certes, un système de soutien informatisé à l'apprentissage est un système complexe, qui repose sur plusieurs éléments comme la modélisation de l'utilisateur, de l'expertise du domaine, de la stratégie pédagogique, le développement de l'environnement d'apprentissage et de la matière à enseigner. La réussite de l'apprentissage dépend de toutes ces composantes. Le comportement humain est subjectif et difficile à modéliser. Il n'est pas évident de simuler le comportement d'un tuteur humain dans le but de le substituer par un tuteur automatisé. L'humain manipule beaucoup d'informations et de connaissances en même temps, il utilise des heuristiques ainsi que l'intuition et le bon sens, qui sont le produit d'un ensemble d'expériences antérieures. Pour un tuteur humain, ces connaissances l'aident à sélectionner les stratégies appropriées à adopter pour aider l'apprenant. Sans prétendre une substitution complète d'un tuteur humain par un tuteur virtuel, de nombreuses recherches ont été entreprises depuis plus de 20 ans

dans le domaine de l'AIED¹ pour construire des machines à enseigner pouvant aider l'apprenant dans certaines situations d'apprentissage.

Notre recherche se situe dans ce contexte et vise à améliorer la machine dans son rôle de coach lors de diverses situations d'apprentissage. Le fait de dégager le tuteur humain de certaines fonctions automatisables est profitable aussi bien pour lui, qui aura plus de temps et d'énergie à accomplir ses fonctions « humaines », que pour les apprenants qui auront la chance d'être doublement assistés. Le tuteur humain ne peut être disponible en tout temps pour répondre aux besoins de l'apprenant. Il est aussi incapable de suivre chaque apprenant d'une façon individuelle, plusieurs cours se font en groupes et l'apprenant doit souvent compléter son apprentissage après les cours.

Ce travail de recherche vise l'amélioration des technologies de l'information et de la communication en éducation (TICE) afin de promouvoir un meilleur apprentissage. Les utilisateurs peuvent être des étudiants qui suivent des cours faisant partie de leur scolarité ou des personnes qui veulent tout simplement apprendre. Ces catégories d'utilisateurs forment en fait une seule grande catégorie qu'on appellera tout simplement les apprenants. L'utilisation des TICE est devenue une alternative sérieuse pour le soutien à l'apprentissage et a introduit des changements aussi bien chez les apprenants que chez les tuteurs et les concepteurs pédagogiques. La notion de distance entre tuteur et apprenant n'est plus la même, un cours peut se donner aussi bien face à face qu'à distance. Le cours est souvent mal adapté aux besoins et au rythme de chaque apprenant, ce qui nécessite une nouvelle approche à la conception du cours. Les tuteurs voient leur rôle changer, car au-delà du fait qu'ils doivent s'adapter aux nouveaux environnements d'apprentissage, ils doivent concevoir leurs cours en tenant compte de l'ergonomie, des outils utilisés et de la distance entre les apprenants. Le rôle de l'apprenant a aussi bien changé, car les TICE l'interpellent

¹ AIED = Artificial Intelligence in Education. Il s'agit du domaine de recherche relié au développement de systèmes intelligents d'aide à l'apprentissage. Ce domaine est régi par une communauté de chercheurs à travers la société savante AIED Society.

désormais à devenir plus autonome et plus actif et à mieux tirer profit de l'opportunité d'un apprentissage individualisé et adapté à ses besoins d'apprentissage.

Cette thèse est organisée en six chapitres : le premier chapitre présente le cadre général de notre recherche en détaillant la problématique, les objectifs ainsi que la méthodologie adoptée. L'état de l'art sur les travaux réalisés dans des domaines similaires ayant utilisé les techniques de l'oculométrie et des mesures physiologiques forme le deuxième chapitre. Le troisième chapitre présente le cadre théorique de la recherche. Il expose les théories d'apprentissage, l'importance du soutien aux apprenants. Il introduit par la suite les simulateurs et leurs rôles dans l'apprentissage et met en évidence le simulateur de l'effet photoélectrique utilisé dans notre environnement. La dernière partie de ce chapitre présente le système visuel humain et l'importance de l'analyse du regard dans les environnements d'apprentissage.

Le quatrième chapitre est composé de deux sections. La première section expose les techniques utilisées pour l'enregistrement des données oculaires et les différents indices qu'on peut recueillir. La deuxième partie expose l'intérêt des mesures physiologiques, leurs principes et la justification du choix de la mesure de la conductance de la peau.

Le cadre expérimental est présenté dans le cinquième chapitre, il expose le déroulement des expériences dans notre environnement d'apprentissage ainsi que la description du recueil et validation des données collectées.

Le cinquième et dernier chapitre présente l'analyse statistique des données collectées ainsi que les conclusions tirées de cette étude.

CHAPITRE I

PRÉSENTATION DE LA RECHERCHE

1.1 Problématique de la recherche

Comme toute communication entre humains, il y a une partie de la communication qui est véhiculée par la voix (communication verbale) et celle qui est non verbale comme les gestes, les expressions faciales, le soupir, le regard et les émotions. L'information non verbale peut véhiculer plus d'informations que la communication verbale. En effet, certains signes du visage peuvent informer que l'individu est en difficulté même si son discours ne le révèle pas. Un enseignant qui donne un cours de façon classique, dans une salle de cours et en présence de ses étudiants a la faculté d'identifier si son message a été bien véhiculé ou non et si ses étudiants l'ont compris ou non. Dépendamment des stratégies pédagogiques de chacun, l'enseignant prend en compte les réactions non verbales de ses étudiants, et à son tour enrichit sa communication verbale avec des changements de ton, des gestes et des émotions dans le but d'atteindre ses objectifs pédagogiques (Richmond, McCroskey, & Hickson, 2007). Les interactions non verbales font partie de nombreuses études dans les interactions entre humains et machines et commencent à peine à être pris en compte dans les EIAH. Les difficultés liées à enregistrer, codifier et analyser des informations non verbales provenant de différents dispositifs sont de taille. Nous accentuons le fait qu'il n'est pas facile de trouver des

équipements capables de capter toutes les expressions humaines non verbales, en plus, une telle démarche risquerait d'être trop encombrante et trop intrusive pour l'utilisateur. Sur ce plan, l'humain se réserve encore une bonne avancée sur les machines.

Dans notre recherche, nous nous concentrons sur deux types d'informations non verbales qui sont le suivi du regard et la mesure physiologique de la conductance de la peau. Malgré la disponibilité d'autres dispositifs, nous avons opté pour cette limitation dans le but d'offrir à l'utilisateur un environnement d'apprentissage le moins intrusif et le plus naturel possible.

Le système tutoriel visé s'inspire du comportement humain de l'enseignant et de l'étudiant. Il n'est pas évident de concevoir un système qui peut réagir comme un tuteur humain, mais nous nous inspirons des interactions entre enseignant et étudiant dans un environnement réel d'apprentissage nommé PhetHI². Le comportement de PhetHI est régi par une liste de règles établies suite à l'analyse des traces d'utilisation dans l'environnement d'apprentissage en plus des informations non verbales. PhetHI capte et analyse des données, applique les règles appropriées et formule si nécessaire une aide à communiquer à l'utilisateur. Ces règles sont déterminées de façon expérimentale et dans un environnement d'apprentissage réaliste en présence d'un vrai cours d'apprentissage de la physique animé par un enseignant expérimenté dans la matière et avec des étudiants ayant le profil et préalables adéquats pour suivre ce cours. Nous signalons que notre système ne dispose pas des mêmes informations que l'enseignant et qu'il est incapable de le remplacer. Cependant, il cherche à imiter certains comportements de l'enseignant dans le but de reproduire une aide similaire dans des conditions similaires. Notre système est conçu pour donner de l'aide d'une manière automatique à l'apprenant en fonction de l'historique des interventions de l'enseignant et de l'analyse des données non verbales. Notre système est bâti autour

² PhetHI est le nom adopté pour notre environnement d'apprentissage (Physics Education Technology and Human Interaction).

d'un simulateur de l'effet photoélectrique, il ne s'agit pas d'un système générique, mais plutôt d'un système assez paramétrable pour être utilisé éventuellement avec d'autres simulateurs, spécifiquement ceux développés par l'Université du Colorado (McKagan *et al.*, 2008).

Cette recherche s'inscrit dans le domaine de la communication humain-machine et plus spécifiquement dans celui de l'assistance à l'utilisateur dans un environnement informatique d'apprentissage humain (EIAH). Comme déjà introduit précédemment, on note des faiblesses au niveau du dialogue humain-machine qui est moins évolué que le dialogue entre humains. La machine manque d'outils pour nous comprendre et utilise des langages moins évolués que le nôtre. Nous sommes en effet encore bien loin de réussir au test de Turing qui préconise une interaction personne-machine qui ne saurait être différenciée d'une interaction avec un humain. L'apprenant peut s'exprimer de différentes façons lors d'une tâche d'apprentissage et le tuteur, grâce à ses capacités humaines, peut interpréter et comprendre son état et ses intentions. Le tuteur humain gère une quantité impressionnante d'informations multimodales et peut prendre des décisions et réagir convenablement pour expliquer, corriger ou sanctionner selon la façon qu'il juge adéquate. L'analyse psychologique du comportement du tuteur peut mener au développement de modèles de son expertise, son dialogue et ses stratégies pédagogiques (Frederiksen, Donin, & Roy, 2000). Ces modèles peuvent être utilisés pour concevoir des tuteurs artificiels imitant le comportement naturel du tuteur humain. L'étude du comportement du tuteur humain a fait l'objet de nombreuses recherches pour concevoir des systèmes tuteurs informatisés. Plusieurs systèmes ont découlé de ces recherches et couvrent un grand spectre de domaines aussi variés que la physiologie (Shah, Evens, Michael, & Rovick, 2002) ou la physique (VanLehn, Siler, Murray, Yamauchi, & Baggett, 2003). Ces systèmes tuteurs assistent l'étudiant dans sa tâche d'apprentissage et lui offrent l'aide nécessaire.

Dans le domaine de la formation, on utilise de plus en plus l'ordinateur comme moyen d'apprentissage. Certes, son introduction s'accompagne de changements comportementaux aussi bien chez l'apprenant que chez le tuteur : la communication devient indirecte et passe par l'ordinateur. Une partie de l'attention et du regard de l'apprenant est affectée à l'écran plus qu'à la personne qui est en train d'enseigner. Certains liens se brisent entre tuteur et apprenant. Si un tuteur peut bien identifier un acte d'étonnement ou d'incompréhension de l'apprenant sans que ce dernier l'exprime verbalement, il ne peut malheureusement pas suivre individuellement tous les apprenants et interpréter correctement tout ce qui est non verbal. Les actions et les émotions de l'apprenant peuvent être très utiles au tuteur pour juger l'état cognitif de celui-ci et agir en conséquence. Les émotions ont une influence sur la motivation (Petri & Govern, 1991) et par conséquent, sur la qualité de l'apprentissage. Les vertus de la dimension affective de l'interaction en contexte d'apprentissage humain avec l'ordinateur ont été bien étudiées par Nkambou, Delozanne et Frasson (Nkambou, Delozanne, & Frasson, 2007). Cependant, le tuteur, même dans un cours particulier face à l'apprenant, est incapable d'avoir tous les indices sur le déroulement de ses processus cognitifs. Il ne peut pas savoir si le texte présenté a été réellement lu et sur quel mot ou section l'apprenant s'est attardé. De plus, les émotions des apprenants ne sont pas toujours facilement identifiables. Il est utile d'identifier les états affectifs (Lisetti & Nasoz, 2004) et d'analyser le regard de l'apprenant (Baccino, 2004) pour mieux le « comprendre » et l'assister.

Le tuteur ou l'expert est une ressource précieuse et coûteuse. Le fait de faciliter ses tâches et de le doter d'un maximum d'informations sur le déroulement de l'apprentissage et des états de ses apprenants contribue favorablement à l'amélioration de la qualité d'apprentissage et à diminuer la durée de ses interventions. Pour généraliser l'accessibilité de l'apprentissage ou du téléapprentissage en tout temps, on ne peut plus compter sur la présence continue du tuteur humain. L'utilisation d'un agent tutoriel pourrait substituer certaines tâches

planifiées, mais est-il possible d'utiliser les informations captées pour offrir une aide au bon moment, pour comprendre les intentions de l'apprenant et pour adapter l'apprentissage à son rythme et à ses préférences? La majorité des systèmes d'aide se contentent de faire un diagnostic et une évaluation de la situation et déclenchent le mécanisme d'aide programmé, mais cette aide n'est pas toujours adéquate ou utile pour l'apprenant. Il est pertinent de savoir l'impact réel de cette aide et comment l'apprenant réagit.

1.2 Objectif de la recherche

Notre projet vise à concevoir un système informatique basé sur l'utilisation d'agents pédagogiques dans le but de prendre en compte l'état de l'apprenant et son comportement pour mieux l'assister durant le processus d'apprentissage. Le comportement de l'agent sera inspiré de celui d'un tuteur humain en observant ses interventions et en cherchant à identifier les indices probables (liés à des actions non verbales de l'apprenant) impliqués dans le déclenchement de l'aide. Cette modélisation nous servira à déterminer quelles actions devraient être faites par un tuteur informatisé dans les mêmes conditions.

Plusieurs informations sont recueillies durant l'apprentissage : il y a d'une part les mouvements de la souris, les données physiologiques et spécifiquement les données oculométriques. Une fouille de ces informations permet d'en extraire des connaissances utiles à la compréhension des activités humaines de l'apprenant dans le but de mieux l'aider.

Notre objectif global est d'améliorer la qualité de l'interaction afin de faciliter et de favoriser un meilleur apprentissage par l'apprenant. Il s'agit d'offrir à ce dernier un système efficace qui s'adapte à son profil cognitif et comportemental lors d'une activité d'apprentissage. Pour y arriver, une étape importante consiste à identifier les règles de comportement d'un tuteur expert que l'on peut efficacement associer aux différents canaux de communication en situation d'apprentissage. Cette thèse se

concentre sur les canaux oculométrique et physiologique et vise plusieurs objectifs spécifiques :

- Mettre en évidence l'importance des informations issues du regard de l'apprenant quant à la description de ses intentions et de sa compréhension.
- Concevoir une base de données comportementale pouvant contenir les données issues de l'oculomètre, de la souris et des capteurs physiologiques, de même que des données reliées à l'aide du tuteur. Elle sera utilisée lors de l'analyse des données.
- Analyser les traces d'utilisation dans les données enregistrées et trouver des corrélations entre des données et des actions du tuteur ou de l'apprenant.
- Proposer des règles comportementales pouvant être intégrées dans un agent tutoriel artificiel inspiré du comportement naturel du tuteur humain et qui réponde en temps réel aux émotions et au parcours oculaire de l'apprenant. Ces règles tutorielles serviront pour la prévention proactive de situations de difficulté d'apprentissage pour l'améliorer.

1.3 Approche méthodologique

L'apprentissage, ou la formation touche une très vaste population. L'être humain est doté de capacités lui permettant d'apprendre en interagissant avec son environnement. Dans ce projet nous avons opté de travailler avec des étudiants du CÉGEP³ en leurs proposant un cours de physique, inscrit dans leur programme, mais qu'ils n'ont pas encore suivi.

Dans des travaux antérieurs, nous avons utilisé le système ExAO⁴ (Nonnon, Touma, Dufresne, Guerdelli, & Rouatbi, 2004) et nous y avons intégré un module d'aide basé sur un ensemble de règles définies et gérées par un système expert. Nous

³ Collège d'enseignement général et professionnel

⁴ ExAO : Expérimentation Assistée par Ordinateur

nous sommes inspirés des résultats obtenus pour les expérimentations réalisées en utilisant le simulateur d'apprentissage des sciences physiques Phet⁵.

Le simulateur Phet sera intégré dans notre prototype qui comportera en plus les modules suivants : un module pour la gestion du cours théorique, un module d'évaluation de la résolution de problèmes et un module de clavardage et d'aide (figure 1.1).

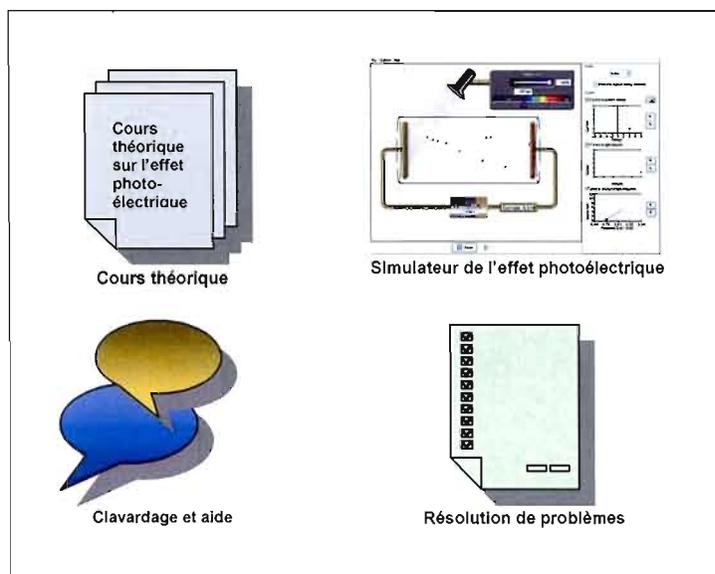


Figure 1.1 Les composantes de l'environnement d'apprentissage

Les candidats potentiels qui peuvent participer à nos expérimentations doivent satisfaire plusieurs conditions et ne devraient pas avoir suivi le cours objet de notre expérimentation. De cette manière, nous nous assurons de l'homogénéité de la population à étudier. Dans une deuxième étape, nous effectuons un prétest pour nous assurer que les candidats ont les connaissances préalables et qu'ils présentent une motivation pour l'expérience. Des sessions de tests individuels sont à effectuer en laboratoire d'une durée d'environ une heure.

Le cours de physique à présenter traite de l'effet photoélectrique vu sous l'angle de la physique classique et ensuite sous l'angle de la physique quantique. Il est

⁵ Physics Education Technology <http://phet.colorado.edu/new/index.php>

découpé en plusieurs pages, chaque page sera découpée en zones en fonction du contenu à étudier. Le cours à présenter est allégé et se concentre sur des aspects bien précis dans le but d'assurer une interface simplifiée et d'offrir à l'apprenant une autonomie d'interaction. Au besoin, l'apprenant peut dialoguer avec son tuteur par le biais du clavardage ou par la voix.

Chaque candidat sera placé devant un ordinateur et il lui suffira de lire le contenu des pages, de suivre les directives (s'il y en a), de faire l'effort de comprendre et de répondre aux questions qui lui seront posées. Les questions seront à choix multiples pour accélérer la saisie des réponses et faciliter l'interprétation et la correction.

Tout au long du suivi du cours, les dispositifs suivants seront mis en place :

- L'oculomètre enregistre les coordonnées des endroits fixés par les yeux, ce qui nous permettra de déterminer le texte lu ainsi que les durées de lecture;
- Le capteur physiologique enregistre la conductance de la peau « réponse psychogalvanique de la peau ». Les données issues de ce capteur informent sur l'état physiologique de l'apprenant;
- Les mouvements et actions de la souris sont enregistrés et serviront à retracer les actions posées dans l'environnement, ainsi que la durée entre les évènements.

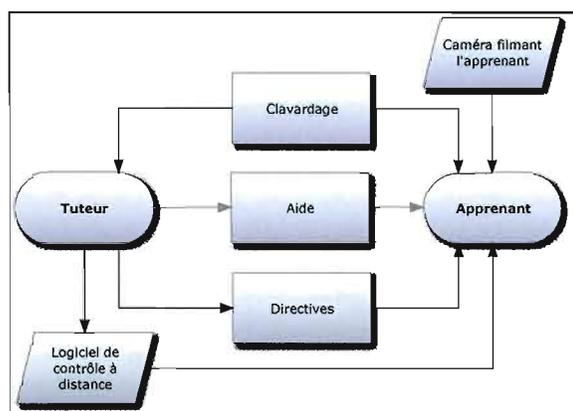


Figure 1.2 Interactions de l'apprenant avec le tuteur humain

Notre approche expérimentale s'inspire de la technique du magicien d'Oz (Amalberti & Valot, 1993). Ainsi, le tuteur humain sera placé dans un autre local pour simuler un environnement d'apprentissage en ligne. Il aura la possibilité d'échanger des messages avec l'apprenant avec un système de clavardage et de visualiser l'écran de l'apprenant ou d'en prendre le contrôle grâce à un logiciel de contrôle à distance (VNC⁶). Nous allons utiliser une caméra web pour filmer l'apprenant durant son apprentissage, les enregistrements seraient utilisés a posteriori pour visionner ses actions. La figure 1.2 présente les communications possibles et observables entre l'apprenant et tuteur humain.

Le tuteur humain dispose ainsi d'une masse d'information qui lui permet un meilleur suivi individuel de chaque apprenant. Il devra interagir aux moments jugés adéquats pour assister son apprenant, et ce, sous plusieurs formes, par exemple : une intervention corrective, explicative, d'encouragement ou de sanction, etc. (comme présenté par la figure 1.3).

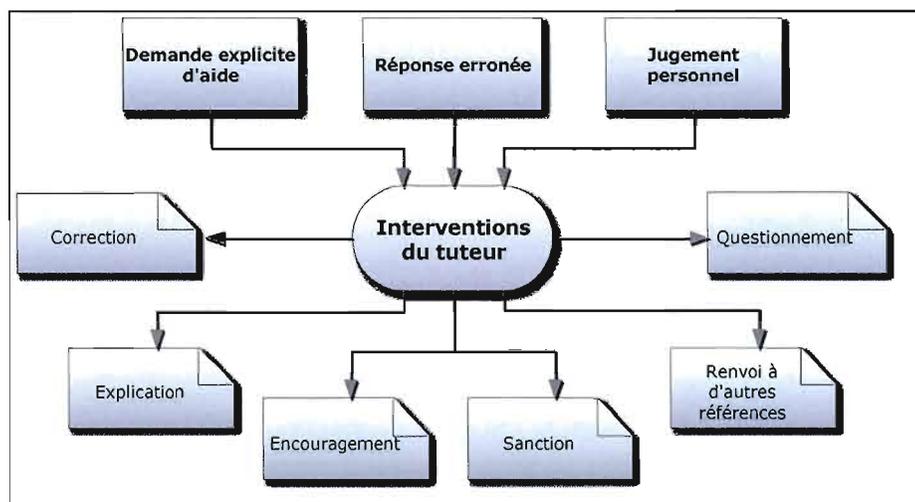


Figure 1.3 Les activités d'aide du tuteur humain

⁶ VNC est un logiciel de contrôle à distance qui permet de voir et d'agir sur des applications d'un ordinateur distant connecté en réseau (<http://www.realvnc.com/>)

Le tuteur intervient dans les cas suivants :

- Demande explicite d'aide : l'apprenant est en situation nécessitant de l'aide (par exemple s'il n'arrive pas à comprendre un concept ou s'il veut plus de détails ou un exemple) et en fait une demande explicite au tuteur.
- Réponses erronées : une mauvaise réponse devra être corrigée par le tuteur en lui fournissant plus d'explications, d'exemples ou de le renvoyer vers d'autres ressources.
- Jugement du tuteur : le tuteur peut intervenir quand il juge que c'est profitable pour l'apprenant même si aucun signe ne révèle le besoin. Il peut par exemple attirer l'attention de l'apprenant ou le préparer pour la suite ou tout simplement pour mettre plus de valeur sur un concept donné.

Comme indiqué plus haut, selon son jugement et son expertise, le tuteur intervient en fournissant une correction, une explication, un encouragement, une sanction, un renvoi à d'autres références, un questionnement, etc.

Nous justifions cette approche d'extraction des connaissances de la manière suivante : même si l'intérêt de l'orientation du regard a été établi en situation d'interaction personne-machine (Collet, 1999), il n'est pas possible de formaliser des règles qui gouvernent ces gestes dans un contexte d'interaction en général et dans un contexte d'apprentissage en particulier. Nous ne pouvons donc pas de manière absolue demander aux tuteurs humains d'articuler leur expertise de la gestion du regard de l'apprenant en situation d'apprentissage. À notre connaissance, il n'existe pas de théorie en éducation ou en psychologie qui établit formellement des principes reliés à l'orientation du regard lors de la résolution de problèmes et/ou qui régit le comportement d'un tuteur en réponse à ces orientations. Il est donc nécessaire de procéder à une expérimentation spécifique qui permettrait de déduire de tels principes.

Étant donné l'ampleur de la thèse, nous nous sommes limités aux objectifs spécifiques présentés précédemment. Nous nous sommes contentés d'implémenter un prototype incluant un échantillon de règles comportementales pour nous assurer de la faisabilité. Nous repoussons pour des travaux futurs la phase qui consiste à implémenter une base de règles de comportements complète issue de nos expériences dans un tuteur artificiel qui agira dans le même environnement que le tuteur humain. Au moment venu, il suffira de reprendre la même expérience, avec un autre public, en substituant le tuteur humain par un tuteur artificiel qui implémente les règles issues de l'analyse des données provenant des capteurs physiologiques, de l'oculomètre et des mouvements de la souris.

Le système d'aide sera basé sur un ensemble de règles qui seront définies suite aux observations du tuteur humain lors des expérimentations avec les étudiants. Une probabilité est associée à chaque règle pour contrôler son déclenchement. Les règles sont de la forme « *Si condition Alors Action* ». Le tuteur artificiel dispose de plusieurs informations, une fouille dans ces données lui permettra d'établir des liens entre causes (constatations) et effets (actions) et de prédire ce qu'un tuteur humain pourrait proposer comme aide dans les mêmes conditions. Le système utilisera les données suivantes :

- Le modèle usager : informe sur le profil de l'apprenant;
- Le modèle pédagogique : présente l'orchestration du cours;
- Le modèle expert : représente les connaissances de l'expert, on se limitera à la liste des solutions valides pour les différents problèmes;
- Les informations issues de l'analyse des mouvements de la souris : renseignent sur les actions posées en fonction du contexte (ajustement d'un contrôle de la simulation, choix d'une explication), sur le temps passé entre les actions et sur les zones parcourues par la souris (affichage des informations sur un contrôle);

- Les informations issues de l'analyse des données physiologiques : informent sur l'état de l'apprenant, par exemple savoir son niveau de stress.
- Les informations issues de l'analyse des mouvements oculaires : informent si le temps de lecture insuffisant ou trop long, sur les zones sautées ou non lues et sur les oscillations entre zones, la concentration (grandeur de pupille), etc.

1.4 Pertinence et retombées de la recherche

Cette recherche devra 1) permettre de démontrer la pertinence d'utilisation de l'oculomètre et des capteurs physiologiques pour améliorer le dialogue entre humain et ordinateur, particulièrement en situation de résolution de problème; et 2) améliorer les capacités d'adaptation éventuelle d'un tuteur artificiel par la gestion de nouvelles sources d'information pertinente (les données oculométriques et physiologiques). En effet, se limiter juste à l'utilisation du clavier et de la souris implique forcément une perte d'information très utile pour estimer l'état dans laquelle l'apprenant se trouve. Les indices recueillis sont communiqués au fur et à mesure et ne sont pas facilement détectables par un tuteur humain même s'il est en contact direct avec l'apprenant. L'oculomètre a l'avantage d'identifier ce que l'apprenant regarde à tout moment et contribue à définir une aide contextuelle qui est plus appropriée, sans perturber l'apprentissage. Le tuteur artificiel peut exploiter ces informations afin d'estimer l'état cognitif de l'apprenant et de l'assister dès qu'il y a un besoin. Il peut également remettre en question la qualité du cours et détecter les zones difficilement compréhensibles ou du moins celles qui conduisent l'apprenant à des ambiguïtés ou provoquent un ralentissement de son apprentissage. Ceci devra aider les concepteurs à raffiner l'organisation des scénarii pédagogiques.

Dans le chapitre suivant, nous présentons quelques travaux reliés à l'utilisation de l'oculométrie dans des domaines variés et nous faisons le point sur certains travaux de recherche sur l'apprentissage et l'impact de l'utilisation de l'oculométrie.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART ET TRAVAUX RELIÉS

Bien que l'oculométrie ne soit pas encore très répandue, plusieurs travaux et recherches se sont concentrés sur son utilisation dans des domaines très variés. En effet, l'oculométrie n'est pas un domaine très récent, il a été abordé par Cattell (Cattell, 1886) et repris par Huey (Huey, 1908) et a connu un grand essor grâce aux travaux de Rayner et Pollatsek (Rayner & Pollatsek, 1992) qui ont effectué plusieurs études sur les mouvements oculaires. Ces derniers ont démontré la possibilité de les observer, de les enregistrer et de déduire par l'analyse, la capacité de lecture et de compréhension des sujets : les mouvements oculaires reflètent les processus cognitifs engagés. Les mouvements oculaires ont été utilisés en sciences humaines comme des indices des opérations mentales pour observer des activités mentales de traitement des informations visuelles et pour tester des modèles psycholinguistiques (Just & Carpenter, 1980).

L'oculomètre fournit des informations sur ce que l'utilisateur est en train de regarder. Cette technique a été utilisée dans de nombreux domaines comme les sciences humaines, le militaire, le marketing, l'industriel et le médical. En effet, il est possible actuellement de commander des appareils par le regard (commande par les yeux), ceci peut servir par exemple à combler une déficience chez une personne. Les personnes handicapées ont bien bénéficié de l'oculométrie, Hutchinson *et al.*

(Hutchinson, White Jr, Martin, Reichert, & Frey, 1989) ont mis au point un système assurant l'utilisation d'un clavier virtuel par le regard : une touche regardée pendant un certain temps sera considérée comme une touche tapée. Leur système ERICA (Eye-gaze-Response Interface Computer Aid) permettait d'appeler des infirmières et s'est étendu à l'utilisation des traitements de textes, des programmes éducatifs et des jeux vidéo. Un temps de fixation de 2 secondes correspond à la sélection d'une commande et si elle demeure encore fixée pendant une autre seconde on simule l'appui sur la touche « entrée ». Le traitement de texte développé présentait plusieurs insuffisances : d'une part, la taille de l'écran ne permettait pas de saisir le clavier virtuel en entier avec les menus et le texte en cours d'écriture. La résolution de l'écran a du tenir compte des limites de l'oculomètre, une forte résolution rendait impossible l'identification des caractères du clavier virtuel et des commandes. Il fallait environ une heure et demie pour saisir juste une page, ce temps a été amélioré par l'intégration des phrases courantes dans des menus et par l'implantation d'un algorithme de prédiction des mots en fonction des deux dernières lettres tapées (Frey, White Jr, & Hutchison, 1990). D'autres recherches ont pu améliorer ce système comme celles de Istance, Spinner et Howarth (Istance, Spinner, & Howarth, 1996) en proposant plusieurs claviers virtuels qui apparaissent en fonction du contexte.

L'oculométrie a été aussi utilisée dans des situations où les mains étaient occupées. Charlier *et al.* (Charlier, Sourdille, Behague, & Buquet, 1992) ont mis au point un microscope guidé par le regard. Un chirurgien dont les deux mains sont occupées par la manipulation des instruments lors d'une opération ne peut déléguer le déplacement du champ visuel du microscope à une autre personne vu la lenteur et les risques d'erreurs qui sont élevés. Il ne peut commander le déplacement par la voix, car elle est discontinue donc inadéquate et inefficace pour des réglages fins. L'utilisation des pieds va augmenter les charges cognitives puisque les mains sont aussi en mouvements et augmente la fatigue et les risques de mouvements maladroits.

Avec la commande par le regard, les commandes du microscope se faisaient d'une manière naturelle, simple et précise.

L'utilisation des données oculométriques en temps réel a été abordée par Jacob (Jacob, 1991) qui voyait la possibilité de commander des menus et d'effectuer des sélections par le regard. Ces idées ont été reprises par Salvucci et Anderson (Salvucci & Anderson, 2000) pour concevoir le IGO (Intelligent Gaze-added Operating-system), un système commandé par les yeux. Dans cette même voie, Hornof, Cavender et Hoselton (Hornof, Cavender, & Hoselton, 2004) ont conçu le système EyeDraw permettant aux enfants atteints d'une déficience motrice de dessiner des images par le mouvement des yeux.

Les expériences précédentes nous prouvent que les yeux peuvent dépasser leur rôle sensoriel pour devenir un organe essentiel en situation d'interaction et capable de commander des claviers ou des instruments, comme les doigts le font. Les mouvements des yeux peuvent devenir aussi un indicateur révélateur d'un comportement de l'utilisateur, par exemple une zone regardée plus que les autres peut révéler une ambiguïté ou un intérêt.

Le domaine d'évaluation des interfaces web est un autre domaine qui témoigne de nombreuses expérimentations de l'oculométrie. Cette technique a permis d'améliorer la conception des interfaces. Les travaux de Nielsen et Pernice (Nielsen & Pernice, 2009) et les expériences faites sur des utilisateurs du web ont permis de montrer l'importance des informations issues du suivi oculaire. Selon Nielsen, la manière de lire et d'explorer une page web est fortement influencée par les buts de l'utilisateur. Il a identifié les zones de la page que les utilisateurs regardent en premier lieu et comment ils réagissent aux informations publicitaires. Il a démontré suite à de nombreuses expériences avec des utilisateurs du web que les endroits les plus fréquentés sont sous forme de la lettre « F ». La majorité des utilisateurs commencent par lire la bande horizontale du haut, ensuite une bande horizontale du milieu et enfin ils parcourent la zone verticale gauche. Une autre zone a aussi des chances d'être

consultée est la zone horizontale du bas, ce qui donne une forme qui ressemble plus à un « E » qu'à un « F ». L'étude du comportement des lecteurs vis-à-vis des pages web a démontré que les utilisateurs ne lisent pas les pages mot à mot, mais sautent d'un endroit à l'autre. Pour faire passer un message qui sera visible par la majorité des lecteurs, il est judicieux d'organiser les pages web de façon à présenter les phrases contenant les informations les plus importantes aux endroits les plus consultés. Toujours selon Nielsen et Pernice (Nielsen & Pernice, 2009), il existerait une grande différence entre la lecture d'un document imprimé et d'un document en ligne. Il affirme que son guide d'écriture pour le web double l'utilisabilité d'un site web et augmente de façon spectaculaire le transfert d'informations à l'utilisateur. Ceci a permis de mettre l'accent sur l'ergonomie cognitive et son apport pour l'amélioration des interfaces et la communication entre humain et ordinateur.

D'autres travaux qui ont été entamés par Baccino (Baccino, 2004) se sont concentrés sur l'interprétation et à la modélisation de l'exploration visuelle dans la recherche d'informations sur le web et la lecture électronique. Il a utilisé l'oculométrie cognitive⁷ pour la conception et l'évaluation des interfaces utilisateurs (Baccino, Bellino, & Colombi, 2005) et pour suivre et interpréter en temps réel l'activité cognitive des utilisateurs du web dans le but d'évaluer la navigation et l'exploration de documents électroniques. Ces recherches démontrent que le regard, ce mouvement naturel des yeux, peut être utilisé pour l'évaluation des interactions humain machine.

Cristina Conati, chercheuse dans le domaine de l'intelligence artificielle, s'intéresse à la modélisation de l'utilisateur, les interfaces adaptatives et les interfaces entre humain et machine. Elle a consacré plusieurs de ses recherches à établir des modèles usager du côté cognitif en déterminant ses connaissances, ses buts et ses préférences. Elle a aussi étudié les réactions émotionnelles dans le but de réaliser des

⁷ L'oculométrie cognitive vise la description des comportements sous-jacents à l'activité visuelle et l'interprétation des opérations cognitives lors d'une activité comme la lecture.

systèmes qui s'adaptent automatiquement aux besoins de l'utilisateur. Dans des nombreuses expériences, elle a utilisé des mesures du mouvement des yeux. Conati et Merten (Conati & Merten, 2007) ont décrit une expérience utilisant des données issues de l'oculomètre pour alimenter le modèle usager dans le but d'évaluer le comportement métacognitif de l'utilisateur durant ses interactions avec un environnement d'apprentissage par l'exploration (*Exploratory Learning Environment*). Cet environnement éducatif permettait d'apprendre par l'exploration et par l'auto-explication, ces deux habiletés ne sont pas forcément développées chez tous les apprenants. Conati et Vanlehn (Conati & Vanlehn, 2000) ont proposé un système qui modélise le comportement auto explicatif en utilisant des données sur l'attention issues d'un oculomètre. Il s'agit d'utiliser ces données dans un environnement d'apprentissage des mathématiques où l'apprenant peut effectuer des essais et des découvertes. Le but n'étant pas d'offrir uniquement un environnement d'essais, mais de retracer les intentions et le raisonnement de l'apprenant. Une étude de Monty et Senders (Monty & Senders, 1976) a démontré que le regard peut renseigner sur la partie de l'interface captant l'attention de l'utilisateur.

L'oculomètre mesure également la dilatation de la pupille; Beatty (Beatty, 1982) a trouvé une corrélation entre la charge cognitive et la dilatation de la pupille, des résultats qui ont été contestés par Schultheis et Jameson (Schultheis & Jameson, 2004) qui a testé la lecture de textes dans un environnement hypermédia adaptatif sans trouver de liens entre la difficulté des textes ou la charge cognitive et la dilatation de la pupille. La dilatation de la pupille a été utilisée pour estimer la difficulté de la tâche. En effet, Barrier (Barrier, 2008) a observé une corrélation positive entre la dilatation de la pupille et la difficulté de la tâche. Dans une recherche récente, Conati et Merten (Conati & Merten, 2007) ont inclus les mesures de la pupille comme une source de données supplémentaire pour prédire l'auto explication et raffiner le modèle de l'apprenant. Les résultats ont conclu que les données de la pupille ne sont pas un bon indicateur de l'auto explication. Ces chercheurs ont

effectué des expériences sur l'apprentissage des mathématiques avec le système ACE (*Adaptive Coach for Exploration*), destiné à des étudiants ayant des notions de base en mathématiques. L'interface développée comprend des équations mathématiques et leurs représentations graphiques. L'apprenant peut varier l'équation d'une fonction et regarder sa courbe et inversement, modifier la courbe et voir sa nouvelle équation. Ce système utilise un assistant (coach) qui fournit des indications dès que l'apprenant manifeste des difficultés. Le modèle de l'apprenant utilisé par ACE est basé sur des réseaux bayésiens dynamiques. Ce modèle présentait une faiblesse au niveau de l'estimation des comportements des apprenants : si une courbe est déplacée plusieurs fois de suite dans son repère sans regarder la variation de son équation, le système suppose que plusieurs explorations ont été faites, ce qui n'est pas le cas. L'absence d'information qui décrit si l'étudiant a bien regardé (exploré) le résultat d'une variation d'un élément quelconque a incité Conati et Merten (Conati & Merten, 2007) à inclure des données issues de l'oculomètre pour pallier cette lacune. Le temps passé à l'exploration est mesuré et sert à évaluer si un processus d'auto explication est en cours. Le temps seul n'est pas un bon prédicteur de l'auto explication : il n'est pas facile de déterminer le temps passé à l'auto explication et le temps d'inaction. L'oculomètre permet de confirmer si l'utilisateur regarde bien l'effet d'une action, donc renseigne si des processus cognitifs sont en cours pour expliquer cet effet.

Sibert, Gokturk et Lavine (Sibert, Gokturk, & Lavine, 2000) ont travaillé sur l'estimation de la performance de l'utilisateur dans l'activité de lecture. Ils ont développé le système « *Reading Assistant* » qui propose de l'aide visuelle et auditive dès que le regard indique des difficultés de lire un mot. Une application similaire a été faite par Starker et Bolt (Starker & Bolt, 1990) pour déterminer quelle partie graphique a un intérêt pour l'utilisateur et fournir plus d'informations sur la zone pointée par des mécanismes d'agrandissement et de synthèse de la parole. Iqbal et Bailey (Iqbal & Bailey, 2004) ont utilisé le suivi du regard pour déterminer le type de

tâche que l'utilisateur est en train de faire. Ils ont développé un questionnaire d'attention qui identifie les moments de faible charge cognitive.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le cadre théorique de notre recherche. Nous allons commencer par présenter un aperçu sur les théories d'apprentissages ensuite nous allons présenter l'aide à l'apprentissage et son importance. L'utilisation des simulateurs est un élément central dans notre recherche, nous poursuivons par une exploration des simulations et introduisons le simulateur pour lequel nous avons opté. Nous terminerons le chapitre par un survol du système visuel humain et son rôle dans la lecture.

CHAPITRE III

CADRE THÉORIQUE DE LA RECHERCHE

3.1 Les théories d'apprentissage

L'apprentissage a été une préoccupation majeure de la société et des penseurs. Plusieurs études et recherches ont été menées pour développer des outils capables d'aider à enseigner, à apprendre mieux et plus vite. Il est bien remarquable que l'enseignement évolue d'une façon constante au bénéfice de l'apprenant. Plusieurs méthodes souvent dites classiques ont été abandonnées pour utiliser les dernières technologies, notamment l'informatique. Tout changement dans les méthodes didactiques et objets d'apprentissage doit être surveillé de près. L'utilisation des technologies éducatives engendre une accélération du rythme d'apprentissage. En effet, l'utilisation des machines y est pour quelque chose, mais il ne faut pas viser à former des apprenants à fonctionner comme des machines. Il faut savoir s'en servir convenablement et de profiter de leurs performances, comme la vitesse de calcul, pour résoudre des problèmes complexes. Les machines sont devenues plus intelligentes, grâce à l'introduction de l'intelligence artificielle, les nouveaux défis sont de faciliter les interactions avec les machines et de les rendre plus simples à utiliser.

L'apprentissage a connu plusieurs évolutions surtout durant les cinquante dernières années. L'utilisation de l'outil informatique pour des fins pédagogiques a

pris une avance pour remplacer l'utilisation du vieux tableau noir. L'introduction de l'intelligence artificielle a donné un élan à l'enseignement. Plusieurs chercheurs ont visé la construction de logiciels améliorant les conditions d'apprentissage aussi bien pour le tuteur que pour l'apprenant.

Depuis la fin du 19^{ème} siècle, la psychologie expérimentale s'est concentrée sur l'étude et l'explication de l'acquisition des connaissances. Nous présentons ci-après un survol des théories d'apprentissage les plus connues :

3.1.1 *Le behaviorisme*

Fondé aux États-Unis en 1913 par John Broadus Watson (Watson, 1913), le courant béhavioriste⁸ suppose que le comportement humain ou animal est de type stimulus-réaction. Cette théorie est un prolongement des travaux de Pavlov sur le conditionnement en 1902, qui était à l'origine de cette conception empiriste de l'apprentissage (Pavlov, 1902). L'un des ancêtres de cette théorie est le philosophe Locke (Locke, 1882) qui considère que l'humain naît vierge de toute connaissance et en fonction de ses expériences dans l'environnement il acquiert tout son savoir (Alamargot, 2001). Pavlov a étudié le réflexe de la salivation chez le chien en présence de la viande. Il concluait que ce réflexe pouvait être conditionné par une répétition du stimulus. Face à une excitation provenant de l'environnement externe, l'organisme réagit d'une certaine façon. Ce type de comportement est observable chez les animaux qu'on peut « programmer » pour réagir à des stimuli. Il est possible de leur « apprendre » à associer une réaction (ou réponse) à un stimulus. Ce type d'apprentissage récompense chaque réaction désirée et pénalise celles non désirées. La récompense renforce l'association entre le stimulus et la réaction. Ce type de comportement caractérise les agents « *simple reflex* ». Pour les apprenants humains, l'enseignement équivaut à la création de conditionnements. Il existe plusieurs formes d'enseignements expérimentaux qui ont découlé du courant béhavioriste.

⁸ Le courant béhavioriste est aussi appelé comportementaliste.

L'apprentissage par essais erreurs met en valeur les erreurs commises (Thorndike, 1913). L'enseignement programmé, initié par Skinner (Skinner, 1982) est basé sur le conditionnement opérant, il suppose que l'enseignant suggère les différentes réactions de l'apprenant et intervient par des renforcements positifs ou négatifs, d'où l'idée de programmer des machines capables d'exécuter des tâches similaires. L'idée est de permettre à l'apprenant d'avancer à son propre rythme en intégrant à chaque étape une petite quantité d'information et en recevant une sanction ou une récompense immédiate en fonction de sa réponse.

Le modèle de Skinner permet de suivre les activités de l'apprenant pour chaque partie élémentaire du cours à apprendre en intervenant par des renforcements immédiats, mais il ignore les facultés intellectuelles de l'apprenant et ne différencie guère entre l'apprentissage chez les animaux de celui chez les humains. Le modèle behavioriste se fonde sur le comportement et nie toutes les représentations mentales et stipule que tout apprentissage ne peut se faire que par une série d'essais et d'erreurs pour ajuster le renforcement des associations entre stimulus et réponse. Ce modèle a permis le développement des premiers didacticiels dans les années 60 pour le système scolaire américain et donner naissance à l'enseignement programmé.

Les applications d'EAO⁹ avaient connu plusieurs difficultés; les limites imposées par les technologies et les théories pédagogiques utilisées à l'époque contraignaient les logiciels à se limiter à proposer des questions avec des choix de réponses et vérifiaient sur le champ l'exactitude de la réponse de l'apprenant. Ce type de formation est guidé par le logiciel imposant à l'apprenant de rester passif sans lui permettre l'acquisition de connaissances conceptuelles. En plus, il ne favorise pas la transposition ou le transfert des connaissances dans d'autres contextes (Wenger, 1986). Cette méthode exige à l'enseignant de bien déterminer le profil de l'apprenant et de son comportement pour pouvoir orchestrer la progression des tâches. Les interventions de l'enseignant doivent être en mode transmissif pour « programmer »

⁹ Enseignement assisté par ordinateur.

l'apprenant avec de nouvelles connaissances. Les faiblesses majeures de ce modèle sont le manque d'interaction avec le système et entre le tuteur et l'apprenant, l'incapacité de définir les états mentaux qui assurent les associations et la considération du système mental comme une boîte noire.

3.1.2 Le constructivisme

Le courant constructiviste s'oppose au béhaviorisme. Il considère que le béhaviorisme a une vision trop limitée : l'apprentissage n'est pas une simple association entre stimulus-réponse. En plus de son intelligence innée, l'apprenant doit contribuer à son apprentissage par ses propres construits de façon active. Il a besoin de beaucoup plus que d'appliquer des connaissances déjà prêtes. L'un des défenseurs de cette théorie est le psychologue Piaget (Piaget, 1976) qui a pu fournir une explication des structures mentales à l'origine de l'intelligence humaine. Il considère que l'apprenant construit sa connaissance durant ses interactions et ses expérimentations avec l'environnement et construit ses propres connaissances de manière progressive, action par action. Piaget se basait sur des conceptions rationalistes de Kant (Kant, 1976) et défendait la thèse de la construction du savoir à partir du sens et de la raison. La thèse centrale est que tout apprentissage fait appel aux concepts d'assimilation et d'accommodation. L'assimilation permet d'intégrer de nouveaux objets et concepts extérieurs à l'ensemble des situations existantes permettant de les appliquer. Cette intégration peut nécessiter certaines adaptations ou modifications de structures, il s'agit de l'accommodation. L'assimilation peut provoquer des perturbations et des ruptures des états d'équilibre si la nouvelle expérience vécue est inédite et ne trouve pas une expérience semblable déjà rencontrée. L'apprenant doit s'adapter à la nouvelle situation, intégrer les nouveaux éléments et enrichir ses connaissances, ceci devrait aboutir à une modification des structures cognitives et retrouver un certain état d'équilibration après accommodation (Piaget, 1975).

Les travaux de Piaget, qui a mené plusieurs recherches en psychologie de l'enfant, ont eu une grande influence sur les théories cognitives. Il a essayé d'expliquer comment se construisaient les connaissances en partant d'une approche épistémologique¹⁰. Il s'est intéressé aux aspects internes des associations cognitives et les diverses formes internes d'activité cérébrales.

Les connaissances de l'apprenant s'enrichissent à chaque étape de l'apprentissage en fonction des capacités génétiques et biologiques d'interagir avec le monde (Mendelsohn, 1995). Cette théorie stipule que l'ordinateur est un moyen permettant aux apprenants d'améliorer l'apprentissage en effectuant des constructions, des explorations et des découvertes de connaissances où on laisse l'apprenant interagir avec son environnement pour construire ses connaissances et pour favoriser son savoir-faire et s'entraîner à utiliser les connaissances (Bruner, 1960; Piaget, 1976; Vygotsky, Cole, John-Steiner, Scribner, & Souberman, 1978). Cette méthode encourage l'exploration et la découverte et le développement des intuitions tout en favorisant l'essai. Les erreurs commises ne sont pas sanctionnées par des rétroactions négatives, mais au contraire, des moyens sont mis en place pour retrouver les erreurs et les corriger.

Bien que la théorie piagétienne ait pu décrire les structures des connaissances et leurs évolutions avec l'expérience et éclaircir la boîte noire des behavioristes, elle demeure incapable d'expliquer des fonctions mentales comme le développement du langage chez les humains et la définition des mécanismes de l'acquisition des connaissances. Le courant cognitiviste apporte des explications et des éclaircissements pour compléter les faiblesses de la théorie constructiviste.

Nous présentons ci-après une introduction à la base de la pédagogie cognitive qui n'est autre que le conflit cognitif.

¹⁰ Épistémologie génétique : définition de Larousse « théorie de la connaissance scientifique, développée par J. Piaget, fondée sur l'analyse du développement de la connaissance chez l'enfant, et sur celle de la constitution du système de notions utilisées par chaque science particulière au cours de son histoire. »

3.1.3 Le conflit cognitif ou conceptuel

Comme nous l'avons mentionné ci-haut, l'accommodation peut causer un déséquilibre et vient s'opposer à des connaissances et des savoirs établis. L'apprenant garde sa représentation initiale du monde inchangée tant que conception ne cause pas de problèmes. En effet, l'apprenant n'a pas de raison de modifier son savoir, déjà enraciné, sans des raisons assez convaincantes.

Lors d'une activité d'apprentissage, l'apprenant à qui l'on présente de nouvelles connaissances, dispose déjà de plusieurs notions acquises et d'une certaine vision de son environnement. Les concepts déjà acquis peuvent lui servir pour comprendre ou prédire de nouvelles connaissances. Certainement, leur véracité est à prouver soit en effectuant des expérimentations ou bien par l'assistance d'un expert du domaine. Pour certains cours, on demande souvent aux apprenants de poser des hypothèses ou de faire des prédictions sur de nouveaux concepts. Dépendamment de ces nouveaux concepts et de leurs liens avec les connaissances antérieures, ils se construisent une représentation pour garder en quelque sorte la cohérence de leurs connaissances. Ces prédictions sont un prolongement de leurs acquis et de leurs efforts de réflexion et de projections, il s'agit de constructions mentales. Après ces constructions, l'énoncé de la nouvelle connaissance par le tuteur ou sa découverte par des observations, des vérifications ou des expériences produit chez l'apprenant une sorte de conflit ou de perturbation. Ce déséquilibre, connu sous le nom de conflit cognitif, oblige l'apprenant à réviser la construction de ses connaissances pour garder et assurer leurs cohérences. Durant cette phase, il révisé ses construits, aligne ses représentations à celle de l'expert et ajuste les liens et associations avec les différents processus qui sont touchés par la nouvelle connaissance. Cet ajustement ou réglage devra aboutir à une nouvelle situation stable intégrant les nouvelles acquisitions (Doise, Mugny, & Perret Clermont, 1975).

Le conflit cognitif est d'une grande utilité pour la pédagogie constructiviste. Les apprenants se placent dans une démarche de réflexion, de questionnement, de

comparaison et de validation des connaissances. Une démarche classique pour créer un conflit cognitif consiste à demander aux apprenants d'exprimer un phénomène donné à partir de leurs propres connaissances sans aucune aide externe. Dans la majorité des cas, ils vont faire une représentation inadéquate tout en demeurant certains et convaincus que c'est la meilleure façon ou modèle qu'on peut imaginer. Cette conviction sera mise en cause dès que le modèle d'un apprenant est comparé à celui des autres qui lui sont différents, ou lorsqu'il est confronté à une situation où il ne permet pas d'expliquer. En ce moment, il est fort probable qu'un doute commence à s'installer et l'apprenant va remettre en cause le modèle présenté. L'argumentation du tuteur pour expliquer et justifier le modèle adéquat renforce l'acceptation de son erreur de conception qu'il faudra remplacer par la connaissance de l'expert. L'état de conflit cognitif devra être dégagé une fois les connaissances en question deviennent assimilées.

L'apprentissage constructiviste engage l'apprenant à établir ses propres représentations mentales des processus qui l'entourent et à utiliser ses propres réflexions, sa perception et ses interprétations pour comprendre les différents mécanismes et processus qu'il peut rencontrer. Cet apprentissage permet de laisser à l'apprenant l'occasion de construire ses propres concepts à partir de ses propres expériences. Le fait de le laisser dans une nouvelle situation ou plutôt dans une situation complexe permet de l'habituer à confronter les vrais problèmes et obstacles de la vie. La vie nous réserve plein de surprises et nous sommes incapables de prédire ce qui peut se passer. Il faut savoir comment résoudre des situations inhabituelles qui font intervenir plusieurs spécialités par opposition à un cours, qui traite généralement d'un thème plus restreint. Construire sa propre solution s'est se donner un pouvoir et une compétence à résoudre de nouveaux problèmes. Tous les moyens humains se mettent à disposition comme l'observation, l'essai et erreur, la mémorisation et la recherche (Bruner, 1997).

L'apprentissage peut être plus efficace s'il prend lieu en groupe, les interactions entre apprenants peuvent enrichir l'acquisition du savoir, il s'agit du socioconstructivisme que nous présentons dans le paragraphe suivant.

3.1.4 Socioconstructivisme

Le socioconstructivisme est ancré au constructivisme en intégrant les interactions sociales. Les interactions sociales permettent à l'apprenant d'interagir et de comparer ses connaissances avec ses semblables et celles des tuteurs, le travail en équipe sur la résolution d'un problème commun permet et favorise les échanges cognitifs pour mutualiser les connaissances. Le caractère relationnel entre apprenants permet un échange massif d'informations, de connaissances et d'émotions. Cette théorie développée par Vygotsky (Vygotsky et al., 1978) stipule que la construction du savoir chez l'apprenant est favorisée par le contact avec d'autres pairs. Les connaissances se développent et s'enrichissent grâce à des interactions sociales et des collaborations. Vygotsky a mis l'accent sur l'importance des relations interpersonnelles et de la situation de l'individu dans son environnement pour le développement des connaissances. La discussion avec les autres donne à l'apprenant l'occasion de développer ses connaissances, de les amener un peu plus loin selon ce qu'il appelle la zone proximale de développement. On peut faire un parallèle entre ces connaissances qui émergent de la confrontation avec les autres et le conflit cognitif, qui force une restructuration des connaissances, une accommodation pour intégrer diverses théories et points de vue sur la réalité.

L'interaction avec autrui peut générer des désaccords au sein du même groupe et créer un certain déséquilibre cognitif remédié souvent par les interventions du tuteur.

3.1.5 Le cognitivisme

La théorie cognitiviste cherche à expliquer de manière assez fine notre perception du monde, le traitement des informations acquises lors de nos interactions et leur transformation en connaissances ainsi que l'organisation de nos pensées, de nos

actions et des connaissances acquises pour interagir avec l'environnement. Le traitement de l'information passe par la mémoire qui est composée de trois registres identifiés à ce jour : le registre de l'information sensorielle, le registre de la mémoire de travail et le registre de la mémoire à long terme (Lindsay, Norman, & Jobin, 1980). L'information sensorielle passe par des transformations et des codages d'un registre à l'autre, initialement on parle d'information, ensuite d'une représentation et d'une connaissance lors de son stockage dans la mémoire à long terme. Le cognitivisme a été amorcé par Bruner (Bruner, 1960) qui supposait que la théorie behavioriste ne peut répondre aux exigences de l'apprentissage humain. L'apprentissage est en étroite liaison avec la mémoire et nécessite un traitement complexe de l'information. Le cognitivisme étudie les états mentaux qui sont supportés par le courant symbolique et le courant connexionniste. Le courant symbolique considère que le cerveau est un centre de traitement de l'information et explique bien l'apprentissage au niveau macro. Le courant connexionniste se base sur le fonctionnement du cerveau comme un réseau d'unités de traitement (neurones), ce qui explique bien le processus d'apprentissage au niveau micro.

Le système cognitif de l'être humain perçoit l'information qu'il peut transformer et organiser en connaissance qui peut éventuellement interagir avec des connaissances antérieures. L'apprenant effectue des mécanismes assez complexes pour coordonner le cheminement de l'information vers la connaissance. Il existe une collaboration entre plusieurs activités cognitives pour la construction des connaissances. Ainsi, « apprendre suppose de pouvoir mettre en œuvre des activités, entre autres, de compréhension, de construction de structures conceptuelles en MLT¹¹ par le biais de processus sélectifs et stratégiques de mémorisation; de procéder à des traitements inférentiels sur la base des connaissances préalables, d'élaborer et de vérifier des hypothèses, de généraliser des connaissances ou encore de reconnaître la classe d'un problème.» cité par (Alamargot, 2001) de (Richard, 1990).

¹¹ MLT : mémoire à long terme

Les cognitivistes mettent l'accent sur l'étude des mécanismes internes responsables de l'apprentissage et de la connaissance pour reproduire certains processus mentaux. Ils comparent souvent le cerveau humain à un ordinateur assez complexe et utilisent l'intelligence artificielle pour expliquer et reproduire de l'intelligence naturelle. Une connaissance isolée n'a pas de signification plausible, c'est en l'associant à des connaissances antérieures qu'elle trouve un sens.

Chaque apprenant est un cas unique en terme de style d'apprentissage et nécessite d'être traité de façon très personnelle. Il est évident que dans un environnement d'apprentissage il est difficile d'offrir un soutien spécifique et adapté au besoin de chacun. Le soutien aux apprenants peut se faire de différentes manières.

3.2 L'aide à l'apprentissage

3.2.1 Soutien aux apprenants et à la tâche

Lors d'une activité d'apprentissage, l'apprenant interagit avec l'environnement à sa manière. Chacun a ses propres connaissances, préférences et intentions. Il a souvent besoin d'être guidé et aidé pour accomplir une tâche. L'aide fournie doit tenir compte de la complexité de la tâche et du style cognitif de l'apprenant. L'aide n'est pas perçue de la même manière par différents apprenants. Elle peut être ennuyeuse et perturbante pour certains et bénéfique et profitable pour d'autres. L'apprenant devra se sentir directement concerné par l'aide, donc elle doit être ciblée et spécifique.

Bien qu'on puisse tracer son profil, certains comportements restent imprévisibles même dans des situations semblables. L'humain peut réagir au même stimulus de différentes manières et manifeste certains comportements qui peuvent être loin des prévisions. Il n'existe pas de dispositif capable de décrire ce qui se passe dans tête de l'apprenant, mais il est possible d'avoir des indices à partir de son comportement, sur ses émotions et ses intentions. Comprendre le comportement de l'apprenant et ses caractéristiques personnelles c'est être capable de lui fournir l'aide adéquate (Aroyo, Dicheva, & Velez, 2001).

L'aide ne se limite pas au texte de l'aide, mais s'étend à la manière de la présenter et donc à l'interface ou au modèle de communication avec l'apprenant. Le contenu de l'aide doit être présenté en quantité adéquate pour ne pas bombarder l'apprenant de masses d'informations. Dufresne (Dufresne, 2003) soutient l'idée de découper l'information en petites quantités pour en faciliter la lecture et la mémorisation. D'autres auteurs parlent de spirale ou d'échafaudage (*Scaffolding*) pour étaler l'explication (Bruner, 1960).

3.2.2 Les systèmes d'aide

L'aide est nécessaire pour expliquer comment interagir avec un système ou bien pour se dégager d'une situation bloquante. Il existe différentes façons d'aider un apprenant, certains systèmes sont fournis avec un manuel d'utilisation qui décrit les fonctions du système, les entrées et les sorties. Ces manuels sont rarement consultés ou ne le sont que lorsqu'on a épuisé toutes les possibilités d'essayer de trouver la solution par différentes interactions avec le système. Les manuels descriptifs des logiciels sont souvent mal rédigés vu l'ampleur de cette tâche qui n'est pas souvent confiée aux spécialistes. Les versions et correctifs du système changent fréquemment, mais le manuel est souvent décalé par rapport à la version actuelle. De plus, on croit souvent qu'en faisant une exploration et en essayant toutes les fonctions du système interactivement, on finira par trouver la solution plus rapidement qu'en passant par les manuels. Certains systèmes offrent une aide en ligne qui est généralement une version électronique des manuels. Bien que la présence de l'aide soit intégrée au système, il faut souvent parcourir des pages pour retrouver ce qu'on cherche. Les recherches sont limitées par les mots et ne peuvent tenir compte du sens plus abstrait qui est recherché. Il en découle une charge supplémentaire de recherche et de filtrage sans parler des moments où l'on ne sait pas vraiment ce qu'on cherche ou quand on a des difficultés à comprendre les problèmes. Certains systèmes identifient l'endroit où l'aide a été demandée (souvent l'appui sur F1) pour orienter l'apprenant vers la page contenant une explication ou une liste de choix de rubriques possibles qui peuvent

répondre à la requête formulée. On se trouve également dans des pages avec différents liens hypertextes et une quantité abondante d'information. L'apprenant doit alors fournir des efforts pour chercher et comprendre les textes explicatifs. Les cas cités suggèrent que l'aide est souvent insuffisante et mal adaptée.

Pour mieux assister les apprenants dans leurs tâches, les nouveaux environnements d'apprentissages intègrent des agents qui fournissent de l'aide. Ces agents peuvent être des humains ou bien des systèmes conseillers qui proposent de l'aide active intelligente (Winkels, 1992). Le rôle d'un système conseiller a été décrit par Paquette et Tchounikine (Paquette & Tchounikine, 1999) « Typiquement, un conseil est un texte qui suggère à l'apprenant de réaliser une action, lui indique que son action est incohérente ou maladroite ou qui critique l'objet qu'il a produit. Un conseil est une information : le système conseiller ne force en rien l'apprenant à suivre les conseils qu'il prodigue. Les conseils sont fondés sur une analyse des actions et des productions de l'apprenant. Le terme «*aide intelligente*» fait référence à l'objectif recherché, c'est-à-dire proposer un conseil qui prend en compte le contexte de l'action et les objectifs poursuivis par l'apprenant. ». Il en résulte que les actions et interactions de l'apprenant sont enregistrées et analysées dans le but de comprendre sa situation et les intentions qu'il projette d'exécuter; des conseils adéquats sont fournis en conséquence. L'aide n'est pas uniquement du texte affiché, elle peut être fournie sous forme audible et animée. Le système Exploragraph (Dufresne & Paquette, 2000) analyse les traces d'utilisation de l'apprenant et peut déclencher une aide sous différentes formes multimédias (agents animés, textes, voix). Il tient compte des préférences de l'apprenant notamment pour le choix de l'avatar (professeur, coach, hacker, religieuse ou autre). Ces agents enrichissent le dialogue avec l'apprenant en imitant certains comportements humains, comme le découragement, le reproche, la fierté, l'impatience.

Nkambou *et al.* (Nkambou, Laporte, Yatchou, & Gouradarès, 2003) ont développé un agent qui produit une réponse affective via son agent animé Émilie qui

est un tuteur émotionnel. Émilie reçoit des messages d'un agent observateur qui suit les actions de l'apprenant, tient compte de la difficulté de la tâche et des actions à accomplir. En fonction de la situation, Émilie produit des expressions faciales qui représentent les émotions d'un tuteur humain.

3.2.3 Les interfaces adaptatives

Dans le domaine de l'éducation, on utilisait souvent des systèmes hypermédias qui permettent un certain type d'interaction avec l'apprenant qui peut naviguer d'un endroit à l'autre selon ses propres désirs. Les hypermédias ont gagné une grande popularité grâce à leur façon de structurer les connaissances sous des liens entre entités. Bien que ces systèmes présentent une structure arborescente et une bonne organisation, le contrôle est laissé à l'apprenant (Dufresne, 1992). Les déplacements d'une zone à l'autre peuvent s'accompagner d'une désorientation de l'apprenant et causer une perte de ses repères. En effet, l'enchaînement des liens peut l'éloigner de l'objectif principal et inciter à parcourir d'autres liens, qui parfois ne provoquent qu'une distraction et une dispersion des connaissances. Dans ce cas, l'apprenant est amené à reconstituer les différents parcours effectués pour avoir une « connaissance entière », ceci provoque une charge cognitive importante. Il est à signaler que l'élaboration de ses environnements est une tâche laborieuse. Les hypermédias adaptatifs tiennent compte du modèle usager pour lui offrir un parcours adapté à ses besoins (Brusilovsky, 1996).

Les systèmes adaptatifs peuvent s'adapter aux besoins de chaque apprenant. Brusilovsky et Peylo (Brusilovsky & Peylo, 2003) considèrent que les interfaces adaptatives peuvent convenir à quiconque. La recherche dans le domaine des hypermédias adaptatifs s'intéresse au développement de techniques pour promouvoir l'adaptabilité des hypermédias aux préférences des apprenants et surtout à leur progression, en montrant par exemple des contenus plus pertinents ou en cachant des contenus trop difficiles. Ils peuvent fournir une panoplie de choix quant aux informations présentées, les possibilités de navigations et la manière de les présenter.

Ceci donne plusieurs facettes au même système qui se comporte de différentes manières selon le modèle de l'apprenant (Brusilovsky, 1996) et offre la possibilité à des apprenants ayant des connaissances et objectifs différents de profiter convenablement des informations dans l'hypermédia. Les hypermédias adaptatifs ont été conçus en particulier pour les environnements d'enseignement (Dufresne, 2003).

3.3 L'apprentissage en ligne

Les apprenants bénéficient de plus de flexibilité pour faire des apprentissages. Avec les nouveaux outils électroniques d'apprentissage, on parle de l'enseignement électronique, de l'enseignement à distance ou de l'enseignement en ligne. Il s'agit de l'enseignement assisté par ordinateur ou *e-learning*¹². Ce terme signifie : «mode d'apprentissage basé sur l'utilisation des nouvelles technologies, qui permet l'accès à des formations en ligne, interactives et parfois personnalisées, diffusées par l'intermédiaire d'Internet, d'un intranet ou autre média électronique, afin de développer les compétences, tout en rendant le processus d'apprentissage indépendant de l'heure et de l'endroit.»¹³

L'apprentissage en ligne permet d'accéder de n'importe quel endroit et offre l'occasion d'apprendre au moment décidé par l'apprenant selon son rythme et sa méthode de travail en bénéficiant de plusieurs formes de collaboration et de ressources en lignes. Il n'est plus utile de se déplacer, donc, réduit les coûts associés, et fait épargner un temps précieux. Un réconfort est offert à l'apprenant qui lui permet de s'exercer, de se pratiquer et d'évaluer ses performances dans un encadrement moins intimidant. Une rigueur et un autocontrôle sont demandés de la part de l'apprenant pour bénéficier de ses avantages.

¹² Les termes suivants sont également utilisés : cyberapprentissage, apprentissage virtuel ou apprentissage électronique.

¹³ Définition de l'office québécois de la langue française : <http://granddictionnaire.com>

Avec ce système, les apprenants ont tendance à apprendre seuls, ceci peut invoquer certaines difficultés. Adams et Slater (Adams & Slater, 2002) affirment qu'un apprentissage en groupe permet d'enrichir la qualité et de mener des discussions entre apprenants. L'accès aux discussions en ligne et aux forums comble en quelque sorte le besoin d'un apprentissage en groupe. L'homme est un être sociable, il a besoin d'interagir avec ses semblables. Rien ne peut remplacer la présence humaine, plusieurs informations sont communiquées entre deux personnes présentes. Il serait intéressant d'intégrer les deux possibilités : proposer des séances d'apprentissage en groupe et les compléter par un apprentissage en ligne. Le tuteur doit assurer le suivi de l'apprenant pour qu'il assimile les connaissances présentées. Il doit se rendre compte et percevoir la situation de l'apprenant pour évaluer son besoin de soutien. En plus d'assister l'apprenant dans son apprentissage, le tuteur doit l'assister pour qu'il développe sa capacité à apprendre de façon autonome, donc apprendre à apprendre.

3.4 L'importance de la motivation pour l'apprentissage

En psychologie, la motivation est vue comme un centre de la régulation biologique, cognitive et sociale des individus. La motivation est le processus qui règle l'engagement dans une expérience donnée. Elle est l'agente responsable du déclenchement et de la continuité des actions. Elle fournit une certaine énergie pour accomplir l'exécution de tâches. Selon Ryan et Deci (Ryan & Deci, 2000), elle est une source d'énergie qui pousse à entreprendre une action. Son absence provoque habituellement l'abandon ou le changement d'orientation. La motivation se déclenche par le désir d'atteindre un but, relever un défi, réaliser l'estime de soi, réaliser des buts et surtout les faire bien. Être motivé, nous incite à aller de l'avant, à faire plus et à faire mieux.

Le besoin d'autonomie, le besoin de compétence et le besoin d'appartenance sociale sont les trois besoins psychologiques à la base de la motivation. On parle

généralement de deux types de motivation, la motivation intrinsèque : on fait des actions pour sentir une satisfaction, et la motivation extrinsèque : si l'action est faite dans un but d'avoir quelque chose en échange de son environnement. En cas d'absence de motivation, on parle d'amotivation : l'individu est incapable de percevoir un lien entre son action et le résultat obtenu, ses actions sont similaires à celles d'un automate (Laguardia & Ryan, 2000).

Nos actions et nos objectifs sont souvent orientés par un choix qui seul ne peut conduire à la réalisation. La motivation est à l'origine de la passion, de l'enthousiasme, de la ténacité et de la persévérance. « Rien n'est plus insondable que le système de motivations derrière nos actions » (Lichtenberg, 1997).

La motivation implique un sens de concurrence, vaincre les compétiteurs ou se distinguer parmi une certaine population ou dans un certain environnement. Selon Kant (Robberechts, 1974), il existe deux origines de la motivation : le devoir et la satisfaction du désir. Bien que les humains n'accomplissent pas tous leurs devoirs, le fait d'être conscients les pousse à agir pour sentir un certain soulagement de faire ce qu'il fallait faire. En plus des devoirs, les actions sont motivées par une satisfaction morale comme un compliment, une distinction ou tout simplement par orgueil. Plus tard au XXe siècle, Taylor croyait que le salaire est à l'origine de la motivation, sans tenir compte des motivations internes des salariés ni des facteurs humains du travail.

Il existe plusieurs facteurs influant la dynamique motivationnelle des apprenants : la nature de la matière proposée, l'évaluation rattachée, les récompenses et les sanctions employées et le comportement du tuteur. Dans les activités d'apprentissage, l'apprenant est l'acteur principal. Il ne se limite pas à recevoir la matière, mais essaye de la comprendre pour s'en servir lors de la phase d'évaluation. L'exemple d'une conférence ou d'un séminaire se rapproche le plus d'une présentation de l'information, donc le but principal est d'informer. Dans ce cas, l'apprenant s'instruit en découvrant des nouveautés. Par contre, lors d'un cours de mathématique, l'apprenant met plus d'attention pour comprendre comment appliquer ces

informations pour s'en servir à résoudre des problèmes. La motivation doit être plus importante dans ce cas. Pour un tuteur humain ou logiciel, il faut bien prendre en compte la motivation. Le manque de motivation est souvent à l'origine de difficultés d'apprentissage, et par la suite la cause d'échec lors des évaluations. L'être humain apprend tout le temps, depuis le jeune âge l'élève observe les adultes et essaye d'imiter des comportements. Les enseignants sont souvent le seul modèle observé par les élèves. Les parents, à leur tour, jouent le rôle de tuteur, sont de moins en moins présents vu les exigences de la société actuelle. Les recherches en psychopédagogie confirment que la motivation est nécessaire à l'apprentissage. Wang, Haertel et Walberg (Wang, Haertel, & Walberg, 1993) affirment que pour apprendre, il faut le vouloir, donc être motivé. La motivation peut être intrinsèque, mais pour certains il faudra qu'elle soit initiée pour ensuite la développer. Elle est fragile et doit être maintenue par des motivations extrinsèques comme des encouragements et des récompenses du tuteur.

3.5 L'apprentissage avec les simulateurs

L'objectif de cette partie est de présenter les effets de l'utilisation des simulateurs dans le cadre d'un apprentissage. Nous ferons une synthèse des travaux ayant étudié l'influence des simulateurs dans la construction des modèles mentaux chez les apprenants.

3.5.1 Qu'est-ce qu'un simulateur

Selon la définition du dictionnaire de l'Académie française, le verbe simuler signifie : « feindre, imiter, faire paraître réelle une chose qui n'est pas ». En effet, le simulateur imite le comportement dans la vraie vie d'un phénomène et le présente aussi proche que possible de la réalité. La simulation a été utilisée depuis longtemps en milieu de recherche et en industrie pour réduire les coûts de production et pour créer des prototypes. La simulation est souvent utilisée dans un but d'apprentissage

dans de nombreux domaines. Certains domaines ont connus plus de progrès que d'autres, on entend souvent parler de simulateurs de vol qui offrent aux pilotes un environnement de formation très performant et permettent d'économiser plusieurs ressources matérielles et surtout laisser la possibilité de faire des erreurs et de mesurer leur ampleur. La simulation a envahi d'autres domaines de formation comme la chirurgie, la mécanique, la modélisation, l'architecture, etc. Le domaine de l'éducation a bien bénéficié de cette technique, plusieurs cours en sciences en ont profité.

Selon Mutet (Mutet, 2003), « Le fait de simuler comprend de par sa nature un caractère ludique, très bien ressenti par les enfants qui spontanément ont recours à ces techniques ». Ce caractère de spontanéité est partagé par Johnson-Laird (Johnson-Laird, 1983) qui a cité : « si vous savez ce qui cause un phénomène, comment il se déroule, ce qui en résulte, comment on peut l'influencer, le contrôler, l'initialiser ou l'empêcher, alors d'une certaine manière vous le comprenez. Je fais l'hypothèse que le fondement psychologique de la compréhension est l'existence dans la pensée d'un "modèle opérationnel". » Selon lui, les aptitudes de simulation sont innées et fonctionnent de manière subconsciente.

Une autre définition selon le Petit Larousse : « Méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène, un système à étudier par un modèle plus simple, mais ayant un comportement analogue. »

Un simulateur est un outil pédagogique qui permet de présenter et de simplifier l'illustration d'un monde réel pour bien répondre aux objectifs pédagogiques. Il permet de répondre aux actions de l'apprenant et de se comporter selon ses activités. L'apprenant manipule des commandes sous forme de boutons, des variateurs ou des variables qui seront traduites en temps réel par le simulateur sous forme d'illustration graphique, sonore ou même la commande d'un instrument.

Le simulateur offre un micro monde qui permet d'effectuer des expérimentations et des tests en imitant un environnement de travail réel. Les simulateurs peuvent être des

instruments mécaniques ou électroniques, ces outils s'usent assez rapidement et coûtent cher à entretenir. Avec le développement de la micro-informatique, les simulateurs sont devenus des logiciels proposant des interfaces assez simples et qui peuvent être à la disposition d'un large public. Les simulateurs sont des outils didactiques puissants dont l'enseignement de la physique a bien tiré profit. La simulation permet la visualisation de phénomènes scientifiques et la construction des modèles scientifiques (Richoux, Salvetat, & Beaufils, 2002). Les simulations sont également importantes dans le cas d'expériences de laboratoire qui sont impraticables, coûtent cher ou sont trop dangereuses (Strauss & Kinzie, 1994). Les simulations peuvent contribuer au changement conceptuel (Windschitl & Andre, 1998), fournir des expériences ouvertes aux étudiants (Sadler, Whitney, Shore, & Deutsch, 1999), fournir des outils pour l'enquête scientifique (Windschitl, 2000) et pour des expériences de résolution des problèmes (Howse, 1998).

Les simulateurs sont des environnements assez paramétrables et permettent aux formateurs de concevoir des situations d'apprentissage. Il s'agit d'une nouvelle technologie éducative qui devient de plus en plus utilisée et appréciée autant par les formateurs que par les apprenants. Cette technologie ne compromet pas l'enseignement traditionnel qui place l'apprenant dans deux situations : une situation « expositive » durant laquelle il fait face à de nouvelles connaissances et une situation « active » lors de laquelle l'apprenant doit mettre en pratique ses connaissances et les appliquer à de nouvelles situations (Guéraud, 1998). La simulation offre une manière différente pour l'acquisition de connaissances et leurs applications. Elle présente les connaissances sous forme interactive, visuelle et animée.

3.5.2 Les promesses des simulateurs

Grâce aux avancées remarquables dans le domaine du multimédia, les animations sont de plus en plus utilisées. On remarque actuellement plusieurs sites web qui sont présentés sous forme animée ce qui améliore l'esthétique et les rend plus attractifs.

Les animations sont également utilisées pour des buts pédagogiques (Betrancourt, Bauer-Morrison, & Tversky, 2001). Les apprenants manifestent plus d'intérêt, de motivation et d'attention face à des outils pédagogiques animés (Betrancourt et al., 2001). Traditionnellement, les apprenants devraient effectuer un effort mental supplémentaire pour illustrer les parties théoriques d'un apprentissage, ils n'avaient pas assez d'occasions pour pratiquer et d'avoir des représentations physiques des nouvelles connaissances. Les simulateurs ont bien profité du domaine du multimédia et permettent ainsi de présenter des expériences d'une manière dynamique et réaliste ce qui favorise la construction de modèle mental dynamique (Lowe, 1999) (Sims & Hegarty, 1997). Ils offrent une représentation du contenu assez simplifiée ce qui mène à supporter les traitements cognitifs internes de l'apprenant. Les phénomènes physiques sont souvent très complexes et font intervenir plusieurs paramètres généralement difficilement dissociables. Démarrer son ordinateur est une action simple, il suffit généralement d'appuyer sur le bouton marche/arrêt et attendre un peu pour qu'une interface habituelle apparaisse et permet d'assurer le dialogue entre humain et ordinateur. Dans ce laps de temps d'attente assez court, plusieurs actions se passent et sont assez nombreuses à détailler. Il n'est pas facile de comprendre comment le système d'exploitation fonctionne et d'avoir une représentation mentale complète de toutes les étapes. Un simulateur peut nous aider à bien schématiser ce mécanisme et permet de s'arrêter à chaque étape désirée. Il nous permet également de mieux illustrer le rôle de chaque paramètre ou composante et de comprendre ce qui se passe en son absence. Cette « simplification » du monde réel peut induire l'apprenant en erreur, en effet, la simulation peut donner un faux sentiment de compréhension de la situation. C'est le phénomène d'illusion de compréhension (Schnotz & Lowe, 2003).

3.5.3 Les simulateurs et la compréhension

Les simulateurs, grâce aux animations, offrent une source d'information plus élaborée que les images statiques (Schnotz & Lowe, 2003). Il s'agit de l'une des

principales raisons de choix de l'utilisation de la simulation dans cette recherche. En effet, l'apprenant dispose de documents pédagogiques plus riches en information et épargne l'effort de simulation mentale qu'il est sensé déployer si les documents décrivant une situation dynamique sont présentés de manière statique.

Le simulateur Phet offre une interface simplifiée (figure 3.1) qui comporte :

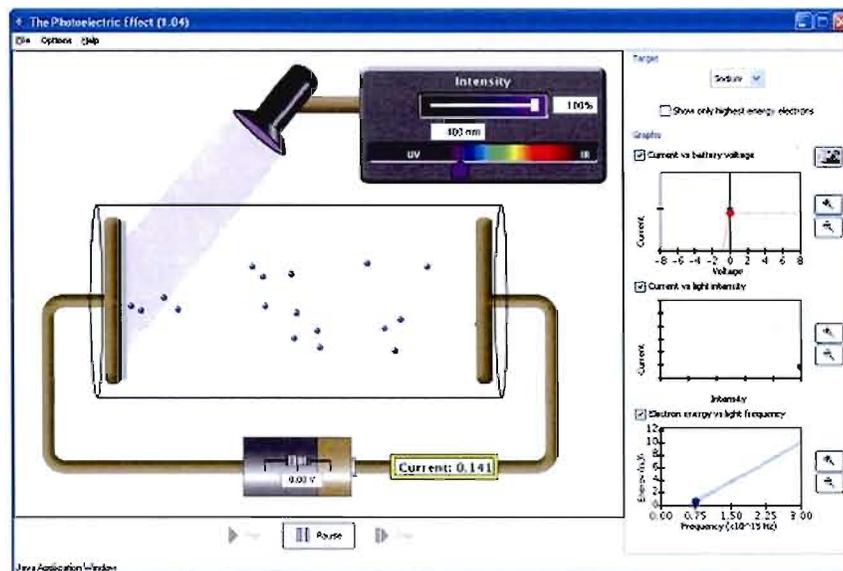


Figure 3.1 Présentation du simulateur PhET

- Trois variateurs : un variateur de l'intensité lumineuse, un variateur de la longueur d'onde et un variateur du voltage.
- Un sélecteur de métal : il est possible de changer la nature du métal de la plaque éclairée.
- Trois graphiques : courant en fonction du voltage, courant en fonction de l'intensité lumineuse et l'énergie des électrons en fonction de l'intensité lumineuse.

Malgré cette simplicité, son utilisation génère une quantité d'information importante et peut causer une ambiguïté d'interprétation chez l'apprenant. Par exemple, la modification du variateur de la longueur d'onde influence le changement

des trois graphiques en même temps. Les informations supplémentaires fournies ne sont pas toutes nécessaires pour la compréhension d'une situation donnée. Pour contrer cette situation, le simulateur présente les graphiques uniquement à la demande (cocher une case) et nous avons formulé les questions de sorte qu'un seul graphique est utilisé à chaque situation.

Plusieurs études ont montré que la coexistence de texte et d'animation permet une meilleure compréhension et performance pour résoudre une situation problème. Rieber (Rieber, 1990) a comparé un cours portant sur les lois de Newton avec et sans animation, il a conclu que l'animation a augmenté les performances des apprenants lors des tests. Wan der Meij et de Jong (Wan der Meij & de Jong, 2006) ont expérimenté l'apprentissage d'un cours de physique avec et sans animations et ils concluent que les représentations dynamiques ont amélioré la compréhension surtout pour des questions complexes.

3.5.4 Les difficultés de l'utilisation des animations

L'apprenant qui fait face à des connaissances présentées sous forme dynamique se confronte à une quantité impressionnante d'informations. Dans notre environnement expérimental, nous avons assuré une introduction graduelle de l'utilisation du simulateur. La partie théorique du cours en présente le simulateur avec ses différentes composantes, ensuite des manipulations simples et faisant intervenir une seule variable sont demandées pour que l'apprenant puisse mieux utiliser le simulateur. Le simulateur Phet réagit instantanément aux commandes de l'apprenant, ce qui peut être perçu trop rapide par l'apprenant. Les résultats présentés peuvent être difficiles à traiter. D'une part, l'apprenant n'est pas familier avec l'utilisation des simulateurs dans le cadre de l'enseignement des cours de physique, et d'autre part, le simulateur Phet présente une matière assez riche sur l'effet photoélectrique vu sous l'angle quantique. Certains apprenants ont des notions sur la physique classique et seront dans un état de conflit cognitif dès qu'ils se rendent compte que leurs connaissances antérieures ne sont plus valables dans l'environnement de simulation.

En effet, au niveau CÉGEP, ce cours est présenté sous l'angle de la physique classique et ce n'est que plus tard qu'un cours complémentaire démontre les limites du modèle classique et que certains phénomènes ne peuvent être expliqués que par les nouvelles notions de la physique quantique.

L'une des difficultés remarquables dans l'utilisation du simulateur Phet est qu'une grande zone est réservée au tube à vide permettant la circulation des électrons. Malgré l'avantage visuel qui illustre bien l'extraction des électrons, cette partie prend plus d'attention visuelle comparée aux autres composantes du simulateur. L'apprenant, surtout le novice, perd du temps à regarder plus cet élément animé que celui qui présente les résultats de l'expérience physique. Le simulateur permet de présenter les résultats de la variation d'une variable en fonction de l'autre (par exemple la variation de l'intensité du courant en fonction du voltage) sous forme de graphiques. Lors de son lancement, le simulateur n'affiche pas les graphiques. Il est nécessaire de cocher les cases correspondantes à chaque graphique pour pouvoir le visualiser. Il est nécessaire que les apprenants puissent repérer l'emplacement de ces cases à cocher. Cette difficulté liée au partage de l'attention visuelle entre plusieurs éléments conduit à une concentration sur des éléments non pertinents à la compréhension au détriment de ceux plus pertinents (Lowe, 1999). Lors de la première utilisation de l'environnement d'apprentissage, les apprenants commencent par une phase d'exploration pour identifier les différents éléments figurants dans l'écran. Au début, ils ne savent pas quoi regarder et ignorent des liens entre les composants qu'ils doivent regarder. Pour ne pas les conduire dans une interprétation erronée, ils sont conseillés par le professeur. Il intervient dès qu'un seuil de temps est dépassé sans qu'ils découvrent l'utilité d'une composante ou sans qu'ils puissent établir un lien causal entre différents éléments, par exemple, changer la longueur d'onde et regarder la variation du courant électrique.

L'utilisation de la simulation n'a pas que des avantages. La simulation crée un environnement virtuel qui ne reflète pas la réalité exacte. Elle peut simplifier et

banaliser les dangers et les difficultés si la même expérimentation est faite dans un environnement réel. L'apprenant peut avoir tendance à prendre à la légère les dégâts causés par des mauvaises manipulations et une perception erronée de la réalité. Une mauvaise utilisation du simulateur de vol n'a pas forcément de conséquences graves, mais la même mauvaise manipulation dans la vraie vie peut s'avérer assez coûteuse. Le passage entre l'environnement virtuel et réel doit se faire avec prudence, l'apprenant doit bien faire la différence entre les deux situations. Généralement, une autre formation devra suivre la simulation pour permettre d'acquérir de meilleures compétences et développer de bonnes aptitudes. La simulation devra être utilisée comme un outil pédagogique dans un but bien précis. Malgré toute sa puissance, elle ne peut transposer la réalité avec toute sa complexité. Les sciences physiques ne sont que des approximations faites pour schématiser certains phénomènes, il y a toujours du bruit ou des incertitudes qu'on néglige dans le but de simplifier (Guéraud, Pernin, Cagnat, & Cortes, 1999).

En éducation, l'apprenant commande le simulateur par le biais du clavier et de la souris, ces actions ne sont généralement pas les vraies actions à entreprendre dans la réalité. Il est donc prudent de rappeler ce qui se passe en réalité. La simulation offre plusieurs informations simultanément et peut afficher les valeurs de chaque variable en tout instant, de plus elle permet de faire des pauses, des arrêts ou même des retours en arrière. Elle permet aussi de proposer plusieurs alternatives, comme proposer plusieurs trajectoires d'un projectile mobile en fonction de la force initiale qui le propulse. Les trajectoires peuvent être aussi représentées par des courbes distinguées par différentes couleurs. Il n'y a aucun doute sur la pertinence des informations proposées, justes que dans la vie réelle nous ne pouvons pas reculer dans le temps, et l'on a souvent une seule chance quand on tire sur la gâchette. « Le principal danger résulte peut-être de la difficulté de faire comprendre aux élèves l'écart entre la réalité et le modèle » (Duvernet, Padiolleau, & Pignot, 2001).

3.5.5 Description du simulateur Phet

Le projet Phet (Physics Education Technology) a contribué à la réalisation de plusieurs simulations pour l'enseignement des sciences physiques. Les simulations ont été conçues développées par une large équipe incluant des enseignants et des informaticiens et des étudiants. Les simulations sont diffusées au grand public après la validation par les enseignants et les tests avec les étudiants. Le but est d'aider les apprenants à construire des modèles mentaux en leur offrant des représentations visuelles de processus qui ne sont pas facilement observables et de les inciter à se concentrer sur les concepts beaucoup plus que les résultats numériques.

La physique quantique est une matière difficile à enseigner, car elle est contre-intuitive, difficile à visualiser et abstrait (McKagan *et al.*, 2008). Cette matière a épuisé plusieurs savants avant de pouvoir la mettre en évidence. Elle demeure un concept unique en son genre qui cause une frustration pour plusieurs étudiants lors de la construction de modèles mentaux. Cette matière semble déconnectée de la vie quotidienne.

Le projet a été conçu pour aider les tuteurs à enseigner cette matière et offrir un outil pédagogique aux apprenants simple et interactif. Une attention particulière est mise sur l'interface entre apprenant et simulateur ce qui a bien démarqué la qualité des produits développés par la même équipe. Plusieurs tentatives entamées par d'autres enseignants ont échoué, car l'interface humain-machine était mal élaborée ce qui a causé des problèmes d'utilisabilité. Le simulateur de l'effet photoélectrique permet de visualiser des éléments non observables à l'œil nu comme les photons et les électrons, de matérialiser l'extraction des électrons depuis la photocathode et de voir l'influence de la couleur de la lumière sur l'extraction des électrons.

C'est un outil interactif qui réagit instantanément aux actions de l'apprenant ce qui lui permet d'établir des liens cause à effet entre ses commandes et les résultats.

Le développement du simulateur PhET suit le processus décrit par la figure 3.2 (McKagan *et al.*, 2008).

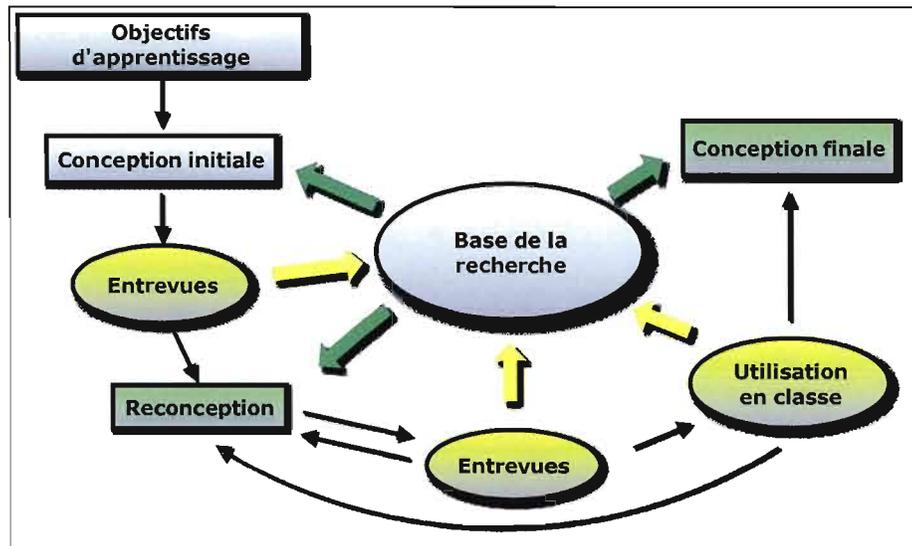


Figure 3.2 Processus de conception du simulateur PhET.

Partant d'un objectif d'apprentissage précis, les experts déploient les efforts nécessaires pour la définition du contenu et de l'interface. Ils proposent un modèle qui sera révisé et validé pour ensuite être présenté aux étudiants. Le développement nous rappelle le cycle de vie itératif et incrémental, une version de départ est mise en place et servira de base pour les discussions avec tous les intervenants du projet. Des mises à jour seront effectuées après avoir recueilli les avis des étudiants en ce qui concerne l'interface et l'utilisabilité. Certaines défaillances peuvent également être rapportées et corrigées dans l'itération suivante. Plusieurs itérations peuvent avoir lieu avant d'avoir une version stable qui sera diffusée à un plus large public et utilisée en classe. D'autres observations seront effectuées pour évaluer le comportement des étudiants vis-à-vis de l'utilisation du simulateur dans des cas de résolution de problèmes. L'implication des étudiants, les utilisateurs, est fort présente lors de ce processus.

Dans cette partie, nous avons présenté le rôle de la simulation dans un environnement d'apprentissage ainsi que les difficultés qui peuvent être rencontrées par les apprenants lors de son utilisation. L'environnement de simulation apporte des

informations dynamiques pour présenter un phénomène physique ce qui peut présenter un risque de perdre l'attention sur les éléments pertinents.

Selon une perspective constructiviste, nous allons utiliser un EIAH qui doit permettre aux apprenants de maîtriser le processus d'apprentissage, c'est-à-dire de planifier, de réfléchir et de corriger leur manière d'agir. Le choix des environnements de simulation est un bon exemple d'environnement pouvant supporter la construction des connaissances. Le soutien dans ce contexte doit pouvoir aider l'apprenant lorsqu'il fait face à une situation difficile, où il doit accommoder ses schémas de connaissance (conflit cognitif).

Dans la section suivante, nous faisons le point sur le système visuel humain ainsi qu'une brève présentation de la physiologie de l'œil humain. Nous mettons l'accent sur la possibilité d'utiliser les informations issues des mouvements de l'œil pour améliorer la modélisation de l'apprenant en situation d'interaction avec un système d'apprentissage, en particulier dans un environnement orienté vers l'action telle qu'un environnement intégrant des simulateurs (laboratoire virtuel) pour l'apprentissage dans le domaine des sciences.

3.6 Le système visuel humain

Notre système visuel a la capacité de sélectionner rapidement les informations les plus pertinentes de son environnement. Lors de l'observation de plusieurs objets, une attention particulière est attribuée à certains objets plus que d'autres. Cette sélection par l'attention, diminue les informations à traiter et par la suite contribue à accélérer le processus de vision. Le monde qui nous entoure est très complexe, chaque objet est composé d'autres objets et peut représenter d'autres liens ou informations reliés à d'autres objets. On ne perçoit pas uniquement l'objet qui existe dans notre champ de vision, mais beaucoup plus que ça. La vision est étroitement liée à la mémoire, en effet, nous faisons des liens entre ce qu'on observe et ce qu'on a déjà observé, donc on effectue des comparaisons dans notre mémoire entre ce qu'on observe. Ce qu'on voit

n'est en fait qu'une représentation mentale de la réalité. On essaye de faire des liens entre les objets et de leur associer des noms et des fonctions. La vision invoque, en plus de l'image observée, des souvenirs.

Bien que la vision soit complexe, sa modélisation demeure un défi en informatique et en intelligence artificielle. Depuis de nombreuses années, plusieurs chercheurs tentent de concevoir des systèmes visuels autonomes. Certes, plusieurs avancées ont été constatées, mais on est de plus en plus convaincu de la complexité : le système visuel ne peut se réduire à un problème calculatoire. Il y a une collaboration entre l'imagerie, l'intelligence artificielle et la gestion des connaissances. Le système visuel est constitué de cellules neurales complexes. Il a la propriété de détecter et discriminer. L'observation est faite globalement, mais l'accent est mis sur certains endroits ou objets plus que d'autres. Ce qu'on observe est généralement lié à un contexte. Un objet isolé n'a pas forcément une signification particulière sauf ce qu'il est; par exemple, l'image d'une bête sauvage peut provoquer la peur si elle est en pleine nature à proximité des humains. La même image peut provoquer de la joie si elle est dans une cage de cirque ou de zoo. D'un contexte donné à l'autre, il peut avoir une signification complètement différente. L'objet observé n'est pas ce qu'il est, mais ce qu'il représente pour chacun. La vision ne se limite pas à la représentation d'objets; elle est aussi une activité d'exploration, de collecte d'information et d'acquisition de connaissances.

3.6.1 Physiologie de l'œil

Le système visuel humain est un système assez complexe et qui demeure parmi les systèmes les moins connus du corps humain. Le système visuel est capable d'acquérir des images en deux dimensions grâce aux organes récepteurs : les yeux, et de les traduire en images animées en trois dimensions.

L'œil humain est considéré comme une caméra numérique de haute précision (Duchowski, 2007). La cornée, le cristallin, l'iris et la pupille véhiculent les faisceaux

lumineux jusqu'à la rétine. Les cellules photosensitives de la rétine transforment la lumière en un signal électrique qui sera conduit vers le cerveau grâce au nerf optique.

L'œil est un organe sensoriel qui est très perfectionné. Parmi ses nombreux constituants, nous mettons en évidence la cornée, la pupille et le cristallin :

1. La cornée forme la surface externe de l'œil, elle est une membrane transparente et convexe. C'est une surface qui réfracte la lumière entrante sans pour autant modifier sa trajectoire.
2. La pupille est une ouverture permettant le passage de la lumière jusqu'à la rétine. Le diamètre de cet orifice est variable, contrôlé par l'iris qui ajuste l'ouverture en fonction de l'éclairage. Il s'agit du réflexe pupillaire. Elle est souvent considérée comme un diaphragme qui réduit son diamètre si la lumière est trop importante ou si les objets regardés sont trop proches.
3. Le cristallin sert à la mise au point en changeant sa courbure. Il s'agit d'une lentille souple et flexible contrôlée par les muscles ciliaires qui assurent la formation d'une image nette en fonction de la distance entre l'œil et les objets vus, c'est l'accommodation visuelle. La lumière atteint la rétine en traversant le cristallin, il se contracte pour devenir plus convexe pour les objets les plus proches. Il fait converger les rayons lumineux pour former une image nette sur la rétine.

La rétine est une couche fine de cellules sensorielles au fond de l'œil. Elles sont sensibles à la lumière qu'elles convertissent en impulsions électriques véhiculées par le nerf optique jusqu'au cortex cérébral, précisément aux aires visuelles occipitales. Les informations transmises peuvent atteindre le million si l'on tient compte du nombre ces cellules (axones) du nerf optique. Le cortex réserve sa moitié pour le traitement visuel. Il existe deux sortes de cellules photoréceptrices (figure 3.3) :

- Les cônes sont majoritairement présents dans la zone centrale de la rétine, la fovéa, la zone où se concentrent les rayons lumineux. Ils sont activés en présence de la lumière et permettent la perception nette et en couleurs.

- Les bâtonnets ne détectent pas la fréquence de la lumière donc, ne distinguent pas les couleurs. Ils sont très sensibles en faible lumière comme pour la vision nocturne.

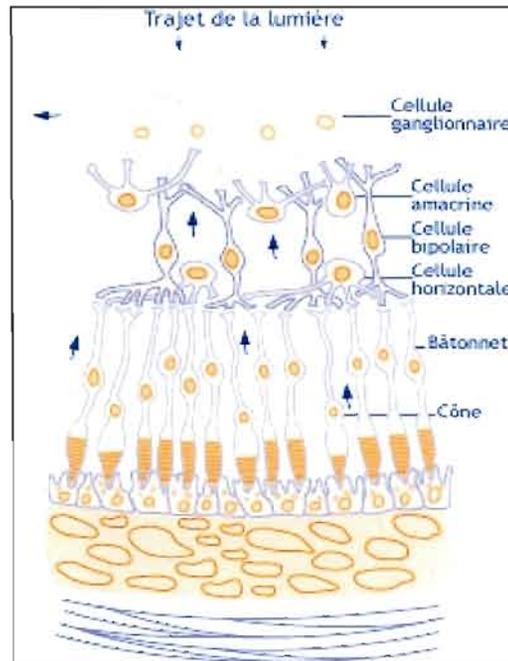


Figure 3.3 La structure de la rétine (Web, 2005)

La vision la plus nette se fait dans la zone fovéale qui représente un angle d'environ 3 degrés, soit un rond d'environ 3 cm de diamètre à une distance de 50 cm d'un écran. La qualité de l'image perçue se dégrade au fur et à mesure qu'on s'éloigne de cette zone. La vision devient ainsi de plus en plus floue : il s'agit de la vision périphérique. Le cerveau peut identifier les objets en zone périphérique et pour s'assurer de l'exactitude des objets vus, il peut piloter l'œil pour déplacer la vision fovéale.

3.6.2 L'attention visuelle

Les yeux nous permettent de repérer et d'explorer les objets de notre environnement. Bien que le mot attention soit très utilisé dans notre quotidien, sa définition demeure délicate. Le mot « attention » est souvent employé pour avertir quelqu'un d'un danger ou d'un événement qui n'est pas perçu faute de distraction ou d'ignorance. L'étude de l'attention visuelle se rattache à l'étude des mécanismes liés à la détection d'une cible dans un environnement, ces mécanismes sont complexes et non encore bien identifiés.

L'attention visuelle est l'action de concentrer son esprit sur un élément particulier. L'être humain ne traite pas de la même façon les observations issues de son environnement. Elle est parfois rapide qu'on ne peut se rendre compte pourquoi on donne plus d'attention. Le regard ne se fait pas d'une manière aléatoire sur les images observées, mais il est guidé par des traits privilégiant certains aspects (Kastner & Ungerleider, 2000). Dans le système perceptif, on peut distinguer deux types de processus :

- Ascendants (*Bottom-up*) : ce sont des processus complètement automatiques. Nous sélectionnons certaines informations qui seront transmises vers notre cerveau, il s'occupera par la suite de les décoder.
- Descendants (*top down*) : ce sont des processus contrôlés. Le cerveau envoie dans certains cas de l'information vers les systèmes sensoriels. Les perceptions peuvent être influencées par ce qu'on s'attend à voir ou par ce qu'on a déjà en mémoire.

Grâce à ses organes sensoriels, l'être humain peut percevoir les objets qui l'entourent de différentes manières. La vue demeure un sens très important, elle joue un rôle stratégique dans l'acquisition des connaissances. Le système visuel humain permet de percevoir des objets solides, liquides, gazeux, les ombres, les événements et les actions. La perception d'un objet est le fait de se rendre compte et d'en être conscient. La perception visuelle est la capacité d'identifier grâce à des attributs

visuels, d'être visuellement conscient. La vision permet de capter plusieurs données sur la cible. Elle permet de percevoir la forme, les contours, la dimension, les couleurs, l'emplacement spatial et le mouvement d'un objet. « À la différence de l'abstraction conceptuelle, de la résolution de problème ou de la formulation d'hypothèses scientifiques, la perception visuelle du monde est un acte simple qui fournit un accès immédiat au monde. Il suffit d'ouvrir les yeux pour que toute la richesse du monde se dévoile miraculeusement. » (Jacob, 2003).

3.6.3 *Le regard*

Les yeux ont une grande capacité de bouger et ne demandent que très peu d'effort physique. Il n'est possible de suivre le mouvement des yeux qu'avec des dispositifs de pointe comme l'oculomètre. L'oculomètre, en sa version récente, permet de connaître à tout instant la direction du regard du lecteur en analysant le reflet cornéen de la lumière infrarouge projetée sur l'œil. L'œil joue habituellement le rôle de récepteur d'information, mais dans notre étude il va être considéré comme une source d'information pour l'analyse de l'attention. Avec l'oculomètre, en version caméra sur table (système ASL¹⁴), le lecteur sera déchargé du matériel encombrant limitant ses mouvements. Une étude menée par Nielsen (Nielsen, 1997) a démontré que face à des pages web les internautes ne lisent pas tous les mots, mais en survolent quelques-uns et font généralement une lecture en diagonale. Les pages web contiennent parfois plus d'informations que ce dont on a besoin, de plus il y a généralement de la perturbation comme de la publicité indésirable. Plusieurs pages web sont mal conçues ou mal présentées, on présente peu d'information et l'on propose plusieurs liens hypertextes pour aller chercher davantage d'information. Nous sommes généralement victimes de ces présentations. La question qui se pose est alors la suivante : qu'elle est la meilleure manière de présenter des pages d'information? En réalité, il n'y a pas de meilleure manière. Il y a plusieurs facteurs qui entrent en jeu comme le profil de

¹⁴ <http://www.a-s-l.com>

l'internaute, son âge, son niveau d'éducation, ses préférences, sa culture, son état émotionnel, etc. Au lieu d'essayer de répondre à cette question, nous allons chercher à analyser le regard de l'internaute pour comprendre et diagnostiquer ce qui attire son attention, ce qu'il regarde, comment il passe d'une zone d'intérêt à l'autre.

Lorsqu'on lit un document électronique, souvent multimédia incluant du texte des images et des tableaux, ou lorsqu'on utilise la simulation, on opère à plusieurs niveaux : la perception, la compréhension et l'interprétation. Nous effectuons généralement un survol global du document présenté, sa structure est perçue. Certains éléments sont analysés, ensuite on effectue une lecture fine des parties jugées pertinentes. Ces deux phases peuvent d'ailleurs interférer de manière itérative. Selon le « *eye-mind hypothesis* » émise par Just et Carpenter (Just & Carpenter, 1980), c'est lors de la fixation de l'œil sur le mot que son traitement se déroule (voir la figure 3.4). Les informations portées par la trajectoire du regard permettent de repérer les points de focalisation, les zones d'intérêt qui peuvent donner des renseignements sur l'attention. Le suivi des points de fixation, leur durée et les retours en arrière donnent des indicateurs sur la compréhension. Les mouvements saccadiques jouent un rôle primordial dans la compréhension de la perception des mots ou des images (Rayner & Pollatsek, 1992).

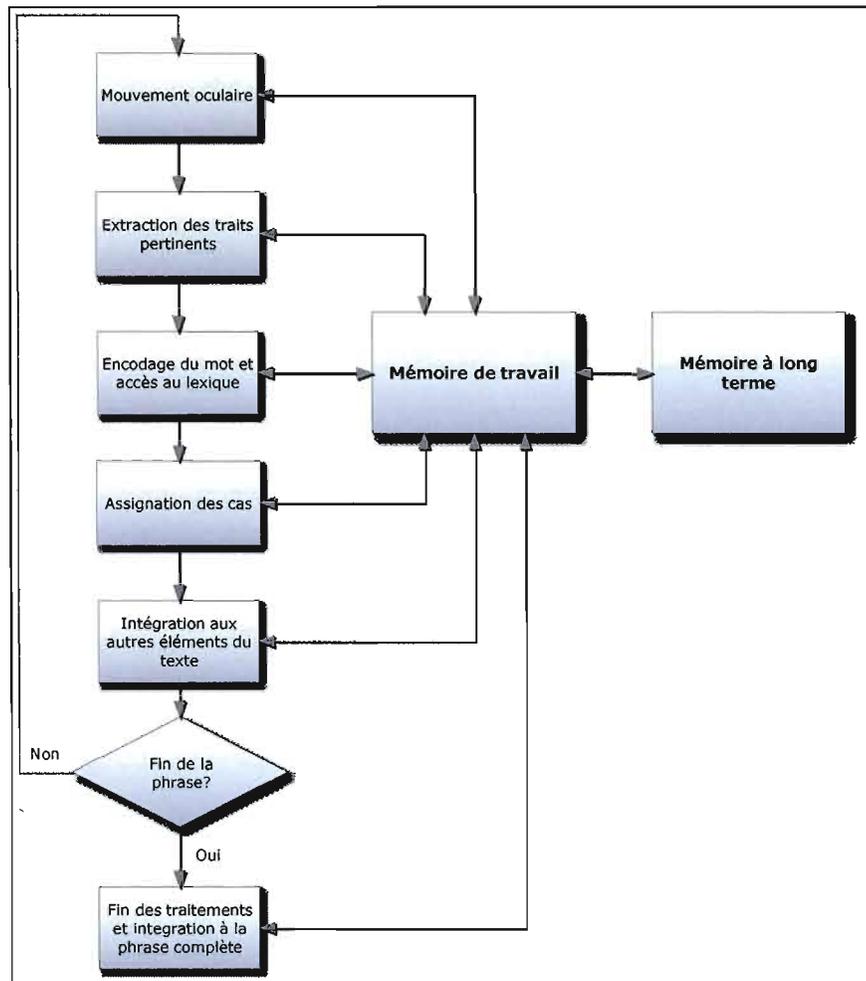


Figure 3.4 Modèle de lecture de Just et Carpenter

Cependant, l'œil du lecteur ne fait pas des mouvements uniformes ou linéaires, il fait des bonds ou des saccades d'une zone à l'autre. Le suivi oculaire démontre que l'œil ne fixe pas une lettre ou un mot, il fixe toute une zone. Le couplage des systèmes informatiques et oculométriques permet de mieux comprendre les mouvements des yeux.

Dans la première partie du chapitre suivant, nous allons présenter un historique des recherches et une description des techniques effectuées pour la mesure des

mouvements oculaires ainsi que les méthodes employées pour les enregistrer. Nous mettons en évidence les indices que nous pouvons mesurer lors d'une activité de lecture électronique. Dans la deuxième partie, nous présentons un aperçu sur les mesures physiologiques et précisément les mesures de l'activité électrodermale.

CHAPITRE IV

CADRE PRATIQUE SUR LE SUIVI OCULAIRE

4.1 Le suivi oculaire

4.1.1 Historique

Les yeux sont en mouvement continu pour se rendre compte de l'environnement. Les mouvements ne cessent pas même quand on fixe un objet, il y a toujours des micromouvements pour rafraîchir et transmettre l'image perçue. Ces mouvements qu'on appelle aussi saccades assurent la continuité de la vision, en leur absence l'image ne sera plus perçue (Pritchard, 1961). La disparition de l'image s'effectue graduellement. Ces mouvements des yeux ne sont pas effectués sous forme de glissement, mais sous forme d'un déplacement brusque (saccade) et d'immobilité de courte durée (fixation).

L'importance et la complexité de l'œil sont incontestables. Plusieurs chercheurs se sont concentrés sur l'étude du fonctionnement de cet organe et des mécanismes sous-jacents. Descartes¹⁵ est considéré comme le premier à avoir étudié l'importance des mouvements oculaires dans la vision et la perception. Les premiers travaux sur les mouvements oculaires ont commencé avec Louis Emile Javal au début du 20e siècle (Javal, 1905). Grâce à des observations directes des mouvements des yeux, il

¹⁵ René Descartes (1596 - 1650) est un mathématicien, physicien et philosophe français, considéré comme l'un des fondateurs de la philosophie moderne. www.fr.wikipedia.org

concluait que l'œil bouge en effectuant des sauts et des pauses. Le premier appareil capable de mesurer les mouvements des yeux a été développé par Edmund Burke Huey en 1897 (Huey, 1908) (voir figure 4.1). Il s'est intéressé à la manière de lire des textes. Il concluait que lors d'une fixation, les gens lisent plusieurs lettres, voire plusieurs mots. Son appareil consistait en une membrane très fine trouée au centre qui sera placée directement sur l'œil comme une lentille de contact. Cette membrane est attachée à un levier dont l'autre bout actionne une aiguille qui repose sur un cylindre en rotation. Chaque mouvement actionne l'aiguille qui enregistre les traces. Son expérience a bien confirmé la thèse de Javal : le mouvement des yeux est saccadique.

Pour le traitement d'une image dans le cerveau, l'ordre et la durée des fixations dépendent non seulement de la nature de l'image perçue, mais aussi de ce que le sujet a déjà mémorisé (Duchowski, 2002; Engbert, Kliegl, & Longtin, 2004). Le sujet sélectionne les éléments les plus importants (subjectif) pour aller chercher par la suite les moins importants.

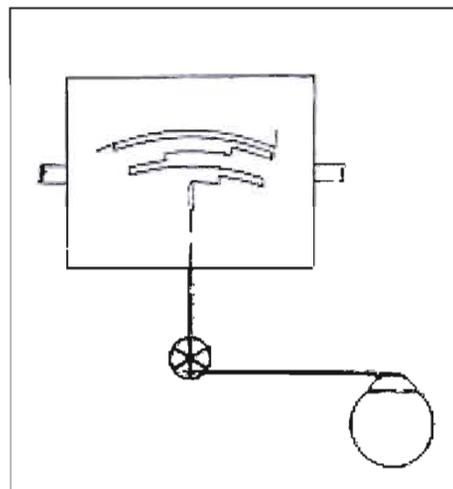


Figure 4.1 Appareil d'Edmund Burke Huey

En 1900, Raymond Dodge a pu mettre en place un appareil de mesure des mouvements oculaires. Il consistait à placer un rayon lumineux sur la cornée et à

photographier le mouvement de la réflexion. Il a pu classer les mouvements oculaires en cinq types (Collewijn, 1998) :

1. Les saccades;
2. La poursuite;
3. Les mouvements compensateurs;
4. Les mouvements compensateurs réactifs;
5. La convergence.

Son dispositif était moins intrusif que celui de Huey et était à l'origine des oculomètres utilisant le reflet cornéen. Il lui a aussi permis de conclure qu'il n'y a pas de perception visuelle lors des saccades (figure 4.2).

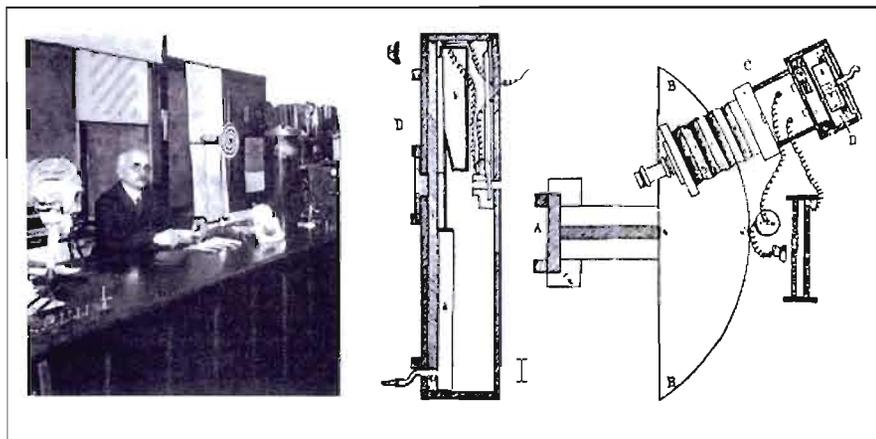


Figure 4.2 Le photochronographe de Raymond Dodge

L'un des fondateurs de la recherche moderne sur les mouvements oculaires est Al'fred Luk'yanovich Yarbus. Son livre *Eye Movements and Vision* (Yarbus, 1967) traduit du Russe a influencé les nouvelles recherches dans le domaine de l'oculométrie et de la vision. Après de nombreuses années de ses recherches, il a pu développer un dispositif assez précis d'enregistrement des mouvements oculaires ce qui a été bénéfique pour plusieurs disciplines dont la neuroscience, la psychologie expérimentale, l'intelligence artificielle et la science comportementale. Son ouvrage a

regroupé plus d'une vingtaine d'articles développés à l'Institut de Biophysique de l'Académie des Sciences de l'URSS entre 1954 et 1962. Le système de Yarus est basé sur le principe du levier optique utilisant un miroir qui tourne avec l'œil et reflète une source de lumière fixe. La lumière réfléchie est interceptée et enregistrée par un appareil photographique « photokymographe » (voir figure 4.3). Le miroir est agrippé à l'œil par un système de ventouse positionné sur la sclérotique (figure 4.4). Bien que ce système soit assez léger, de l'ordre de quelques centigrammes, le sujet est obligé de maintenir son œil ouvert à l'aide de ruban adhésif de plus, tête doit rester immobile durant toute l'expérimentation. Ceci impose une réduction de la durée expérimentale à environ cinq minutes et cause un inconfort au sujet.

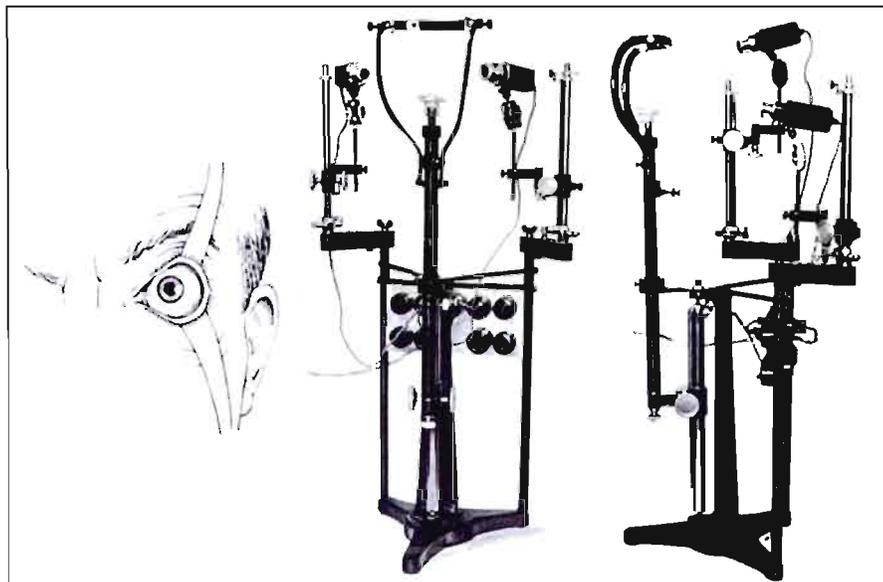


Figure 4.3 Dispositif d'enregistrement de Yarus (le photokymographe)

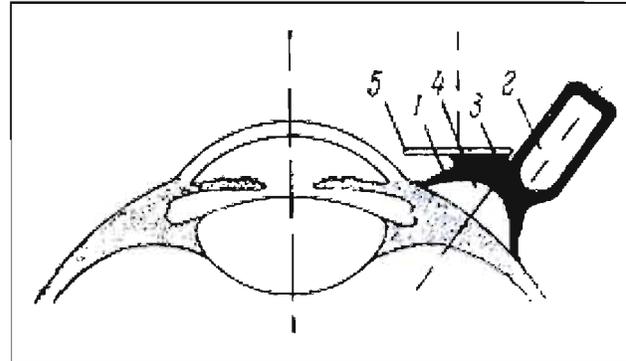


Figure 4.4 Dispositif de Yarbuss grippé sur l'œil

4.1.2 Les techniques d'enregistrement des mouvements des yeux

Regarder des objets est une activité naturelle, habituelle et assez fréquente. Malgré son apparence simpliste, la vision est une activité assez complexe. Le regard ne se fait pas d'une façon continue, il est formé de pauses (fixations) et de sauts (saccades). Lors de la lecture, les yeux ne parcourent pas toutes les lettres de façon continue, ils bougent d'une façon très rapide et sautent d'un endroit à un autre.

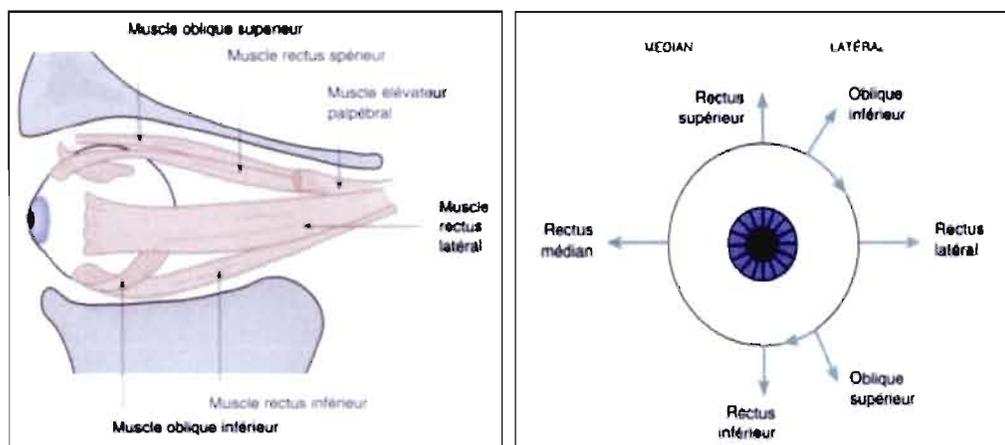


Figure 4.5 Les muscles extra-oculaires et les directions de l'œil (Pocock & Richards, 2004b)

La vitesse angulaire des yeux varie entre 200 et 600 degrés par seconde (Pocock & Richards, 2004a). L'orientation de l'œil est assurée par des muscles extra-oculaires

qui lui donnent une grande agilité et lui assurent la fonction de capteur d'information très mobile (figure 4.5).

Les fixations et les saccades varient en fonction de l'activité. Le tableau 4.1 résume les principales caractéristiques de l'œil (Baccino & Colombi, 2001).

Tableau 4.1 Principales caractéristiques oculaires en fonction du type de tâches.

Tâche	Durée moyenne de fixation (ms)	Taille moyenne de saccade (degré d'angle visuel)
Lecture silencieuse	225	2° (environ 8 caractères)
Lecture orale	275	1.5° (environ 6 caractères)
Recherche visuelle	275	3°
Inspection de scènes visuelles	330	4°
Lecture de partitions	375	1°

Ces valeurs sont des moyennes. Les fixations varient entre 50 et 500 ms en lecture, les saccades entre 30 et 50 ms (Rayner, 1998). Durant les saccades, il n'y a pas d'extraction d'information visuelle. Malgré cette grande mobilité, le monde qui nous entoure nous semble assez stable, on parle de suppression saccadique. L'information visuelle n'est extraite que lors des fixations (Wolverton & Zola, 1983). Les yeux bougent pour explorer des scènes visuelles ou bien pour chercher un objet, le regard s'oriente vers les éléments qui nous intéressent, lesquels seront fixés. Bien que l'oculomètre calcule des coordonnées des yeux sous forme de points dans un plan, les yeux ne fixent pas un point, mais une zone appelée empan perceptif qui entoure le point de fixation (Rayner, Warren, Juhasz, & Liversedge, 2004). En lecture, la taille de cet empan est de 3 à 4 caractères à gauche et de 14 à 15 caractères à droite du point de fixation pour les textes qui se lisent de gauche à droite (Rayner, 1998). Bien que la meilleure vision soit dans la zone fovéale, les informations qui sont autour de cette zone (parafovéale) sont perçues et permettent un traitement anticipé, il s'agit de l'effet d'aperçu (Rayner, 1975). Les mots courts peuvent être identifiés sans être fixés (Drieghe, Rayner, & Pollatsek, 2005). L'empan perceptif varie en fonction de la difficulté du texte, la lecture de son propre texte est

généralement plus rapide ce qui explique entre autres qu'on ne se rend pas compte de ses erreurs textuelles.

Il existe plusieurs techniques d'enregistrement des mouvements oculaires qui ne cessent d'évoluer pour être moins invasif et plus précis, nous les décrirons dans ce qui suit :

4.1.2.1 La technique galvanométrique (*Scleral search-coil technique*)

Elle se base sur l'installation d'une lentille qui doit être collée à l'œil et utilise une bobine d'induction à l'intérieur de la lentille. La position de l'œil est déterminée grâce au champ électromagnétique autour de la tête du sujet. Malgré sa précision, cette technique nécessite une bonne dextérité quant à la manipulation des lentilles et cause un inconfort à l'apprenant (Robinson, 1963).

4.1.2.2 La technique électro-oculographique « Electro-oculography (EOG) »

C'est une technique établie par Fenn et Hursh (Fenn & Hursh, 1934), peu coûteuse qui utilise des électrodes cutanées placées autour de l'œil dans le but de suivre les variations des potentiels électriques (bioélectrique) sur la peau entourant l'œil. L'œil est un pseudo sphère chargée positivement en avant et négativement en arrière.

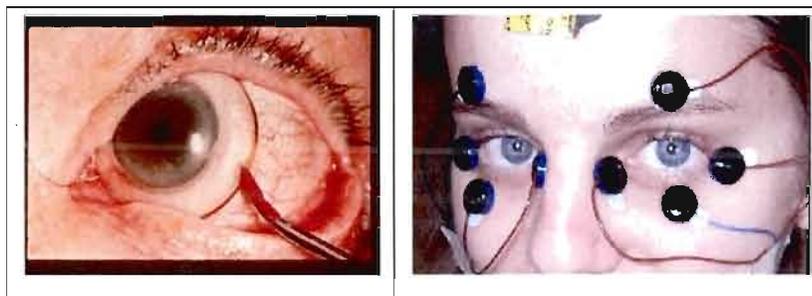


Figure 4.6 Galvanométrie (gauche) Électro-oculographie (droite)¹⁶

¹⁶ <http://www.metrovision.fr/mv-po-notice-us.html>

Le mouvement provoque le déplacement de l'emplacement des charges électriques, d'où l'existence d'un champ électrostatique. Bien que cette méthode enregistre les mouvements des deux yeux, elle demeure peu précise et inadéquate pour l'étude de la lecture. Elle est inconfortable et peut provoquer des irritations de la peau (figure 4.6).

4.1.2.3 La réflexion de la lumière

C'est une technique qui profite de la réflexion de la lumière par l'œil. Elle utilise une lumière souvent infrarouge projetée sur l'œil du sujet, d'où l'appellation de technique oculographique infrarouge. Les rayons réfléchis sont captés et servent à déterminer l'endroit fixé par l'œil. Il existe plusieurs variantes de cette technique (Mielllet, 2004) :

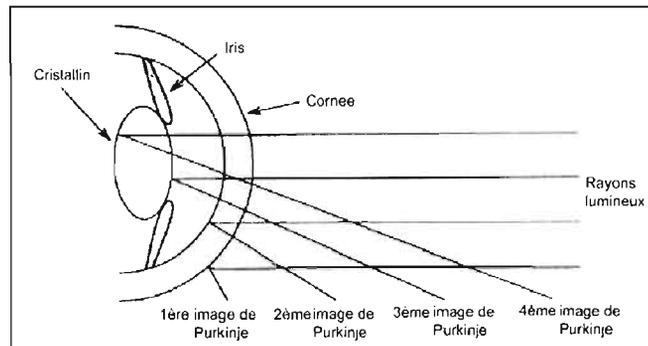


Figure 4.7 Technique de l'image de Purkinje (Mielllet, 2004)

- Technique basée sur la poursuite du limbus, qui est la frontière entre la sclérotique (blanc de l'œil) et l'iris (partie sombre). Elle se base sur la mesure de la lumière réfléchi suite à l'éclairage du limbe. Sa simplicité lui assure un coût faible, mais elle est très sensible aux mouvements de la tête et à la variation de la lumière environnante;
- Technique de la poursuite de la pupille, elle utilise les réflexions de la pupille;

- La poursuite de l'image de Purkinje : les rayons émis éclairant l'œil sont réfléchis par quatre parties de l'œil : l'extérieur de la cornée, son intérieur, l'extérieur du cristallin et son intérieur. On obtient quatre reflets qu'on appelle « image de Purkinje » (figure 4.7).

Plusieurs modèles existent, certains doivent être portés sur la tête, d'autres imposent l'immobilité de la tête et l'on trouve actuellement des modèles n'imposant aucun contact avec le sujet.

4.1.3 Les différents types de mouvements oculaires

La meilleure qualité d'images est obtenue pour celles projetées sur la fovéa, la qualité diminue progressivement en s'éloignant de la fovéa. Il est évident que l'œil va chercher à obtenir des images de meilleure qualité, ce qui explique ses mouvements continus. Une autre contrainte vient justifier ses mouvements, c'est la limitation du champ visuel. On ne peut voir que les objets situés dans un champ de 130 degrés verticalement et 180 degrés horizontalement. L'œil est très agile grâce aux six muscles qui l'actionnent et lui assurent des rotations et de torsion (Da Silva, Courboulay, Prigent, & Estrailier, 2009).

Un objet est fixé après l'exécution de l'étape préattentive et attentive qui détermine l'emplacement de l'objet. L'œil se déplace vers la cible pour avoir la meilleure acuité visuelle, ce saut est une saccade, ce n'est pas le seul type de mouvement que l'œil peut effectuer. Une liste de ses mouvements a été établie d'après les recherches de Jacob (Jacob, 1995) cité dans (Miellet, 2004) qu'on peut résumer ci-après :

- La convergence : est causée par le mouvement de deux yeux en même temps pour s'assurer que l'objectif est bien visé par les deux yeux. Plus la distance de l'objectif est réduite plus les yeux s'orientent l'un vers l'autre. Il s'agit d'un mouvement volontaire (Humphreys & Bruce, 1989);

- Les mouvements torsionnels « *rolling* » : il s'agit des mouvements de rotation des yeux autour d'un axe traversant la fovéa et la pupille. Ces mouvements sont involontaires et dépendent de l'angle du cou (Jacob, 1995);
- Les saccades : ce sont des déplacements très rapides du regard dans le but d'explorer l'environnement ou une scène. Une saccade prend entre 100 et 300 ms pour s'initier (temps de latence) à compter de la manifestation du stimulus au déplacement des yeux. Une saccade est complétée après 30 à 120 ms. Les saccades peuvent se déclencher involontairement et l'on compte environ 150000 saccades par jour soit environ entre 3 et 5 saccades par seconde (Dodge, 1900). Vu la vitesse des saccades qui varie entre 300 et 800 degrés par seconde, les informations perçues entre deux saccades n'ont pas le temps d'être analysées. Il en résulte qu'aucune information n'est perçue lors des saccades (Rayner & Pollatsek, 1989). Une saccade se programme à la suite d'une décision du cerveau qui déplace l'attention visuelle vers l'objectif souhaité et ensuite commande les muscles oculaires pour se le fixer (Posner, Snyder, & Davidson, 1980);
- La poursuite : les yeux peuvent poursuivre le mouvement d'un objet, ce dernier doit atteindre la zone fovéale et y rester. Ces mouvements sont plus lents et moins brusques que les saccades. Il s'agit d'un mouvement involontaire qui ne prend lieu qu'en présence d'un objet mobile;
- Le nystagmus : ce mouvement apparaît pour compenser le mouvement de rotation de la tête, l'information est obtenue grâce à l'oreille interne. Le phénomène de la fenêtre du train illustre bien ce cas : on est en mouvement et on regarde à travers la fenêtre, on fixe un objet qu'on suit avec le regard. Une fois l'objet n'est plus disponible, on déplace le regard rapidement vers une nouvelle position;
- Les décalages et microsaccades : sont observables durant les fixations. Ces mouvements consistent en des glissements du regard suivi d'une micro

saccade qui a un rôle de correction. Il s'agit d'un mouvement involontaire (Barber & Legge, 1976);

- Le nystagmus physiologique : l'image qui est projetée sur la rétine a besoin d'être rafraîchie faute de quoi elle ne sera plus perceptible. Ce type de mouvement est une oscillation de haute fréquence de l'œil favorisant la projection continue des images observées sur la rétine. Ce mouvement est involontaire et se passe durant les fixations. Il est de l'ordre de 1 degré.

La vision est une composition de ses différents mouvements. Les saccades et les fixations sont de bons indicateurs de la mesure de l'attention.

4.1.4 Mouvements oculaires et vision

Nous présentons une brève description de la vision et de la cognition, ce qui suit est tiré de (Caelen, Eglin, Hollard, & Meillon, 2003). Les mouvements de notre regard sont :

- Involontaires : contribuent à stabiliser sur la rétine l'image perçue, et à coordonner le regard des deux yeux;
- Volontaires : permettent la capture ou le suivi d'une cible et le déplacement du regard dans l'espace;

Le champ récepteur oculaire comprend trois zones :

- Fovéale : détient la capacité de percevoir les détails grâce à la concentration des cônes récepteurs de la rétine;
- Para fovéale : englobe environ 5% de part et d'autre du point de fixation;
- Périphérique : au-delà de ces 5% de part et d'autre du point de fixation.

Bien que la forte concentration se fasse dans la zone fovéale, les travaux de plusieurs chercheurs ont montré que les mots s'y trouvant aux alentours et ne faisant pas l'objet de fixations sont tout de même perçus (Balota, Pollatsek, & Rayner, 1985) et (Underwood, Clews, & Everatt, 1990). Selon (Caelen *et al.*, 2003) cette

information est soit suffisante pour être traitée, soit ambiguë ou incomplète et permet de programmer une prochaine fixation.

La prise d'information par le regard invoque deux processus :

- Périphérique : la perception incluant la reconnaissance des formes;
- Central : processus de la cognition : rappel mémorial, compréhension au plan sémantique et interprétation au niveau pragmatique.

« L'activité cognitive produit des images mentales qui présentent des ressemblances fonctionnelles et structurales avec l'activité perceptive visuelle. Les représentations mentales sont de deux types :

1. Forme abstraite assimilée à un codage propositionnel de l'information;
2. Forme analogique de l'objet représenté : c'est une image mentale qui conserve les propriétés structurales et fonctionnelles de l'objet.

Ainsi, l'objet réel perçu, le document visuel ou image matérielle qui le représente, le percept ou image née de la perception (qui peut n'être que partielle), et l'image mentale détiennent des caractéristiques communes qui correspondent à la même structure générale de l'objet. » (Caelen et al., 2003).

4.1.5 L'activité de lecture

Pour garder une empreinte des événements passés, l'humain enregistrait ses traces sur différents supports pour sauvegarder son histoire et sa culture. Une évolution impressionnante des technologies a permis le développement de l'imprimerie et le support de stockage de l'information textuelle, image, son et vidéo. Ce qui a été enregistré est destiné à être consulté et lu par d'autres personnes, ce passage de l'information rencontre certainement plusieurs obstacles entre le concept écrit (les idées de l'écrivain) et l'interprétation du lecteur (ce qu'il a compris). Peu importe le support de l'information, il n'existe pas une manière unique de décrire ou d'interpréter une action. La richesse du langage naturel et les connaissances antérieures de chacun font de sorte que chacun se construit une signification propre à

lui, qui peut être différente d'une personne à l'autre. Pour comprendre une même action, on est souvent mené à la comparer à celles vécues au passé, chacun a son propre capital de connaissances, on ne comprend pas la même chose de la même manière (Piaget, 2003).

Actuellement, on manipule des quantités impressionnantes d'informations grâce à l'utilisation du support numérique. Il est facile de se procurer plusieurs documents électroniques, de les consulter, de les indexer, d'effectuer des recherches et potentiellement de les lire, voire de les comprendre. Selon Baccino (Baccino, 2004) « l'activité de lecture est envisagée comme un ensemble de processus cognitifs qui transforment l'information visuelle des mots d'un texte en une représentation cognitive intégrant à la fois les connaissances lues que les connaissances déjà mémorisées par le lecteur ». Les yeux sont capables d'intercepter les informations lumineuses pour isoler des formes identifiables selon des processus complexes notamment des comparaisons avec des formes déjà mémorisées, des filtrations de l'information perçue, de lui attribuer un sens et de l'intégrer avec les connaissances antérieures. Cette définition est générale et indépendante du support de l'information lu. Pour les documents numériques Baccino (Baccino, 2004) parle de lecture électronique, qu'il définit comme étant « la lecture électronique est l'étude de processus cognitifs engagés par un lecteur humain pour percevoir et interpréter l'information présentée par une source électronique ». Bien que cette définition ne diffère de celle de la lecture classique que par la nature du support, il est à noter que le processus de lecture électronique engage le lecteur dans des mécanismes plus complexes en présence d'une quantité d'information volumineuse, des sauts d'une section à l'autre (hyperliens), de moyens de recherches, et donc d'un effort plus important pour la gestion et la coordination de tous ces éléments. Face à un document électronique, on peut trouver d'autres facteurs perturbateurs de l'activité de lecture comme la présence d'autres logiciels ou des connexions à d'autres bibliothèques. Cependant, l'activité de lecture peut être bien enrichie comme elle peut être

perturbée. L'ordinateur a favorisé le stockage de quantité massive de documents numériques variant du simple texte aux encyclopédies multimédias. Le lecteur ne peut avoir le même comportement face à ces innovations, son petit écran devient une fenêtre sur un monde virtuel où les frontières ne sont pas définies. Il en résulte une modification de son comportement pour pouvoir interagir avec ses nouveaux supports.

L'œil est l'organe qui reçoit une quantité impressionnante de données véhiculées par la lumière. Ces informations seront codées et transmises vers le centre de traitement de l'information : le cerveau.

4.1.6 La lecture et la compréhension

Lors d'une activité de lecture d'un document, plusieurs niveaux de traitements de l'information sont mis en jeu. En effet, les traitements vont de la perception lumineuse d'un mot jusqu'à la compréhension. Dès le jeune âge, nous commençons à apprendre à lire, cette activité est familière et devient spontanée et très courante dans notre société. Bien qu'elle soit évidente, il nous est difficile de bien comprendre les mécanismes qui se déroulent lors d'une activité de lecture et de compréhension. Il faut étudier les aspects élémentaires de la lecture (reconnaissance lexicale) et le processus psycholinguistique impliqué dans la compréhension (traitement syntaxique et sémantique). Des études menées par Strahm et Baccino (Strahm & Baccino, 2006) ont utilisé l'enregistrement des mouvements oculaires pour reconnaître précisément ce que le lecteur est en train de regarder, dans quel ordre et combien de temps est passé lors des fixations. Les données recueillies informent sur les processus perceptifs et cognitifs traitant la prise des informations. Le traitement du sens relève de l'étude des systèmes de mémoire sémantique. La compréhension du texte consiste à lier des informations linguistiques avec des connaissances du monde réel. Un mécanisme de sélection va choisir les objets, événements et états invoqués par le texte. Les connaissances du lecteur sont représentées sous forme de base de connaissances (Schank & Abelson, 1977) soit sous forme de concepts liés par le sens. Le lecteur

construit des liaisons entre le document et ses connaissances en mémoire. Il s'agit de l'intégration des informations faite par l'intermédiaire de représentation mentale épisodique construite au fur et à mesure de la lecture. Selon Kintsch (Kintsch, 1988), la représentation mentale construite possède trois niveaux de représentation de l'information :

- Un niveau de surface : exprime l'information lexicale et syntaxique;
- Un niveau sémantique : représente la signification locale et globale des phrases;
- Un niveau situationnel : englobe les connaissances antérieures et les aspects contextuels.

La compréhension de texte ne s'effectue pas seulement au niveau sémantique, elle est rattachée à la manière dont il est présenté. La manière de mettre en forme un texte affecte en plus de la perception visuelle la compréhension et la mémorisation. L'utilisation des marqueurs avec différentes couleurs lors de la lecture de textes permet de mieux mettre en évidence les éléments à retenir.

Lors de la lecture, le suivi oculaire permet d'obtenir des mesures des coordonnées des yeux sur l'écran, les temps de fixations ainsi que d'autres indices spéciaux mesurables cité par Miellat (Miellat, 2004), on a :

- La refixation il s'agit de fixer la même zone plusieurs fois avant de passer à une autre zone. Dans le cas de lecture de texte, une refixation d'un mot signifie fixer ce mot plusieurs fois à des endroits différents avant de le quitter vers un autre mot;
- La régression « *skipping* » pour différentes raisons, on peut avoir besoin de revisiter une cible qu'on a déjà fixée avant. La régression désigne la saccade faisant passer le regard de la cible actuelle vers une cible précédente. Ceci soulève l'existence de mécanismes internes demandant plus de précisions sur une information déjà observée, mais une révision est nécessaire pour

comprendre ou établir un lien entre les différents éléments en cours d'observation. Dans le cas de la lecture, il s'agit d'une saccade vers le point précédent celui en cours de fixation. Il s'agit d'habitude d'un retour à un mot précédent;

- Le lieu de fixation initiale « *initial landing site* » lors de la lecture d'un mot, le regard se fixe la première fois sur un lieu qui n'est pas le début du mot, mais situé entre le début et le centre, comme a été démontré dans (Rayner & Bertera, 1979). Il appela ce lieu favori « *preferred viewing location* ». Il peut être exprimé par le nombre de lettres par rapport au début du mot (sens positif) ou la fin du mot (sens négatif);
- La distance du lieu de départ de la saccade ou distance de lancement « *launch distance* » est la distance entre la fixation précédente et le début du mot fixé. Cette distance est donnée en nombre de caractères. Elle est différente de la longueur de la saccade (distance entre les points de départ et d'arrivée d'une saccade);

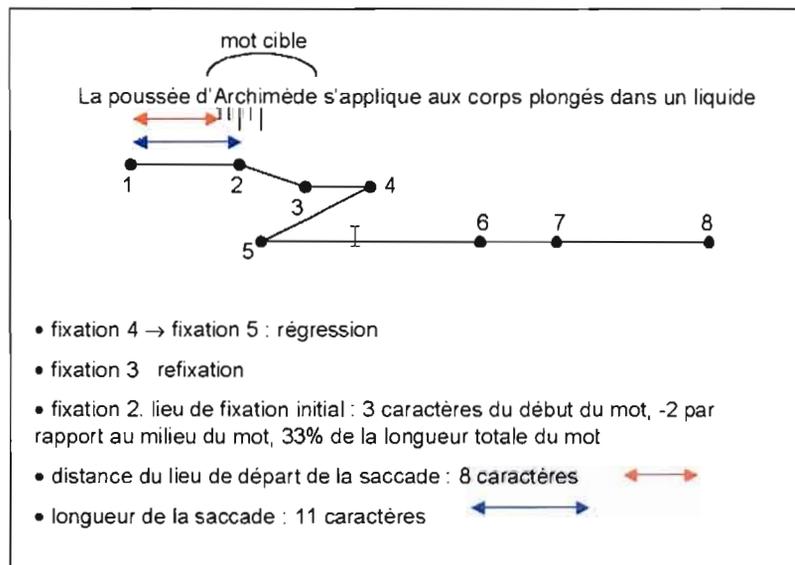


Figure 4.8 Exemple d'illustration des indices spatiaux (Mielliet, 2004).

- La durée de la première fixation « *First Fixation Duration* » cette action est très particulière, face à une nouvelle scène, on a tendance à commencer à explorer et à essayer d'identifier ce qui est devant les yeux. Elle peut être associée à une exploration ou à un jugement de familiarité des éléments observés. Dans le cas de la lecture d'un texte, la durée du regard est associée à l'identification des mots. Les mécanismes de compréhension du sens du mot dans son contexte sont enclenchés, une fois l'ensemble des mots concernés est lu.
- La durée totale de fixation « *Total Fixation Duration* » est la somme des durées de toutes les fixations sur un mot en incluant les régressions.
- La durée du regard « *Gaze Duration* » est la somme des durées des refixations sur un mot avant de le quitter pour regarder un autre mot.

La figure 4.8 illustre les différents indices précédents.

Comme les mouvements des yeux sont saccadiques, certains mots peuvent être lus sans pour autant être fixés. Bien que ceci puisse paraître problématique, la vision ne fixe pas des points, mais plutôt un champ dont le centre est projeté sur la zone fovéale et les alentours dans la zone parafovéale, donc des mots sautés peuvent être 'lus' sans être fixés. Le saut des mots ne nous donne aucune indication sur la durée de fixation (elle est nulle), les mots peuvent être déduits du contexte et par conséquent n'affecte pas la compréhension. Le sens du mot peut avoir une bonne probabilité d'être identifié lors du passage du regard sans arrêt sur le mot en question. Ceci est en étroite liaison avec le contexte global. En fonction de la familiarité avec le sujet, différents lecteurs ne passeront pas la même durée de lecture. Une fois le contexte connu, le lecteur fera appel à sa mémoire pour mettre en relation des notions qui peuvent avoir un lien. Le titre d'un article ou le nom de son auteur donne déjà des indicateurs favorisant la compréhension du reste du document. De plus, la connaissance du langage et de la grammaire favorise le saut de mot, vu qu'on s'attend aux termes qui vont suivre. La connaissance du style de l'auteur rend plus facile la

compréhension de ses écrits et diminue la durée de la lecture. Au fur et à mesure qu'on poursuit la lecture, certains concepts et structures deviennent de plus en plus faciles à identifier, ceci peut accélérer la lecture et augmenter les sauts de mots tout en gardant la compréhension du sens. Des associations entre les termes se construisent tout au long de la lecture, ces liens peuvent être utilisés pour prédire un mot qui pourra suivre. Ces mécanismes rappellent le principe de l'analyse sémantique latente (Deerwester, Dumais, Furnas, Landauer, & Harshman, 1990) qui suppose que l'appariement des termes est lié à la probabilité de trouver ces termes dans des contextes similaires. Il en résulte donc que la présence d'un terme induit automatiquement la présence de ceux qui lui sont sémantiquement similaires, comme cité dans (Firth, 1957) : « *You shall know a word by the company it keeps.* ».

Les mots qu'on peut prévoir ont généralement une longueur plus courte que les autres, donc, ont plus de chances d'être sautés. Bien que le contexte semble très important pour prédire les mots qui suivront, Brysbaert, Drieghe et Vitu (Brysbaert, Drieghe, & Vitu, 2005) affirment que la longueur du mot demeure le meilleur prédicteur de saut de mots.

Des situations semblables peuvent apparaître quand l'auteur relit son propre texte, des erreurs peuvent passer sans être aperçues. En fait, ce n'est pas exactement ce qui est écrit qui est analysé. Les mots ne sont pas analysés un à un, mais derrière il y a le sens global de la phrase. Il est difficile de corriger ses propres erreurs, tout simplement parce qu'on ne les voit pas correctement : la représentation mentale qui se forme ne correspond pas forcément à ce qui est présenté. Un conducteur distrait peut heurter la voiture qui le précède, il pourra justifier cet accident par le fait « qu'il ne l'a pas vue », pourtant une voiture ne passe pas inaperçue. Les mots sautés représentent environ 17% pour les mots de contenu (c'est le cas des noms, verbes, adverbes ou adjectifs) contre 62% pour les mots de fonction (articles définis ou indéfinis, quantificateurs, prépositions, conjonctions) selon (Carpenter & Just, 1983).

Autour du point fixé, l'œil est capable d'identifier environ 3 à 4 lettres de part et d'autre du point de fixation, il s'agit de l'empan perceptif qui a été mesuré dans (Rayner & Bertera, 1979) entre 7 et 11 lettres. La vision parafovéale permet un prétraitement des mots suivants et donc peut accélérer la lecture.

En parallèle avec les mouvements des yeux, des mécanismes sous-jacents sont en exécution pour l'interprétation et la compréhension de ce qui est dans le champ visuel.

4.1.7 Mouvement oculaire dans les interactions humain-machine

Les mouvements oculaires peuvent être utilisés dans les interactions humain-machine. En effet, en IHM¹⁷ on étudie les différentes façons de pouvoir interagir avec l'ordinateur. Il est évident que nous utilisons essentiellement les mains que ce soit pour taper sur le clavier ou bien pour déplacer la souris. Les mains sont aussi utilisées pour manipuler les stylets optiques ou des écrans tactiles (Hix & Hartson, 1993). Le clavier et la souris sont les organes d'entrées les plus populaires et les plus utilisés, mais on se rend bien compte qu'ils sont incapables de bien exprimer des attentions ou des émotions. Des recherches ont permis d'analyser la voix et de développer des interfaces qu'on peut commander avec la voix, après une phase d'apprentissage pour bien réagir à la prononciation des différents individus (Caelen, 1996). Dans cette recherche, nous mettons l'accent sur l'utilisation des yeux lors des interactions avec la machine. Ce type d'interactions est bien particulier, l'enregistrement des mouvements oculaires génère une quantité impressionnante de données étant donné la vitesse des yeux. Le nettoyage et l'analyse de ces données demeurent une tâche assez complexe. Nous les utiliserons les mouvements oculaires pour mieux comprendre l'état de l'apprenant en récoltant des indices qui ne peuvent pas être exprimés par les mains.

¹⁷ Interface humain-machine

Argyle (Argyle, 2007) a estimé que lors d'une communication verbale entre deux personnes, seulement 30% du processus de communication est verbal, les 70% représentent le résultat de communication non verbale. Le regard joue en effet un rôle crucial dans les communications sociales (Kendon, 1967).

L'utilisation du mouvement oculaire dans les interactions humain-machine est un domaine très prometteur et qui demeure un axe de recherche très important. Les interactions avec la machine peuvent dépasser l'utilisation classique du clavier et de la souris. D'autres instruments comme le stylet optique ou l'écran tactile apportent plus de facilités, de rapidité ou du confort à l'apprenant. Ceci impose des mouvements musculaires et limite l'expression de l'apprenant par l'usage de ses mains uniquement. D'autres techniques comme la reconnaissance vocale contribuent à faciliter le dialogue entre humain et machine. Il existe plusieurs expériences qui ont donné de très bons résultats comme la commande à distance dans l'auto par exemple. Actuellement, la disponibilité des logiciels de reconnaissance vocale est très rependue, voire intégrée avec des systèmes d'exploitation. Cette technique exige une phase d'apprentissage parfois longue et pénible. L'existence d'autres techniques comme l'oculométrie nous permet d'étudier les différents rôles que l'œil peut jouer dans l'interaction. Il y a deux rôles que peut jouer l'œil lors des interactions :

- Le premier rôle est passif, il consiste à enregistrer des mouvements oculaires et les étudier plus tard pour en extraire des comportements de l'apprenant dans un environnement d'apprentissage. Cette tâche est longue et fastidieuse, l'accumulation des données engendre des traitements lourds et des difficultés de dépouillement. En premier lieu, nous avons utilisé le système ASL pour enregistrer les données. Un module permettant de rejouer les mêmes scénarii que ceux faits par l'apprenant a été réalisé et exploité pour revisionner les endroits regardés avec les durées correspondantes. Cette étape constitue les prétests réalisés lors desquels les sujets sont exposés à deux types de situations :

- Une série des pages à lire, le contenu est mixte : textes et images;
 - Une série des pages textes contenant des questions avec des choix de réponses;
 - Une page dynamique contenant le simulateur.
- Le second rôle est actif, il consiste à utiliser le regard comme un moyen d'interaction pour conduire l'interaction lors d'un apprentissage. Un système se charge d'analyser des blocs de données oculométriques pour activer une action. Cette décision est issue d'un apprentissage effectué lors de la phase d'étude passive (prétests). En effet, le système réagit en fonction de ce qu'il a appris lors des interactions antérieures. Nous n'explorons pas cette possibilité dans le cadre de la présente recherche.

4.1.8 Oculométrie et cognition

Les études menées par Rayner et Pollatsek (Rayner & Pollatsek, 1992) sur l'observation de la lecture et la compréhension ont prouvé que les mouvements oculaires reflètent des processus cognitifs liés à l'activité visuelle. Les traces du regard nous donnent des informations sur les emplacements vus, le nombre de fixations, les saccades. Ces mesures nous permettent de connaître des activités mentales du traitement des informations visuelles. Lors de la tâche d'apprentissage des sciences physiques, chaque apprenant explore la structure et le contenu du cours de sa propre manière. Il est naturel que le temps mis pour l'exploration varie d'un sujet à l'autre dépendamment de la motivation, de l'intérêt, de l'habileté et des stratégies de chacun. Les étudiants ont la capacité de lire, de comprendre, d'identifier et de mémoriser les informations perçues (Bonnet, 1989).

L'analyse des données visuelles nous permet d'évaluer la structure du document et d'extraire les zones ayant plus d'intérêt ou plus de complexité. Il est évident que le parcours diffère d'un apprenant à l'autre, le parcours oculaire informe sur la façon de

construire le sens, il a été caractérisé par les informations suivantes (Caelen *et al.*, 2003):

- Un aspect temporel : le temps caractérise la durée de fixation dans chaque zone et le temps global de lecture de la page. Un temps très long indique une difficulté de construire le sens;
- Un aspect spatial : la taille de l'empan perceptif et la localisation des points de fixation. Un empan de taille réduite indique une difficulté de construire le sens;
- Un aspect stratégique : le nombre des fixations et les retours arrière. Un nombre important de retours indique une difficulté de construire le sens.

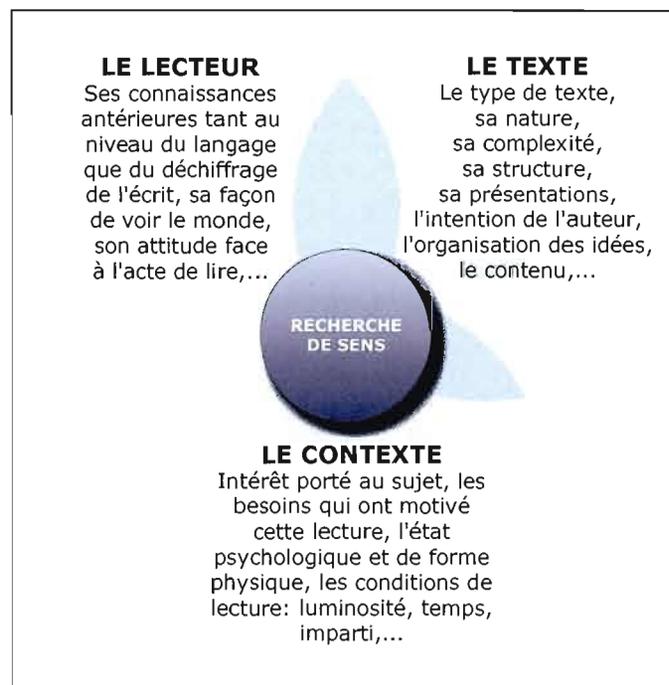


Figure 4.9 Schéma du modèle de compréhension de la lecture (Giasson, 1990)

La difficulté de construction du sens peut être attribuée au document lui-même : il peut présenter des ambiguïtés ou des incohérences. L'oculomètre permet en tout instant de mesurer le diamètre de la pupille. La variation du diamètre est influencée

par système nerveux, il s'agit d'un réflexe que nous ne contrôlons pas. Cette mesure peut servir pour évaluer la difficulté de la tâche. En effet, des chercheurs ont constaté qu'elle est fortement corrélée à la difficulté de la tâche, autrement dit, plus la tâche est complexe plus le diamètre de la pupille augmente (Barrier, 2008).

Lors de la lecture d'un document, les yeux identifient des symboles qui seront déchiffrés en fouillant dans la mémoire et auxquels sera attribué un sens. La lecture exige la compétence de reconnaissance des mots dans des laps de temps assez courts, même si les caractères utilisés varient, même s'il existe des fautes d'orthographe. La lecture permet d'identifier les mots et de les rassembler pour construire un sens et le comprendre. La compréhension du texte fait intervenir les 3 facteurs suivants (Giasson, 1997) (figure 4.9) :

- Le lecteur : ses connaissances antérieures, son attitude...
- Le texte : son type, sa complexité...
- Le contexte : motivation, état psychologique...

Lors de la réalisation d'une activité d'apprentissage, notamment dans notre environnement, plusieurs zones du cerveau entrent en activité. L'attention de l'apprenant est engagée en fonction de la motivation, de l'intérêt et de la complexité de la tâche. L'attention joue un rôle fondamental lors d'une activité d'apprentissage, des études menées par Knudsen (Knudsen, 2007) ont montré les rôles suivants de l'attention :

- Elle permet de mémoriser les informations pertinentes en mémoire;
- Elle analyse et évalue les informations à garder dans la mémoire de travail;
- Elle permet de choisir de nouvelles informations à partir de la mémoire de travail et d'alimenter l'attention de manière récurrente;
- Filtre les informations.

Knudsen a proposé un modèle de l'attention inspiré des travaux de Desimone et Duncan (Desimone & Duncan, 1995) comme présenté dans la figure 4.10. On note

que le regard est lié à la mémoire de travail et qu'il est contrôlé par un mécanisme complexe.

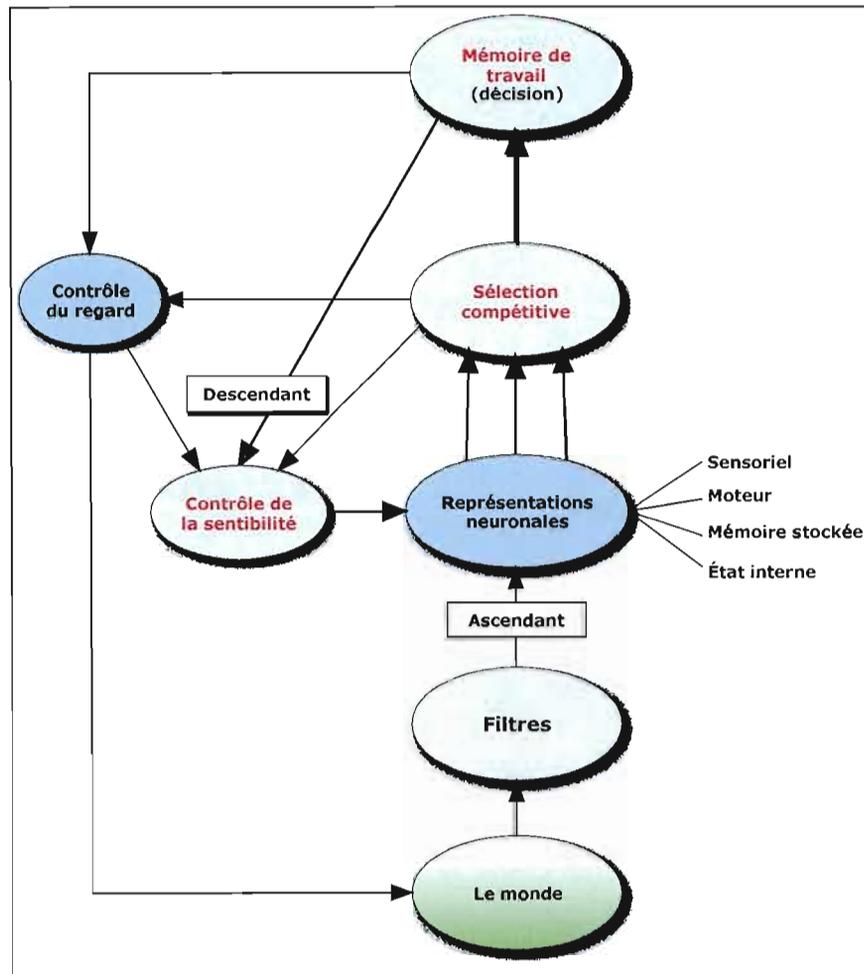


Figure 4.10 Les composantes fonctionnelles de l'attention (Knudsen, 2007).

Les informations issues du monde sont filtrées et ensuite codées pour créer une représentation du monde. Des processus concurrentiels sélectionnent les représentations ayant les signaux les plus forts qui vont atteindre la mémoire de travail. Le regard est contrôlé pour aller chercher d'autres informations du monde extérieur et ceci après la sélection concurrentielle et le traitement de la mémoire de travail. « *When attention to a particular location is desired, the observer prepares to*

make an eye movement to that location; the oculomotor readiness, via as yet unknown feed forward pathways, has the effect of enhancing processing in or from sensory pathways dealing with information from the target location » (Klein & Pontefract, 1994).

L'attention est une fonction cérébrale intimement liée au regard, elle permet de percevoir le mode d'acquérir des informations qui pourront contrôler nos comportements psychologiques et moteurs. L'attention est une fonction cognitive assez complexe, elle est un élément clé dans le processus de traitement et de recherche de l'information. L'attention peut exécuter des tâches de reconnaissance, de poursuite et de transition d'un objet à un autre. La définition classique de l'attention est certes celle donnée par le fondateur de la psychologie américaine « L'attention est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles [...] Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres. » (James, 1890).

Les travaux menés par Yarbus (Yarbus, 1967) pour étudier le comportement d'un apprenant face à une image ont conclu que l'exploration d'une image dépend de la tâche demandée d'où l'existence d'une forte relation entre la tâche demandée et les fixations. Il a utilisé un oculomètre pour enregistrer le regard de différentes personnes à qui il a présenté la même image¹⁸ et a demandé différentes tâches à réaliser. L'image n'était pas regardée de la même façon quand on change de question, il a déduit que chaque tâche engendre un chemin oculaire différent. La figure 4.11 montre l'exemple très populaire de Yarbus, les chemins oculaires ont été obtenus en fonctions des questions suivantes :

- Exploration libre;
- Estimation de la richesse familiale;

¹⁸ Il s'agit du tableau : *The Unexpected Visitor*. Oil on canvas painting by Ilya Repin, 1884–88.

- Dédurre ce que la famille faisait avant l'arrivée du visiteur;
- Rappeler les habits;
- Rappeler la position des personnes et objets;
- Estimer la durée d'absence du visiteur.

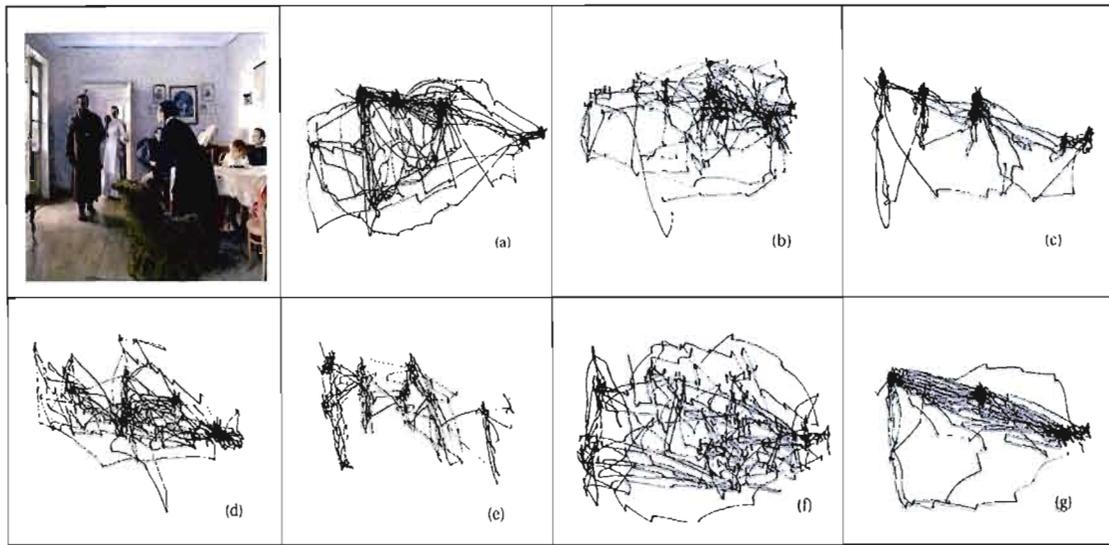


Figure 4.11 Chemin oculaire en fonction de l'objectif recherché.

La première tâche étant de faire une exploration libre de l'image, l'œil reçoit les informations visuelles et les envoie au centre de la vision (lobe occipital), elles sont analysées et séparées dans le lobe pariétal, analysées par le lobe frontal et les informations pertinentes seront stockées dans la mémoire à long terme.

La deuxième tâche est d'identifier le statut social des figurants. Dans ce cas, cette tâche précise est traitée par le lobe frontal qui cherche les informations lui permettant de résoudre cette tâche. Un modèle mental sera créé en mémoire de travail qui contient les éléments déjà identifiés (exemple : les meubles, les vêtements...). Le lobe frontal va commander l'œil d'aller chercher les informations identifiées. L'œil renvoie les informations regardées au centre visuel qui passent par la suite par le lobe pariétal. Une fois analysées par le lobe frontal, ces informations seront comparées au

modèle mental. L'œil et le cerveau vont travailler en couple pour résoudre la tâche. Les chemins oculaires entre la résolution des deux tâches sont très différents.

Notre recherche est plus complexe, il ne s'agissait pas juste d'étudier le regard d'objets ou d'images fixes, mais d'étudier les interactions des apprenants lors de l'apprentissage et de la résolution des problèmes dans le but d'apprendre.

4.2 Les mesures physiologiques

Il est ainsi facile de savoir avec précision ce que l'apprenant regarde dans son écran grâce à l'oculomètre. Nous avons complété notre recherche par l'identification de ce que l'apprenant est en train de ressentir quand il regarde un endroit déterminé dans son écran. Dans notre recherche, nous avons identifié des situations provoquant des difficultés d'apprentissage et nous avons développé un système d'aide interactif qui tient compte des émotions de l'apprenant.

Lors des interactions avec l'ordinateur, l'apprenant peut exprimer des émotions en fonction de l'activité en cours. Ces émotions peuvent être liées au contenu des documents électroniques qu'il est en train d'explorer. Dans le but d'identifier certaines émotions, nous avons utilisé des capteurs physiologiques pour être informés en tout temps sur l'état émotionnel de l'apprenant.

Les mesures physiologiques nous permettent de connaître les réponses physiologiques de l'apprenant. On peut mesurer les changements de la température, de la respiration, de la pression sanguine, de la conductance de la peau, etc.

4.2.1 Le stress

Le stress peut nous affecter tout le monde de différentes manières, il fait partie de nous. Il y a plusieurs origines du stress qui ne sont pas maîtrisables. Ses degrés d'intensité sont très variables, ça peut influencer l'état physique, comportemental et cognitif de l'individu. Il peut affecter les réactions primitives et le développement de dysfonctionnement ou même provoquer des troubles corporels. On ne peut pas

l'éliminer, mais on peut le comprendre pour bien le gérer. Il est aussi possible de convertir le stress en actions positives : un travailleur stressé peut penser que son dur travail va porter fruit et lui permettre d'évoluer dans sa carrière et par la suite atteindre une situation plus aisée (Mardaga, 2009). De cette manière, le stress va apporter de l'énergie et de la motivation à l'employé pour performer et accepter sa situation. Les gens qui nous entourent peuvent être aussi une source de stress, la communication difficile et la non-compréhension de l'autre peuvent créer une tension et faire plonger l'individu dans un univers invivable. La recherche d'excuses et la compréhension de l'autre peuvent transformer cette situation en une force positive qui va améliorer la coexistence. D'autres actions physiques comme le sport ou la relaxation peuvent diminuer le stress.

4.2.2 L'activité électrodermale

La conductance de la peau a été étudiée par Vigouroux en 1878 (Neumann & Blanton, 1970) qui découvre une relation entre des manifestations psychopathologiques et la variation de la résistance de la peau. Tarchanoff (Tarchanoff, 1889) était l'un des premiers à enregistrer chez l'être humain cette propriété de la peau et postule que la conductivité de la peau résulte de l'activité des glandes sudoripares qui sécrètent une substance ionique qui favorise le passage de l'électricité. Cette activité de la peau a été associée aux émotions plus tard (Boucsein, 1999). L'activité électrodermale reflète le niveau d'activation sympathique qui est un indicateur de l'éveil et du stress (Critchley, 2002).

La figure 4.12 montre les différents paramètres :

- Amplitude : c'est l'amplitude de la réponse au stimulus. Elle représente la différence entre le niveau de base et le maximum atteint après le stimulus;
- Temps de récupération : « *half-recovery time* » est le temps nécessaire pour que l'amplitude de la réponse diminue de la moitié;
- Pic de la réponse : est le temps associé à l'amplitude maximale.

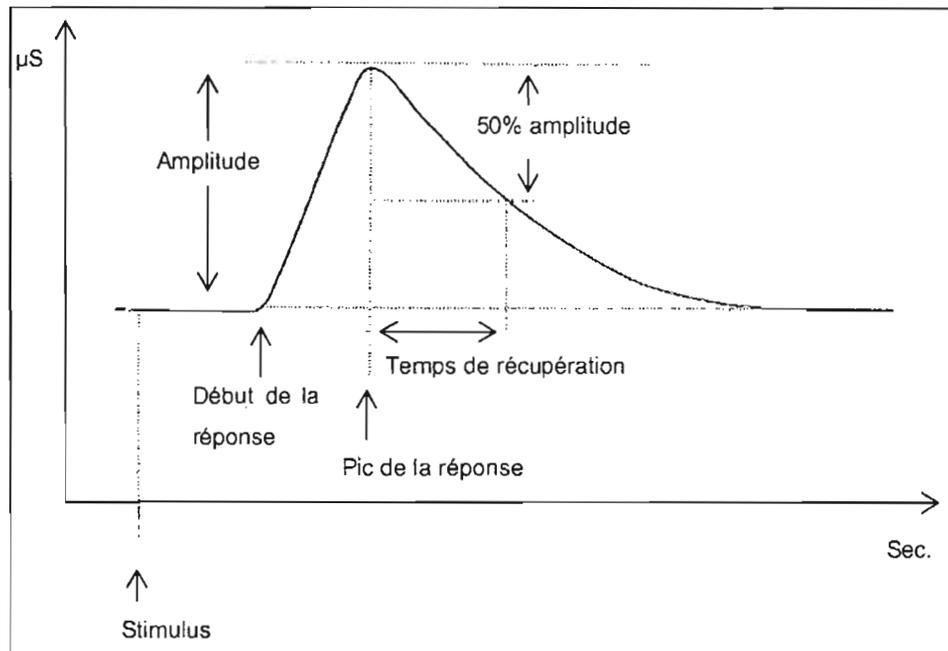


Figure 4.12 La réponse électrodermale et ses paramètres (Mardaga, 2009)

La peau étant un conducteur de l'électricité, il est possible de mesurer cette capacité conductrice en faisant circuler un faible courant électrique entre deux points (deux doigts d'une même main). Plus on transpire, plus le corps sécrète une substance aqueuse provoquant une meilleure circulation du courant électrique. Il est possible d'enregistrer de faibles transpirations grâce aux équipements dont on dispose. L'application d'un stimulus provoque une réponse qui n'est pas instantanée, il existe un temps de latence pouvant aller de 2 à 3 secondes entre le stimulus et la réponse. Il existe des personnes qui sont plus réactives que d'autres.

4.2.3 Les capteurs physiologiques

Ils sont des dispositifs qui nous fournissent des informations sur l'état physiologique d'un individu et peuvent mener à identifier des émotions humaines. Un bon exemple qui démontre l'intérêt à concevoir des machines qui peuvent identifier

les émotions humaines est sans doute le détecteur de mensonges. Il suppose que le mensonge provoque une réaction émotionnelle chez l'individu, ce qui peut se manifester par une transpiration cutanée, facilement mesurable (Aubergé, 2002).

Il existe plusieurs capteurs physiologiques pour capter des mesures comme la respiration, la température, le rythme cardiaque, la conductance de la peau, etc. Parmi ces différents capteurs, on a utilisé le capteur de la conductivité cutanée. Il permet de mesurer la capacité de la peau à conduire un courant de très faible intensité. Lorsque l'état émotif d'un sujet change, la conductance de la peau change. Cette mesure nous informe sur le niveau de stress de l'apprenant, elle est appelée RPG (réponse psychogalvanique) ou *GSR (Galvanic Skin Response)* ou réponse galvanique de la peau. La peau est un bon conducteur de courant électrique, ses propriétés électriques changent en fonction de l'état émotif lors des interactions avec l'environnement. Un état émotionnel peut causer une transpiration qui est une réaction électrodermale. La sécrétion de la sueur est faite dans le but de contrôler la température cutanée. Ce liquide est une solution aqueuse contenant des ions minéraux. La peau est un bon conducteur de l'électricité, il est possible de faire circuler un courant de faible intensité entre deux doigts de la main et de mesurer la résistance ou réciproquement la conductance. Les capteurs physiologiques peuvent mesurer la capacité de la peau à faire circuler un courant électrique, plus la sécrétion est importante, plus le courant est plus intense, donc plus la mesure de la RPG est élevée. Ceci est conforme à la loi d'Ohm qui stipule que la tension électrique en deux points est donnée par la relation $U=RI$ ou U est la tension du courant en volts, R la résistance de la peau et I l'intensité du courant.

Il est à signaler que le courant circulant entre les deux électrodes est d'une intensité très faible et ne peut être senti, il existe un mécanisme d'amplification qui permet de détecter les faibles signaux électriques. La mesure de la RPG est exprimée

en micro Siemens¹⁹ (μS). Cette mesure dépend de la nature de la peau, donc elle varie en fonction de chaque personne. La valeur absolue de la conductance de la peau n'est pas significative, il faut étudier les variations de cette variable ce qui nous indique que la valeur du stress augmente ou diminue.

Il existe deux types de conductance de la peau (Blondin, Freixa i Baqué, Bergeron, & Roy, 1990):

- La conductance tonique : il s'agit du niveau de base. C'est la valeur de la conductance de la peau dans un état naturel en l'absence de toute excitation ou influence environnementale (état neutre). Cette valeur est propre à chaque individu, et comme on l'a vérifié expérimentalement, elle varie énormément d'une personne à l'autre;
- La conductance phasique : c'est la mesure de la RPG lors des réactions à différents stimuli, cette valeur ne change pas de la même façon chez les individus. Son amplitude, le temps de latence et le retour à la conductance tonique dépendent de chaque personne. Il existe un temps de latence entre l'apparition d'un stimulus et le changement de la conductance de la peau. Ce délai n'est pas le même pour tous, certaines personnes sont plus réactives que d'autres.

L'amplitude de la RPG n'est pas très significative, ce qui est intéressant c'est sa variation, donc c'est la différence entre la conductance phasique et la conductance tonique.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la méthodologie adoptée pour notre recherche. Nous détaillons les objectifs visés ainsi que la démarche pour la mise en place du cadre expérimental. Nous décrivons également l'environnement d'apprentissage adopté et le recueil des données.

¹⁹ Un siemens correspond à la conductance électrique d'un conducteur ayant une résistance électrique d'un ohm.

CHAPITRE V

MÉTHODOLOGIE

5.1 Introduction

Pour aider les apprenants à comprendre l'effet photoélectrique, qui est présenté sous forme de laboratoire en science physique, nous avons développé un environnement informatisé d'apprentissage humain qui offre à l'apprenant la possibilité de s'engager dans un apprentissage constructiviste en utilisant la simulation assistée par ordinateur.

Le cours est composé de deux parties. La première partie présente des notions théoriques et introduit l'effet photoélectrique et le processus de la mise en évidence de ce phénomène. À la fin de cette partie, une vue globale du fonctionnement du simulateur Phet est présentée. La deuxième partie est une série de manipulations et de questions, dans laquelle l'apprenant tente de répondre aux questions en fonction de ses connaissances antérieures. Une aide textuelle est présentée s'il ne trouve pas la bonne réponse. Cette aide vise à donner des astuces à l'apprenant pour l'inciter à chercher et à découvrir la bonne réponse. En cas d'erreur ou en tout temps, l'apprenant peut faire appel au simulateur Phet pour modéliser la situation problème afin d'essayer une (nouvelle) réponse.

5.2 Objectifs spécifiques de l'analyse des données

Dans cette recherche, nous allons observer le comportement d'un apprenant qui est assisté par un professeur dans le cadre d'un cours en sciences physiques. Durant cet apprentissage, les interactions de l'apprenant avec l'environnement d'apprentissage sont enregistrées. Nous enregistrons également toutes ses communications avec le professeur. Étant donné l'éloignement entre l'apprenant et le professeur, ce dernier fournit le support nécessaire comme si le cours se passait dans une classe. Les traces d'utilisation seront analysées dans le but de comprendre l'état de l'apprenant et d'estimer son besoin d'aide. Nous allons analyser les données dans le but de trouver des corrélations ou des liens de causalité. Dans le but d'alléger des données à analyser, nous n'allons pas analyser les données issues de la souris. D'une part, nous essayons de dégager des explications de certains comportements de l'apprenant et de les rattacher aux différentes mesures enregistrées. D'autre part, nous essayons de comprendre et de justifier les interventions du tuteur en cherchant des indicateurs à partir des données. Pour cela, nous allons fixer des objectifs spécifiques et les vérifier par une analyse statistique dans le chapitre VI.

Nous allons observer l'apprenant durant les différentes étapes de sa progression dans son apprentissage. Il en ressort cinq situations différentes et pour chacune, nous proposons d'émettre des objectifs spécifiques. Les variables à étudier sont : le niveau de stress, les durées du regard et le diamètre de la pupille. À partir de ces variables, nous allons chercher les causes probables qui ont laissé le professeur intervenir pour fournir de l'aide. La figure 5.1 nous donne un aperçu des situations à étudier :



Figure 5.1 Les situations visées par l'étude

1. **Objectif 1** : Étude du comportement des apprenants lors de la lecture de la théorie : la lecture se fait au rythme de chaque apprenant. Le système propose une série de pages ordonnées. L'apprenant peut adopter l'ordre proposé ou d'aller directement vers la page désirée. Chaque apprenant regarde les pages à sa façon et durant la période qu'il désire. Nous allons étudier dans cette partie les points suivants :

- 1.1. Analyse de la variation de l'état de stress.
- 1.2. Analyse de la variation de la dilatation de la pupille.
- 1.3. Recherche si la durée de lecture de la théorie influence le nombre de tentatives aboutissant à la bonne solution du problème.

1.4. Recherche de lien entre la durée de lecture de la théorie et le nombre de fois d'aides reçues.

2. **Objectif 2** : Étude du comportement des apprenants lors de la résolution des problèmes : Chaque apprenant résout les problèmes qui lui sont posés en adoptant ses propres stratégies. Les ressources disponibles lors de la résolution d'un problème sont : le cours théorique, la simulation et l'aide du tuteur. Les quatre solutions proposées ne comportent qu'une seule solution qui est valide (figure 5.2).

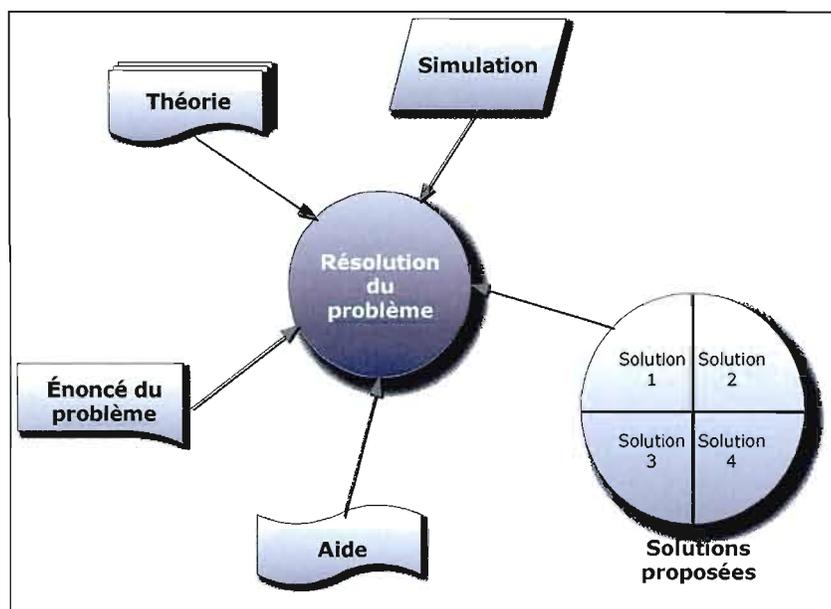


Figure 5.2 Ressources disponibles pour la résolution de problèmes.

À partir des traces recueillies, nous allons chercher l'existence des liens suivants :

- 2.1. Recherche de lien entre le temps passé à lire l'énoncé et le nombre de tentatives pour résoudre le problème.
- 2.2. Recherche de lien entre le temps passé à lire les choix de solutions et le nombre de tentatives.

- 2.3. Recherche de lien entre le temps cumulé passé à lire la théorie et le nombre de tentatives.
 - 2.4. Recherche de lien entre le temps cumulé passé à utiliser le simulateur et le nombre de tentatives.
 - 2.5. Recherche de lien entre la variation de la RPG et le nombre de tentatives.
 - 2.6. Recherche de lien entre le temps passé à lire chaque choix de solution et le choix sélectionné.
3. **Objectif 3** : Le déclenchement de l'aide : dans cette partie nous essayons de trouver les causes probables des interventions du tuteur humain pour fournir de l'aide d'une façon générale. Nous essayons de lier ces interventions à la variation de la RPG, de la dilation de la pupille, au temps de lecture ou nombre de tentatives. Une analyse plus fine sera faite sur l'aide du tuteur qui sera codifiée et analysée par type. Pour cet objectif, nous allons chercher l'existence des liens suivants :
- 3.1. Chercher l'influence de l'aide sur le niveau de la RPG.
 - 3.2. Chercher l'influence du nombre de fois d'aides sur le niveau de la RPG.
 - 3.3. Chercher si l'aide a été fournie en fonction de la variation du diamètre de la pupille.
 - 3.4. Chercher un lien entre le nombre de fois d'aides et la variation du diamètre de la pupille
 - 3.5. Chercher si l'aide a été fournie en fonction du temps passé à lire l'énoncé.
 - 3.6. Chercher si l'aide a été fournie en fonction du temps passé à lire les choix de solutions.
 - 3.7. Chercher si l'aide a été fournie en fonction du nombre de tentatives
 - 3.8. Analyse par type d'aide

4. **Objectif 4** : L'attitude de l'apprenant face à l'erreur : pour cet objectif, nous visons à identifier des indicateurs pouvant renseigner sur l'état de l'apprenant et des actions entreprises pour poursuivre son apprentissage.
5. **Objectif 5** : Réaction à l'aide proposée, nous essayons d'analyser le comportement de l'apprenant quand il reçoit de l'aide. Nous visons à étudier les cas suivants :
 - 5.1. Chercher si les apprenants lisent suffisamment le texte d'aide affiché.
 - 5.2. Chercher si la lecture d'aide favorise la réussite dans la tentative suivante.

5.3 Dispositif expérimental

Dans cette section, nous allons décrire l'environnement physique d'apprentissage qui a été adopté pour mener nos expérimentations. Nous avons placé l'apprenant et le professeur dans deux salles différentes. L'apprenant ne voyait pas le professeur, mais pouvait dialoguer avec lui quand il le veut. De l'autre côté, le professeur ne voyait non plus l'apprenant, mais voyait une copie de son écran et pouvait également lui parler en tout moment. Les deux salles sont reliées par un réseau local qui permet l'échange et la transmission des données et de la voix.

Dans la salle de l'apprenant, nous avons placé un oculomètre (Tobii X120)²⁰ en dessous de son écran pour le suivi oculaire. Nous avons utilisé les équipements de Biograph²¹ pour installer le capteur de la conductance de la peau. Une fois l'apprenant installé devant son ordinateur, on procède à l'installation du capteur physiologique et à la vérification de son bon fonctionnement grâce au logiciel qui le pilote. Un calibrage de l'oculomètre est également effectué via le logiciel Tobii

²⁰ Le matériel provient de la compagnie Tobii Technology AB, site web : <http://www.tobii.com/>

²¹ Le matériel utilisé provient de la compagnie Thought Technology Ltd. Le système utilisé est appelé BioGraph Infiniti. Site web : <http://www.thoughttechnology.com/>

Studio ainsi qu'un test pour s'assurer de la bonne prise en charge des coordonnées des yeux.

Une fois la vérification des équipements faite, l'environnement d'apprentissage PhetHI est lancé sur les postes du professeur et de l'apprenant. L'état de la transmission des données entre les deux ordinateurs est vérifié pour s'assurer qu'elle se fait convenablement. Un schéma du dispositif expérimental est présenté dans la figure 5.3.

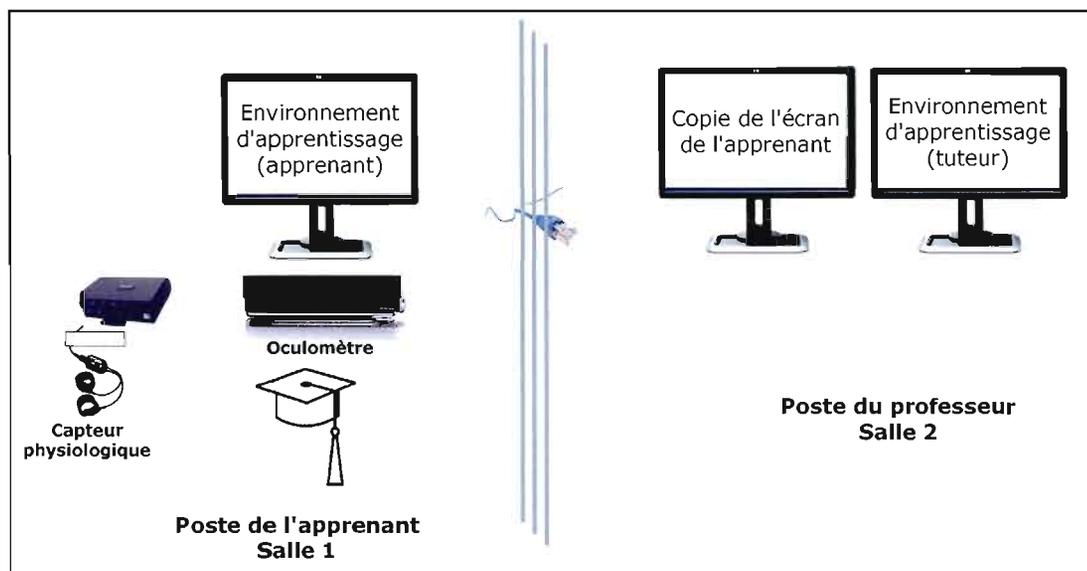


Figure 5.3 Dispositif expérimental

5.4 Sélection des candidats

Parmi onze candidats qui se sont portés volontaires, nous en avons retenu six. Un questionnaire pré-expérimentation nous a permis de confirmer le profil des différents sujets et d'évaluer leur niveau d'expertise initial. Les candidats ont été sélectionnés de manière à avoir des profils homogènes en ce qui concerne :

- Le niveau de scolarité : les candidats sont à leur dernière année du CÉGEP. Ils ont suivi les mêmes cours. Le cours sur l'effet photoélectrique classique a été

suivi par tous les candidats. Le niveau d'études équivalent nous a garanti une homogénéité des compétences des candidats;

- L'âge et le sexe : les candidats sont dans la tranche d'âge de 18 à 20 ans. Il n'y avait aucune restriction sur le sexe. Dans le but de nous assurer d'avoir un échantillon représentatif de la population étudiante, nous avons essayé d'équilibrer le nombre de candidats masculins et féminins. Il n'y a aucun traitement qui est lié au sexe;
- La familiarisation avec les ordinateurs : les candidats sélectionnés étaient très à l'aise avec l'utilisation des ordinateurs et des logiciels des traitements de textes, des chiffriers, des navigateurs Internet et des jeux vidéos et les utilisent d'une manière assez fréquente. Nous nous sommes assuré que les interactions avec notre environnement ne soient pas influencées par des faiblesses au niveau de la familiarité avec l'informatique;
- L'acceptation du certificat d'éthique : Durant toutes les expérimentations, nous avons enregistré les candidats (visage, voix, mouvement des yeux et déplacements de la souris). Les candidats ont approuvé et signé le formulaire de consentement présenté en Appendice A. Toutes les informations personnelles étaient confidentielles, et ne figuraient nulle part dans les données collectées et il est impossible d'identifier un candidat à partir des données ou des résultats.

5.5 Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée en trois phases : la présentation, l'expérimentation proprement dite et le questionnaire post-expérimental.

5.5.1 Phase 1 : Présentation

Après l'accueil du candidat, nous avons présenté verbalement l'objectif et les modalités de déroulement de l'expérience ainsi que le rôle qu'il va jouer. Nous avons

expliqué le processus de collecte des données et les fonctions des différents dispositifs. Nous lui avons remis le document du formulaire de consentement pour lecture et approbation. Nous avons aussi fait une description sommaire de notre environnement d'apprentissage : présentation de l'interface et des différentes fonctions ou commandes dans le but de lui montrer les manipulations de base. Le sujet est informé de la présence d'un tuteur humain dans une autre salle et de différents moyens mis à sa disposition pour communiquer avec lui.

5.5.2 Phase 2 : Expérimentation

L'expérimentation dure environ 45 minutes, elle inclut la lecture de la partie théorique, l'utilisation du simulateur et la résolution des problèmes invoqués par les questions à choix multiples. Durant l'interaction, les informations sur le regard, la mesure de la RPG, les mouvements de la souris et les interactions avec le tuteur humain sont collectées.

Étape 1 : préparation

Une première étape consiste à présenter les équipements à utiliser :

- L'oculomètre Tobii : un calibrage est nécessaire avec chaque candidat. Il permet de suivre le regard de chaque candidat. Cette étape peut être refaite plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'un bon résultat au test de reconnaissance du regard par l'oculomètre. Le calibrage dure environ 3 minutes. La lumière infrarouge est projetée sur les yeux du candidat, le reflet est intercepté par une caméra qui, grâce à un algorithme, calcule la position du regard sur l'écran. Pour des fins de calibration, le candidat doit regarder une série de neuf points un à un : l'orientation de l'œil est acquise pour chaque point et la correspondance entre le point regardé et l'orientation de l'œil est calculé;
- Le capteur physiologique : le capteur de la RPG est placé sur la main la moins dominante par le candidat (main gauche pour les droitiers sinon main droite). Il est en contact avec la peau, la pression doit être suffisante pour assurer le

contact et ne doit pas être excessive pour exercer une forte pression pouvant altérer la circulation sanguine. La figure 5.4 illustre l'installation de ce capteur.



Figure 5.4 Installation du capteur de la conductance de la peau

Étape 2 : démarrage

Une fois que les équipements sont en place, que les logiciels qui leur sont associés fonctionnent bien et que le candidat est prêt, l'environnement d'apprentissage est lancé (exécuté). L'écran est divisé en quatre blocs :

1. Théorie, Simulateur, Choix de solutions : cette partie est réservée en alternance à l'affichage de la partie théorique du cours, à l'affichage du simulateur ou bien aux quatre choix de solutions associées à la question en cours. La sélection est faite en fonction du contexte : au début, c'est la partie théorique qui est activée, si une question nécessite la manipulation du simulateur, ce dernier est activé. Le candidat peut activer l'un de ses éléments par l'appui sur le bouton de commande associé;
2. Énoncé : c'est la partie réservée à l'affichage de l'énoncé d'un problème;
3. Menu des questions : c'est une liste de questions et de problèmes à résoudre;
4. Commandes : il s'agit de plusieurs boutons de commande qui indiquent les fonctions disponibles pouvant être exécutées à la demande de l'apprenant :

afficher la théorie, lancer le simulateur, passer à la question suivante, mettre fin à l'application, etc.

Étape 3 : manipulations

Durant cette étape, les commandes sont passées au candidat qui agit de façon autonome et naturelle. Il commence par la lecture de la partie théorique qui introduit le cadre global et présente graduellement les connaissances liées au cours. Cette étape dure environ 7 minutes pour la lecture d'une douzaine de diapositives. La lecture du cours est suivie par la présentation des différents problèmes à résoudre. On notifie le candidat qu'il doit répondre au meilleur de ses connaissances et de sa logique et que l'objectif est de le guider dans son apprentissage. On l'incite aussi à demander l'aide du tuteur en tout moment. Le candidat est filmé, les données sont enregistrées ainsi que les communications verbales avec le tuteur. Cette étape dure environ 25 minutes.

5.5.3 Phase 3 : Questionnaire post-expérimentation

Nous avons effectué un entretien avec chaque sujet juste après la fin de l'expérimentation pour connaître ses impressions sur l'environnement et sur l'aide apportée par le tuteur. Cette étape dure environ 5 minutes. Le questionnaire est présenté en Appendice C. Ce questionnaire d'auto-évaluation comporte une série de questions. Le candidat choisissait une valeur entre 1 et 5 pour exprimer son accord. Nous avons utilisé l'échelle de Likert²² suivante : 1 : Pas du tout d'accord, 2 : Pas d'accord, 3 : Ni en désaccord ni d'accord, 4 : D'accord, 5 : Tout à fait d'accord.

Le nombre limité de réponses a facilité le traitement des réponses et a permis de mieux les catégoriser. Ce questionnaire nous a permis d'évaluer des caractéristiques

²² Selon la définition de <http://fr.wikipedia.org> : « Une échelle de Likert (du nom du psychologue américain Rensis Likert) est une échelle de mesure répandue dans les questionnaires psychométriques. La personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation (l'énoncé)... L'échelle de Likert est beaucoup utilisée en psychologie sociale, mais aussi dans l'évaluation de la validité sociale d'une intervention psychologique.»

personnelles des apprenants et de recueillir leurs perceptions sur l'environnement d'apprentissage. Conscient de la subjectivité des réponses, notre but était surtout de comprendre comment les apprenants appréciaient notre environnement d'apprentissage et déterminer s'ils ont pu acquérir de nouvelles connaissances grâce à cet outil.

5.6 Description de l'environnement d'apprentissage

L'utilisation de l'environnement d'apprentissage vise non seulement de faire acquérir des connaissances sur un phénomène physique, mais aussi des compétences dans ce domaine. L'apprenant devra être capable d'interagir avec l'environnement et d'apprendre par l'action pour construire ses propres connaissances. Pour mieux illustrer le contenu de notre environnement, nous avons utilisé un simulateur de l'effet photoélectrique pour émerger les apprenants dans des situations réalistes en leur permettant d'essayer, de répéter et de prendre l'initiative pour comprendre et résoudre des problèmes. La simulation permet de renforcer la relation entre l'apprenant et la compétence à acquérir.

L'environnement tente d'offrir, comme certains STI²³, une approche constructiviste pour l'apprentissage en laissant l'apprenant interagir avec l'environnement pour construire ses connaissances et pour favoriser son savoir-faire (Bruner, 1960; Piaget, 1976; Vygotsky et al., 1978). L'apprenant est doté d'instruments physiques, et devient capable d'interagir avec l'environnement et de s'entraîner à utiliser les connaissances. L'environnement est doté d'un ensemble de modules spécifiques qui permettent de recueillir les informations pertinentes sur l'étudiant. Il intègre les principaux modules suivants :

- *PhetHiMaster* : c'est le module principal qui va centraliser les informations issues des autres modules et décider selon sa base de règles des actions à

²³ Système tutoriel intelligent

engager. Il envoie des instructions aux autres modules qui devront exécuter ses actions;

- *PhetHiEye* : c'est un module associé au suivi du regard. Il se charge d'intercepter les informations brutes provenant de l'oculomètre, de les codifier et de les envoyer au module principal PhetHiMaster. Il fonctionne d'une manière autonome. Le fonctionnement de ce module est détaillé dans la section 5.6.1;
- *PhetHiGSR* : c'est un module associé aux mesures physiologiques. Il se charge d'intercepter les informations brutes provenant des senseurs, de les codifier et de les envoyer au module principal PhetHiMaster. Il fonctionne d'une manière autonome. Le fonctionnement de ce module est détaillé dans la section 5.6.2;
- *PhetHiMouse* : c'est un module associé aux mouvements de la souris. Il se charge d'intercepter les coordonnées de la souris et des évènements (clics) associés, de les codifier et de les envoyer au module principal PhetHiMaster. Il fonctionne d'une manière autonome. Le fonctionnement de ce module est détaillé dans la section 5.6.3;
- *PhetHiSim* : c'est un module qui est associé aux variations des variables du simulateur. Il se charge de communiquer le nom de la variable qui a changé ainsi que sa nouvelle valeur. Les évènements de changement sont codifiés et envoyés au module principal PhetHiMaster. Le fonctionnement de ce module est détaillé dans la section 5.6.4;
- *PhetHiHelp* : c'est un module qui reste à l'écoute de PhetHiMaster en permanence, il reçoit des messages qu'il présente à l'environnement sous forme de texte, parole ou animation. En effet, les messages peuvent être présentés et lus par un ACA²⁴ (ou avatar). Cette fonctionnalité a été

²⁴ Agent Conversationnel Animé

implémentée et mise à la disposition de l'enseignant. Il peut rédiger son message et l'envoyer à l'étudiant;

- *Système de règles d'aide* : Un module de gestion de l'aide qui vérifie les conditions préalables du déclenchement de l'aide et détermine le moment de présenter l'aide;
- *PhetHiDidac* : la conception du cours et des exercices est assurée par ce module qui permet de créer et modifier des éléments du cours et des problèmes à résoudre. Il permet d'enregistrer les cours conçus dans une base de données SQL. PhetHiMaster chargera les parties du cours à partir de cette base de données. Ce module est détaillé dans la section 5.6.4.1;
- *PhetHiClav* : est un module de conversation textuelle (clavardage) entre l'apprenant et le tuteur. Il a été utilisé pour garder une trace textuelle des échanges de messages. Plus de détails sont fournis dans la section 5.6.4.2;
- *PhetHiAct* : c'est un module qui se charge d'enregistrer des traces des boutons de commande cliqués et les touches tapées au clavier. Nous avons aussi enregistré le numéro de la page en cours et le numéro du problème courant pour pouvoir lier déterminer le contexte utilisé.

Notre environnement d'apprentissage intègre aussi deux modules externes qui sont des applications à part, exécutées à la demande :

- Le simulateur *PhetHiSim* : cette application, initialement indépendante, a été modifiée pour envoyer en temps réel l'état de ses variables et de toute commande interceptable comme les cases à cocher et les variateurs. PhetHiMaster reste à l'écoute de tous les événements envoyés par cette application. Cette application continue à fonctionner normalement si elle n'est pas connectée à notre environnement d'apprentissage;
- Le module de communication vocale : Un système externe de conversation vocale a été utilisé pour assurer un dialogue verbal entre le tuteur et

l'apprenant. Nous avons choisi le système messenger MSN de Microsoft pour sa simplicité.

La figure 5.5 montre l'architecture globale du système.

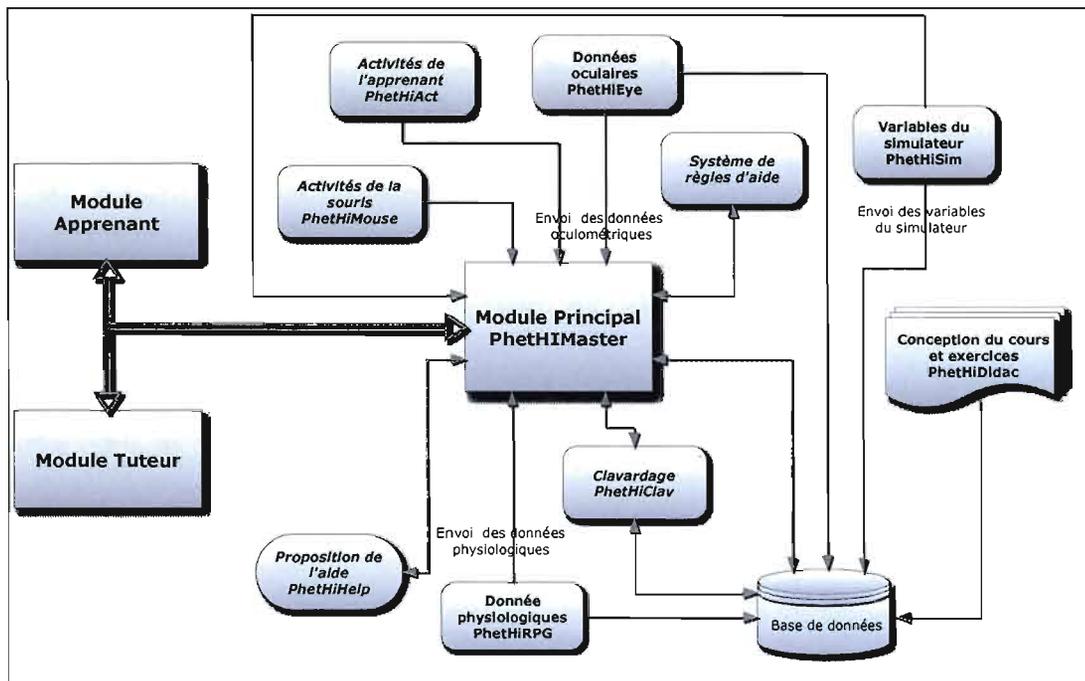


Figure 5.5 Architecture globale du système PhetHI

Au début, une connexion s'établit entre l'application du tuteur et celle de l'apprenant. Le candidat doit s'identifier au moment de sa connexion, la gestion des apprenants se fait grâce à un module fonctionnant chez le tuteur, il est possible d'effectuer des ajouts ou des modifications de la liste des étudiants. La connexion signifie le lancement des composants qui contrôlent les communications entre les deux postes. Puisqu'il peut y avoir un risque de déconnexion entre le tuteur et l'apprenant, nous avons ajouté une fonction de reconnexion pour pouvoir reprendre la séance d'apprentissage au même point d'interruption. Dans notre système, la connexion de l'apprenant se fait automatiquement lors du lancement de son système,

l'application tuteur était toujours à l'écoute des tentatives de connexions. Durant toutes nos expérimentations, il n'y a eu aucune interruption de la connexion.

Le système peut être paramétré pour sélectionner les données à véhiculer et à enregistrer, ceci nous a permis de faire des tests pour chaque type d'information véhiculée de façon isolée avant de faire des tests sur l'ensemble des données. Il était aussi possible de faire des tests sans la présence des candidats en réalisant des simulations du transfert du flux d'informations.

Nous détaillons ci-après le fonctionnement des modules utilisés dans notre environnement d'apprentissage :

5.6.1 La capture des mouvements oculaires

L'oculomètre est connecté au poste du candidat pour suivre son regard. Nous avons réussi à transmettre les coordonnées du regard en temps réel vers le poste de l'enseignant via les sockets de Windows²⁵. Les valeurs reçues sont enregistrées et peuvent être visualisées sur le poste de l'enseignant. Cette fonction a été réalisée avec le système de ASL vu la disponibilité du SDK (*System Development Kit*) et l'accès aux bibliothèques de l'oculomètre. Les fonctions sont interfaçables avec des applications en langage VB (*Visual Basic*). Nous avons pu tester et valider la communication en temps réel entre notre environnement d'apprentissage et l'oculomètre. Ce lien en temps réel est nécessaire pour l'agent artificiel pour avoir le plus d'informations sur les zones et durées des regards. Les données oculaires sont envoyées via les sockets en temps réel sous le format XML²⁶ suivant :

```
<DataEye>
Xcoordinate, Ycoordinate, Pupil, TimeMS
</ DataEye >
```

²⁵ Il s'agit d'une interface au système d'exploitation, initialement Unix, pour supporter les communications entre des ordinateurs en réseaux et les interfaces TCP/IP. Cette interface est connue sous le nom de *Berkeley Sockets Interface* et est à l'origine des Windows Sockets (*WinSock*).

²⁶ Extensible Markup Language

- Xcoordinate : l'abscisse de l'œil
- Ycoordinate : l'ordonnée de l'œil
- Pupil : diamètre de la pupille
- TimeMS : le temps en millisecondes

Lors des expérimentations, nous avons pris 60 positions par seconde qui est la fréquence utilisée par l'oculomètre, d'où la nécessité d'utiliser des fractions de seconde, nous avons travaillé avec le temps en millisecondes.

Malgré les ouvertures proposées par le système de ASL, l'utilisation d'une caméra mécanique (voir figure 5.6) nous a causé des difficultés lors du calibrage ce qui provoquait une perte de temps considérable. Pour nos premières expérimentations réelles, nous avons eu besoin de collecter les informations pour une analyse a posteriori, nous avons opté pour l'utilisation du système Tobii, pour la rapidité de calibration. Le SDK n'était pas disponible et évidemment les fonctions de capture des informations oculométriques ne sont pas les mêmes, car elles sont intimement liées aux équipements matériels.



Figure 5.6 Caméra 504 de ASL

Les coordonnées des points de fixation recueillies sont calculées en fonction de la résolution de l'écran et représentent des points dans cet espace. Pour donner du sens

à ses points, nous avons défini des zones d'intérêts²⁷ en fonction du contexte, en d'autres termes, en fonction de ce qui est affiché à l'écran. Les zones d'intérêts sont des endroits bien identifiées dans notre environnement. Elles ont été utilisées lors de l'analyse du regard : savoir quelle partie de l'écran a été observée et durant combien de temps. Notre environnement est dynamique, le même écran va supporter la superposition de plusieurs fenêtres. Le système fourni avec l'oculomètre ne travaille qu'avec des zones statiques. Pour cela, nous avons développé un module qui permet d'identifier des zones d'intérêts pour chaque situation donnée. En fonction de chaque contexte et de chaque fenêtre affichée, nous avons enregistré une trace référant le contenu de l'écran en cours.

5.6.2 La capture de la conductance de la peau

Le capteur physiologique de la RPG était connecté au poste du candidat et mesurait en permanence son niveau de stress. Nous avons utilisé les bibliothèques qui venaient avec le système pour développer un module qui intercepte en temps réel les valeurs de la RPG de l'apprenant. Ces valeurs ont été transmises à l'application du tuteur et sauvegardées dans la base de données. Nous avons testé et validé la disponibilité de ses informations ainsi que de leur circulation. Une fenêtre indiquait la connexion entre les deux postes et affichait un tableau contenant la valeur de la RPG avec le temps correspondant. Le tableau est alimenté au fur et à mesure de l'arrivée des nouvelles valeurs. Dans le but d'illustrer cette variation, nous avons ajouté une barre avec des couleurs variant du vert, qui est la valeur la plus faible, au rouge, qui est la valeur la plus élevée (figure 5.7).

²⁷ Le terme AOI (*Area Of Interest*) est souvent utilisé.

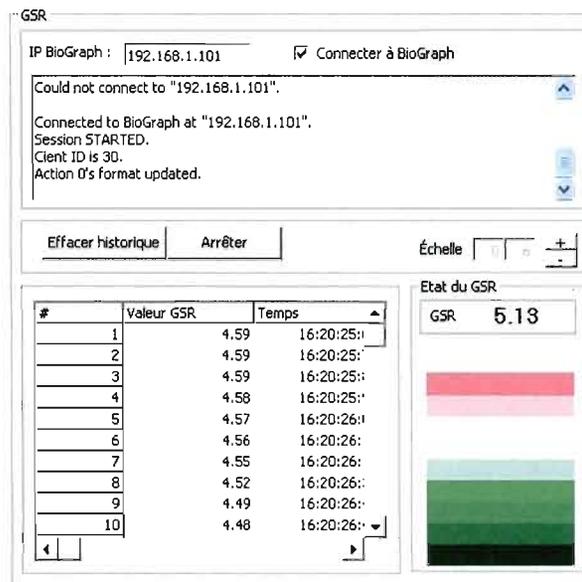


Figure 5.7 Interface de capture de la RPG en temps réel.

Le système de mesure de la conductance de la peau est activé tout au long de l'expérience. Il prend jusqu'à 256 mesures par seconde. Nous nous sommes contentés de 32 mesures par seconde, les valeurs de la RPG ne varient pas brusquement, et sont très proches de valeurs continues. Les valeurs sont transmises avec le temps de la mesure en millisecondes. Les données physiologiques sont envoyées via les sockets en temps réel sous le format XML suivant :

```
<DataGSR>
```

```
Value, TimeMS
```

```
</DataGSR>
```

- Value : la valeur numérique de la conductance de la peau
- TimeMS : le temps en millisecondes

5.6.3 La capture des mouvements de la souris

Un module de capture des mouvements de la souris est activé dès le lancement de l'environnement d'apprentissage. Il intercepte les coordonnées de la souris dans l'écran de l'apprenant et les transmet au système tuteur.

Les coordonnées de la souris sont envoyées via les sockets en temps réel sous le format XML suivant :

```
<DataMouse>
```

```
ActionType, Xcoordinate, Ycoordinate, TimeMS
```

```
</DataMouse>
```

- ActionType : est le type d'action de la souris, nous avons retenu :
 - Appuie sur le bouton droit
 - Relâcher le bouton droit
 - Appuie sur le bouton gauche
 - Relâcher le bouton gauche
 - Appuie sur le bouton milieu
 - Relâcher le bouton milieu
 - Bouger la souris
- Xcoordinate : l'abscisse de la souris
- Ycoordinate : l'ordonnée de la souris
- TimeMS : le temps en millisecondes

Nous avons intégré un module qui intercepte la position de la souris ainsi que les clics et qui l'envoie instantanément au tuteur. Ce module opérant sur le poste de l'apprenant et complètement invisible est capable de détecter toute action de la souris et de la transmettre même si une application externe (le simulateur) est en cours d'exécution. Pour les expérimentations, l'enseignant disposait d'une copie de l'écran du candidat en temps réel. Il pouvait voir le pointeur de la souris ainsi que les

résultats des manipulations du candidat. Ce mode de partage d'écran risque de ne pas afficher la position réelle de la souris si elle est déplacée rapidement ou si le réseau est trop chargé. La fonction de transmission de la position de la souris pourrait être exploitée par le tuteur artificiel dans le but d'identifier ce qui est pointé par la souris ou pour positionner sa souris dans un endroit spécifié. La position de la souris est envoyée 20 fois par seconde, ce choix est fixé empiriquement et ne cause pas de problèmes aux autres flux de données échangés entre le poste du candidat et celui de l'enseignant. L'information transmise est analysée par le système tuteur. Toutes les données sont enregistrées dans la base de données. Ce module enregistre l'historique des mouvements de la souris et peut rejouer les mêmes actions que l'apprenant a faites. Ceci est très utile pour réviser des séquences exécutées par l'apprenant.

5.6.4 *Adaptation du simulateur*

Le simulateur en son état original fonctionne de façon autonome (*stand-alone*). Il offre la possibilité d'agir sur les contrôles et variateurs et de visualiser les résultats correspondants. Il est conçu comme une entité complètement indépendante, donc toutes les manipulations et les résultats sont gardés en son sein. Nous avons eu besoin de savoir ce que l'apprenant est en train de faire : quel contrôle a-t-il manipulé et quelles sont les nouvelles valeurs des variables affectées. Le code source, écrit en Java, était disponible sur le site de Phet. Nous avons pu manipuler les sources pour ajouter des fonctions qui saisissent les changements des différentes variables du simulateur (une dizaine) et l'envoient via un flux privé (socket) au poste du tuteur. Nous avons fait de sorte que ces données peuvent être recueillies par un autre programme, sans aucune contrainte sur le langage de programmation utilisé. Lors des expérimentations, l'enseignant pouvait regarder l'écran du candidat et ne s'est pas servi de ces fonctions. Cependant, il lui est difficile de savoir avec exactitude la valeur des variables. Le tuteur artificiel bénéficie de ces fonctions qui lui permettent de savoir en tout instant l'état des variables et pourrait déduire s'il s'agit de la bonne manipulation ou non.

Notre environnement permet de diffuser une copie de l'écran de l'apprenant de façon dynamique, les informations visuelles sont facilement interprétables par un tuteur humain, mais difficilement pour un tuteur artificiel. C'est dans ce but que nous avons procédé à des changements dans le code source du simulateur afin qu'il puisse signaler l'état de ses contrôles et variables lors de chaque changement. Un message est envoyé via une socket et sera intercepté par l'ordinateur du tuteur via le réseau local.

Le tableau de bord du tuteur lui indique chaque changement de variable ainsi que la nouvelle valeur.

5.6.4.1 La préparation du cours

La préparation du cours comporte deux parties : le cours théorique qui est une présentation de la matière, et les exercices et les manipulations à effectuer pour placer l'apprenant dans un cadre réaliste de résolution de problèmes.

a) Le cours théorique

La préparation de notre environnement d'apprentissage a nécessité l'intervention des techniques informatiques et des techniques didactiques et pédagogiques. La collaboration avec des experts dans le domaine nous a conduits à réaliser un outil pour la préparation du cours : PhetHICours. Il s'agit d'une interface mise à la disposition du concepteur du cours pour l'aider à présenter son contenu du cours. Notre environnement d'apprentissage traite de l'apprentissage de l'effet photoélectrique, un chapitre du programme en sciences physiques (niveau CÉGEP). Cet outil produit le cours théorique. Il s'agit d'une liste d'acétates décrivant la matière à enseigner. Elle renferme une partie historique décrivant l'origine de la théorie ainsi que des généralités sur les différentes notions intervenant dans la matière. Cette partie se termine par la présentation du simulateur et de son rôle. Nous avons préparé la partie théorique qui a été revue et corrigée par l'expert. Le résultat

est une liste de treize écrans de présentation qui peut être proposée à ces étudiants dans un cours réel. Ces acétates visent à :

- Introduire le cours;
- Rappeler les fondements et les connaissances préalables;
- Mettre en évidence les points saillants de la théorie classique;
- Mettre en évidence les points saillants de la théorie quantique;
- Décrire le simulateur et ses composantes.

Du côté de l'apprenant, le cours se présente comme illustré par la figure 5.8. Dans la partie gauche, on a une page du cours ou un écran de présentation. Dans la partie de droite, on a un menu sous forme de boutons, on peut accéder à une page par son titre affiché sur le bouton ou bien en défilant les pages une à une grâce aux boutons de navigation '>' : suivant et '<' : précédent.

The screenshot shows a presentation slide titled "Généralités sur l'effet photoélectrique" and "Modèle classique d'une onde électromagnétique". The slide content includes:

- La lumière = onde électromagnétique
- composée de :
- champ électrique E
- champ magnétique B

Below the text is a diagram of an electromagnetic wave showing the amplitude of the electric field (Amplitude du champ électrique), the amplitude of the magnetic field (Amplitude du champ magnétique), and the direction of propagation (Direction de propagation). At the bottom of the slide, it states: "Elle se propage à la vitesse c (3×10^8 m/s), avec une fréquence f (Hz) et une longueur d'onde λ (m) $c = \lambda * f$ ".

On the right side, there is a navigation menu titled "Index des généralités" with the following items:

- Effet photoélectrique
- Résumé
- Modèle classique d'une onde électromagnétique** (highlighted)
- Spectre électromagnétique
- Intensité de la lumière (modèle classique)
- Modèle quantique d'une onde électromagnétique
- Intensité de la lumière (modèle quantique)
- Effet photoélectrique plus détaillé
- Interaction lumière-matière
- Description du simulateur Phet
- Description du simulateur Phet - résumé
- Compléments
- Rôle du simulateur

At the bottom of the menu are navigation buttons for '<' and '>'.

Figure 5.8 Exemple d'une page du cours sur l'effet photoélectrique

b) Les exercices et manipulations

Les exercices et manipulations visent à inciter l'apprenant à utiliser le matériel dont il dispose : cours théorique et simulateur pour répondre à une série de questions. La difficulté des questions est progressive, nous avons commencé par des questions sur la physique classique dans le but de valider les anciennes connaissances avant de passer aux étapes plus difficiles qui suscitaient plus de réflexions et l'utilisation du simulateur pour illustrer les énoncés des problèmes. Le candidat choisit le problème à résoudre à partir de la liste dont il dispose. Un sélecteur de problèmes se charge de récupérer les constituants du problème choisi à partir de la base de données comme présenté dans la figure 5.9. En même temps, le tuteur reçoit une description du problème et d'un aide-mémoire sur le support et l'aide qu'il pourrait fournir pour ce problème.

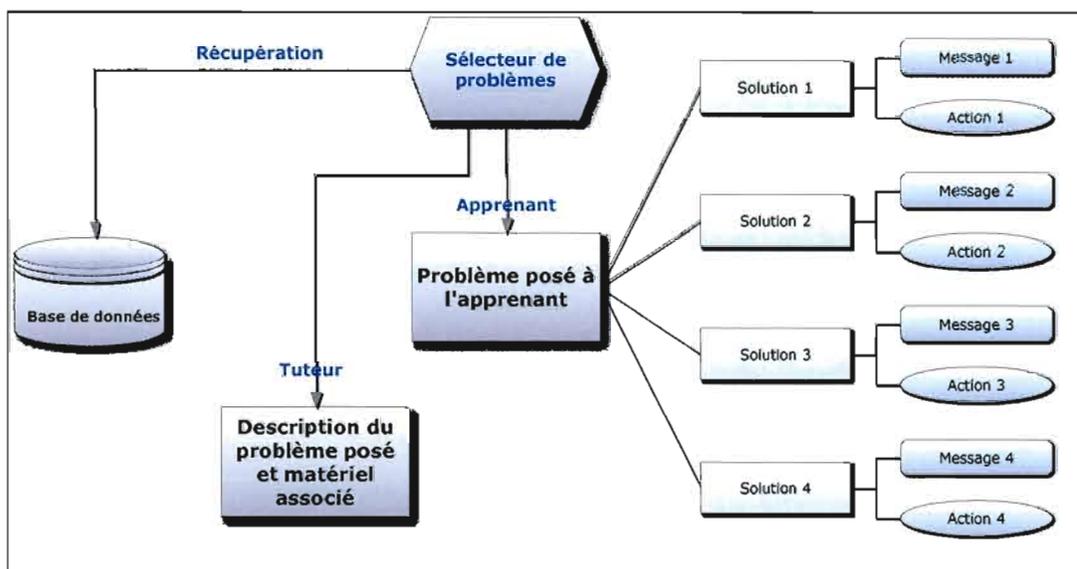


Figure 5.9 Sélection d'un problème avec ses composants

Chaque problème est associé à un triplet d'éléments (*solution, message, action*). Ce paquet d'information est envoyé au poste de l'apprenant et utilisé par son

application qui va afficher le *message* et exécuter l'*action* prédéfinie une fois la *solution* choisie.

Les exercices et manipulations sont composés de trois parties :

- Des questions à choix multiple : l'apprenant devra répondre aux questions selon ses connaissances. En fonction de sa réponse, le système lui affiche un texte d'aide pour lui expliquer pourquoi sa solution est erronée. Le système lui signale si sa solution est correcte. Pour la majorité des questions, le système pose une question et demande d'utiliser le simulateur pour valider son choix de solution;
- Des questions de réflexion : il s'agit du même principe que les questions précédentes sauf que le système mentionne que sa solution est correcte ou non. L'apprenant peut consulter la partie théorique du cours qui peut contenir certains éléments de réponses. Il dispose également du simulateur qui lui permet de faire des manipulations et se placer dans des conditions similaires à l'énoncé de l'exercice;
- Des questions ouvertes : il s'agit de questions de synthèses pour lesquelles l'apprenant doit répondre par un texte. Ceci permet au tuteur d'avoir une évaluation globale des compétences acquises par l'apprenant.

Les exercices, ou problèmes, ont été préparés par l'expert, nous avons développé un outil qui permet la gestion de ces questions. Chaque question est décrite par les propriétés suivantes :

- Titre : le titre est utilisé pour identifier la question et figure dans le menu des questions;
- Énoncé : c'est l'énoncé textuel de la question;
- Image associée à l'énoncé : on peut ajouter une image, modifiable, avec chaque énoncé;
- Type du problème : le problème peut être :

1. Une question à quatre choix de solutions;
2. Une information;
3. Une manipulation qui déclenchera le lancement automatique du simulateur avec l'énoncé;
4. Une question ouverte, l'apprenant devra y répondre en tapant au clavier.

#	Type	Type	Scène	Titre	Texte
57	011	Information	2-Photo Simulateur	Préambule	Les questions suivantes doivent être répondues au meilleur de vos connaissances et de votre logique.
60	015	QCM	4-Quatre choix	L'intensité de la lumière selon le modèle c	Que représente l'intensité de la lumière selon le modèle classique ?
59	021	QCM	4-Quatre choix	Le courant en fonction du voltage?	Supposons une lumière dont l'intensité et la longueur d'onde sont suffisantes pour éjecter des électrons
61	030	Pratique	3-Simulateur	Le courant en fonction du voltage (simulé)	Pourquoi le courant atteint un plateau? Vous pouvez maintenant utiliser le simulateur pour répondre à la question précédente. Rappel de la qu
62	040	QCM	4-Quatre choix	Pourquoi le courant atteint un plateau?	Pourquoi est-ce que le courant atteint un plateau ?
80	060	Pratique	3-Simulateur	Pourquoi le courant atteint un plateau? (s	Vous pouvez maintenant utiliser le simulateur pour répondre à la question précédente. Rappel de la qu
63	060	QCM	4-Quatre choix	Courant en fonction de l'intensité?	Selon le modèle classique, quel serait le bon graphique du courant (à tension nulle) en fonction de l'int
64	070	Pratique	3-Simulateur	Courant en fonction de l'intensité (simulé)	Vous pouvez maintenant utiliser le simulateur pour répondre à la question précédente. Rappel de la qu
66	080	QCM	4-Quatre choix	La longueur d'onde de la lumière classiq	Que représente la longueur d'onde de la lumière classiquement ?
67	090	QCM	4-Quatre choix	Longueur d'onde et extraction classiq	Selon le modèle classique, est-ce que toutes les longueurs d'ondes peuvent arracher des électrons à ur
65	100	Pratique	3-Simulateur	Longueur d'onde et extraction classiq	Vous pouvez maintenant utiliser le simulateur pour répondre à la question précédente. Rappel de la qu
68	110	QCM	4-Quatre choix	(E _{max}) en fonction de la fréquence (f) ?	Selon ce que vous avez remarqué avec le simulateur, quel serait le bon graphique de l'énergie maximal

Figure 5.10 Interface de conception des problèmes

- Un bloc répété quatre fois contenant :
 - o Le texte de la solution proposée : élaboré par l'expert;
 - o L'image associée s'il y en a : exemple un schéma ou une courbe;
 - o Le texte de rétroaction qui s'affiche après la sélection de la solution;
 - o Une action prédéfinie à déclencher : il s'agit du nom d'une fonction programmée qui va s'exécuter après la sélection de la solution, plus de détails sont présentés dans la section 5.6.5.

- Solution : le numéro de la solution correcte parmi les 4.

Il est possible d'ajouter, de modifier et d'effacer une question. L'interface est simplifiée pour être utilisée sans ambiguïtés. Aucune limite n'a été spécifiée quant au nombre de questions à saisir, pour les besoins de notre cours, on s'est limité à 14 questions à choix multiple, 5 questions invoquant la manipulation du simulateur et 3 questions libres. La figure 5.10 montre l'interface de conception et rédaction des problèmes. Les problèmes sont sauvegardés dans une base de données.

5.6.4.2 Les conversations textuelles

Un système d'échange de messages textuels, ou clavardage a été mis en place pour assurer un échange de textes entre l'apprenant et le tuteur. Ce système fonctionne à la demande, l'apprenant peut en tout moment interrompre son activité en cours pour aller poser une question sous forme de texte. Toutes les conversations textuelles sont enregistrées, ceci permet de savoir quelles situations provoquent une demande d'aide textuelle, quel est le type de l'aide demandée et quelle aide a été proposée par le tuteur. Une interface a été développée pour assurer cette fonction selon le principe présentée par la figure 5.11. Les échanges textuels se font par l'intermédiaire des sockets : chaque envoi de message engendre, en plus de sa transmission vers son destinataire, une écriture dans la base de données avec l'heure de son exécution. Nous avons remarqué que cette fonction n'a pas été utilisée lors des

expérimentations. Les candidats ont bien pris connaissance de sa présence, mais ils ont préféré utiliser le dialogue vocal directement.

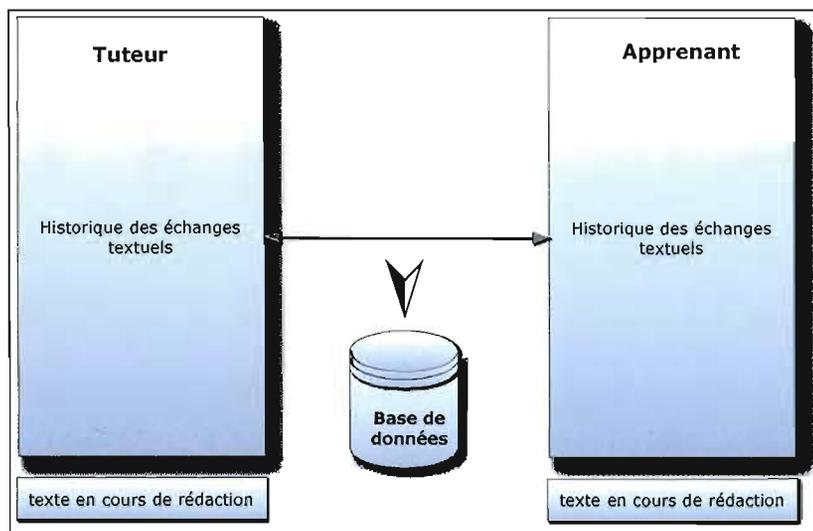


Figure 5.11 Module de clavardage

Les données textuelles sont envoyées sous le format XML suivant :

```
<DataChat>
```

```
TextChat, TimeMS, Sender
```

```
</ DataChat >
```

- TextChat : le texte transmis
- TimeMS : le temps en millisecondes
- Sender : l'expéditeur : le tuteur ou l'apprenant

5.6.5 Les fonctions d'aide intégrées

Suite à l'observation des interventions du tuteur, nous avons recensé des fonctions qui peuvent être automatisées et activées par le tuteur humain ou bien par un agent artificiel. Nous avons classé ces fonctions en trois groupes :

1. Les fonctions de renvoi : pour proposer à l'apprenant d'aller revoir la partie théorique en entier et lui laisser les soins d'aller chercher lui-même les sections qui peuvent l'aider; d'aller consulter une page spécifique ou bien d'utiliser la simulation. Cette fonction peut se présenter comme un message informatif suivi d'une action : ouverture d'une page de la théorie ou ouverture du simulateur. Le tuteur pouvait commander l'affichage d'une page du cours chez l'apprenant et l'ouverture et la fermeture du simulateur;

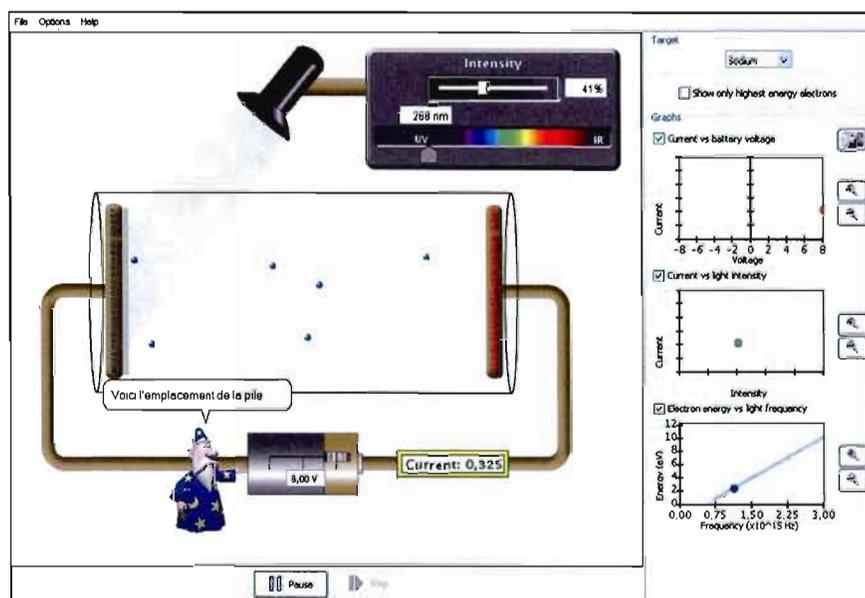


Figure 5.12 Exemple d'aide à localiser la pile du simulateur

2. Les fonctions de pointage : pour mettre en évidence un endroit bien précis de l'écran. Le tuteur avait eu à maintes reprises besoin de montrer un élément précis dans l'écran du tuteur, mais, vu que le support se faisait à distance, nous avons développé ces fonctions qui permettent d'encadrer un endroit de l'écran ou bien d'utiliser un ACA pour pointer l'endroit désiré. La figure 5.12 montre un exemple où l'agent Merlin pointe du doigt la pile. Certains candidats ne sont pas rendus compte de l'existence de la pile comme composante du simulateur, malgré la ressemblance à une vraie pile, l'ajout du

variateur de tension et l'affichage de la valeur numérique du voltage la rendent une pile inhabituelle. Le tuteur humain a essayé de préciser son emplacement pour plusieurs candidats;

Les emplacements des éléments que l'agent peut pointer ont été définis et enregistrés dans la base de données. Chaque élément est défini par un identifiant ainsi que les coordonnées du rectangle qui l'englobe, un exemple de découpage du simulateur est présenté dans la figure 5.13.

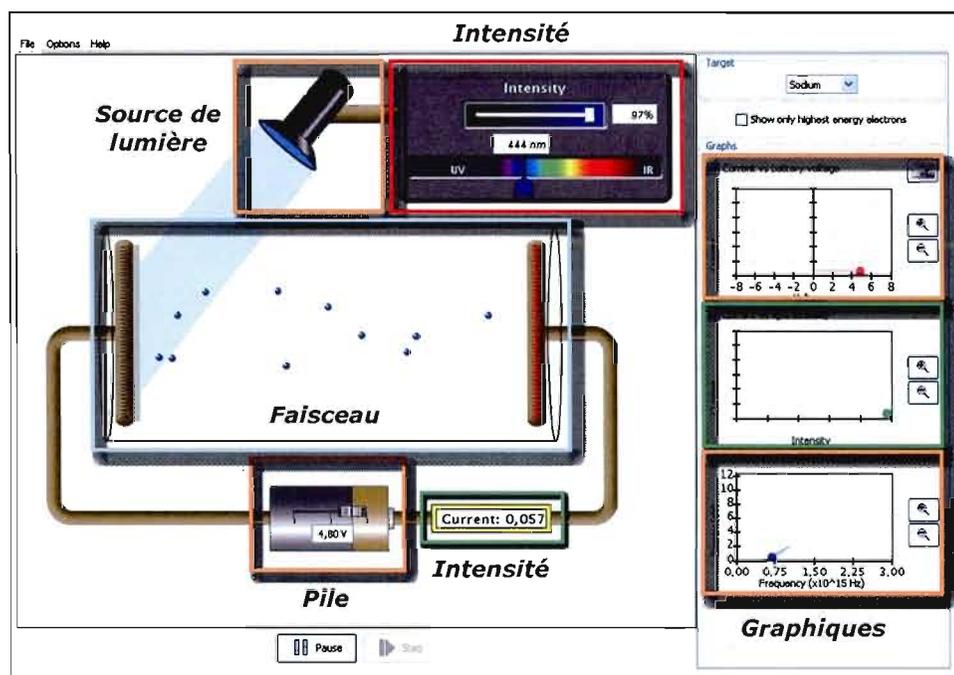


Figure 5.13 Exemple de découpage du simulateur en zones d'intérêts

3. Les fonctions de guidage : pour guider l'apprenant à réaliser une tâche complexe qui englobe plusieurs manipulations. Par exemple, quand le tuteur suggère d'utiliser le simulateur et d'observer la variation de l'intensité du courant électrique en fonction de l'intensité lumineuse, l'apprenant doit ouvrir le simulateur, identifier le variateur de l'intensité et localiser l'indicateur du courant électrique. Durant cette tâche composée, la fonction de guidage peut utiliser la fonction de pointage pour montrer par exemple l'emplacement de

l'indicateur de l'intensité électrique. Cette fonction remplace l'explication du tuteur par une série de messages et d'actions.

5.6.6 Les modalités de présentation de l'aide

Selon les préférences de l'apprenant, l'aide est régie par le module PhetHIHelp qui peut la présenter sous les formes suivantes :

- Textuelle : l'aide sera présentée sous forme d'un texte dans une fenêtre de dialogue. Ce type d'aide est le plus simple et nous dirons que c'est plus classique, car dans la majorité des interfaces ont recours à des messages textes pour dialoguer avec les apprenants;
- Animée : un agent pédagogique peut se charger de véhiculer le message en le présentant sous forme animée et vocale à l'aide d'un des agents conversationnels animés de Microsoft (ACAs). Nous avons testé plusieurs ACAs dotés d'une fonction de transformation du texte en voix (TTS ou text to speech). Ces agents sont facilement disponibles et ont l'avantage d'être connus par les apprenants familiers au système Windows de Microsoft.

Les ACAs sont des composants logiciels dotés d'une apparence effective représentant un personnage ou un corps, ils sont capables d'interactions multimodales avec l'apprenant (Nkambou et al., 2007). Ils peuvent associer des gestes ou exprimer une émotion juste après l'affichage ou la lecture du message. Par analogie avec le cerveau humain qui envoie un message à plusieurs organes en même temps pour : gestes et paroles, les ACAs peuvent imiter ce comportement.

Ces agents sont utilisés pour présenter l'interaction de façon naturelle incluant des gestes, des paroles, des mouvements et des expressions faciales. Leur utilisation fait que le dialogue entre humains et machines se rapproche du dialogue entre humains, établit une relation psychologique positive entre humain et machine et contribue à l'utilisabilité des applications (Sansonet, Leray, & Martin, 2006).

Un agent conversationnel animé a été défini dans (Cassell, Sullivan, Prevost, & Churchill, 2000) comme une interface humain-machine qui utilise un personnage virtuel animé doté de capacités communicatives inspirées de la communication humaine. En effet, le fait qu'un agent peut véhiculer beaucoup d'informations non verbales en utilisant des gestes, des mouvements corporels ou des expressions faciales. Ceci a l'avantage d'enrichir le dialogue et d'accélérer la compréhension des messages véhiculés.

Plusieurs agents existent et sont prêts à l'emploi, mais, le choix de l'agent doit se faire en fonction des actions demandées. Les agents ne disposent pas des mêmes capacités comme les expressions faciales ou la parole ou de mobilité comme se déplacer librement dans l'écran. Il existe plusieurs critères de choix de l'agent cité dans (Farouk *et al.*, 2007) dont : a) le personnage peut représenter un humain exemple : Émilie (Nkambou *et al.*, 2003), un animal, robot ou un objet (trombone) comme les agents de Microsoft, b) l'environnement intégrateur, c) son rôle pédagogique, d) ses capacités non verbales (gestes et expressions faciales). Généralement, le concepteur prévoit une liste d'agents pour essayer de satisfaire les préférences de plus de candidats ce qui laisse souvent différents choix à l'apprenant ou au professeur quant à la sélection du personnage (Dufresne, 2001).

Parmi les ACAs disponibles, nous avons utilisé les agents présentés dans le tableau 5.1, nous avons utilisé essentiellement Merlin pour la richesse des animations qui l'accompagne, pour les gestes qu'il est capable d'effectuer et pour son expressivité (Hernández, Arroyo, & Sucar, 2009). Il peut faire des clignements des yeux et pointer un endroit par le doigt.

Tableau 5.1 Liste des ACAs utilisés

Nom	Caractéristiques	Apparence
Merlin, le magicien	Très riche en nombre d'animations : salue, annonce, félicite, explique, suggère, fait un clin d'œil, regarde dans plusieurs directions, se déplace, fait plusieurs gestes... peut exprimer la confusion, la tristesse, etc.	
Robby, le robot	Dispose d'environ 60 animations : salue, annonce, exprime la confusion, félicite, explique, pense, suggère...	
Peedy, le perroquet	Dispose d'une trentaine d'animations : annonce, exprime la confusion, félicite, explique, pense, suggère, peut regarder et bouger dans plusieurs sens...	
Génie	Dispose d'une vingtaine d'animations : annonce, exprime la confusion, félicite, explique, pense, suggère...	

5.7 Les types d'aide

Dans notre cadre expérimental, nous avons identifié les différents types d'intervention du tuteur réel en visionnant les enregistrements vidéo des différentes expérimentations. Nous avons dégagé les types d'interventions suivants :

- Conseil : l'enseignant incite le candidat à trouver par lui-même la solution de chaque problème sans lui donner la réponse. Il peut lui proposer des conseils du genre quoi faire dans une certaine situation. Il peut aussi lui donner des indices. Un indice est un bref message qui peut diriger l'attention du candidat

vers d'autres éléments ou l'emploi d'un des termes clés du problème dans une autre phrase pouvant l'inciter à réfléchir (ou à revoir sa réflexion);

- Correction : face à une erreur de manipulation ou à une mauvaise réponse, l'enseignant peut proposer une correction en lui mentionnant la démarche à suivre pour être débloqué et se rapprocher de la bonne solution;
- Directive : au cas où l'étudiant éprouverait des difficultés de manipulation de l'environnement, le tuteur peut intervenir pour lui expliquer les différentes composantes du système : comment activer le simulateur, comment afficher le cours, comment passer d'une page à une autre, etc. Il est aussi possible de le guider lors de la manipulation du simulateur. L'enseignant peut guider l'étudiant à matérialiser le problème donné en fixant les bonnes valeurs des variables et effectuer les bonnes variations dans le simulateur. L'enseignant peut demander de faire une certaine manipulation : ouvrir un graphique, agrandir le graphique, changer la valeur d'une variable;
- Encouragement : l'étudiant peut montrer des signes de faiblesse ou d'ambiguïtés; dans ce cas, l'enseignant peut l'encourager pour qu'il regagne sa motivation et sa confiance. L'enseignant peut aussi le rassurer et rétablir sa confiance lorsqu'il décèle une frustration face aux difficultés exposées, par exemple, il peut l'informer qu'il n'y a pas de mal à répondre incorrectement et que le but est d'apprendre;
- Explication : certains problèmes peuvent contenir des termes inconnus pour l'étudiant ou bien des formules pas très familières; dans ce cas, l'enseignant agit en expliquant la signification de ces termes ou donne une explication globale du problème à résoudre. Il peut aussi répondre aux différentes questions du candidat;
- Message : il s'agit d'un message assez bref qui indique que le choix de solution n'est pas adéquat en donnant quelques indices expliquant pourquoi ce n'est pas la bonne solution;

- Renfort : même si l'étudiant répond correctement, l'enseignant peut intervenir pour donner d'autres argumentations dans le but de lui permettre de consolider la solution trouvée;
- Renvoi au cours : l'enseignant peut proposer d'aller revisiter une ou plusieurs pages du cours dans le but de chercher plus d'informations théoriques pouvant lui apporter des éléments de réponse;
- Renvoi au simulateur : l'enseignant peut proposer d'aller utiliser le simulateur pour illustrer le problème posé dans le but de comprendre ce qui peut se passer dans des conditions similaires à celles proposées dans la question;
- Questionnement : l'enseignant peut poser une question dans les cas suivants :
 - Pour s'assurer que l'étudiant a bien compris ce qui est demandé de faire et de bien maîtriser la question.
 - Pour s'assurer que l'étudiant n'a pas répondu par hasard, mais qu'il est capable de bien justifier sa solution.
 - Pour inciter l'étudiant à chercher les éléments de réponse à la question sachant que cela va l'aider à trouver la solution au problème original.

Nous rappelons que ces interventions ont été recensées de manière expérimentale et dans un environnement d'apprentissage où l'enseignant était dans un état naturel. Nous signalons que l'enseignant pilote l'apprentissage de manière autonome sans aucune contrainte ni directive préalable : il agit à sa façon. Il s'agit bien d'un comportement humain naturel similaire à un apprentissage ordinaire.

Le tableau 5.2 récapitule les différents types d'aides rencontrés lors des expérimentations avec les différents candidats.

Tableau 5.2 Les types d'aides employés

Type de l'aide	Code
4. Conseil	CNS
5. Correction	COR
6. Directive	DIR
7. Encouragement	ENC
8. Explication	EXP
9. Message	MSG
10. Renfort	RFR
11. Renvoi au cours	RVC
12. Renvoi au simulateur	RVS
13. Questionnement	QES

5.8 Recueil des données

Les données collectées sont de deux types :

- Automatiques : ceci concerne l'enregistrement des données oculaires et physiologiques et des mouvements de la souris du côté de l'apprenant. Les données enregistrées sont sauvegardées dans leur état brut et exportées par la suite dans une base de données. Le tableau 5.3 et le tableau 5.4 montrent respectivement les types de colonnes utilisés pour l'enregistrement des données oculométriques et physiologiques. En ce qui concerne les données oculométriques, l'oculomètre fournissait plusieurs informations. Nous avons gardé uniquement les informations utiles pour notre recherche dans le but d'alléger la circulation des informations entre les ordinateurs et de simplifier les traitements. La liste complète des informations gérées par l'oculomètre est présentée en Appendice B. Pour notre recherche, nous avons eu besoin de savoir l'emplacement du regard, ce qui revient aux coordonnées en pixels x et y, la durée de chaque fixation ainsi que le diamètre de la pupille. Nous avons choisi la liste des variables présentée dans le tableau 5.3. Ces cinq variables répondaient parfaitement bien à notre recherche;

- Manuelles : ceci concerne les interventions d'aide du tuteur (voir le tableau 5.2). Les enregistrements vidéo ont été revus dans le but d'identifier chaque aide proposée par le tuteur. Les actions codifiées ont été enregistrées dans la base de données. Chaque intervention du tuteur est traduite par un ou plusieurs types d'aide. Le tuteur peut en même temps poser une question, donner une explication et proposer un renvoi à la théorie. L'aide du tuteur a été fournie avant que l'étudiant réponde à une question ou après sa réponse. Dans certains cas, le tuteur est intervenu après que l'apprenant donne une réponse correcte : ce type d'aide vise le renforcement des connaissances acquises.

Tableau 5.3 Liste des variables oculométriques étudiées.

Variable	Signification	Unité
<i>Timestamp</i>	la marque du début d'une fixation	millisecondes
<i>MappedFixationPointX</i>	l'abscisse de la position du regard	pixels
<i>MappedFixationPointY</i>	l'ordonnée de la position du regard	pixels
<i>FixationDuration</i>	la durée de la fixation	millisecondes
<i>Pupil</i>	le diamètre de la pupille	millimètres

Tableau 5.4 Liste des variables physiologiques étudiées.

Variable	Signification	Unité
<i>TimeValue</i>	Le temps du signal	millisecondes
<i>GSRValue</i>	La valeur de la RPG	micro Siemens

5.8.1 Synchronisation des données

Les données collectées à partir du poste de l'apprenant qui sont datées en millisecondes et enregistrées dans la base de données, dans des tables différentes. La fréquence des informations enregistrées n'était pas la même pour chaque table et dépendait de la nature du dispositif associé qui était à l'origine de la génération de chaque information. Nous nous sommes trouvés à la fin de chaque expérimentation

avec des tables de longueurs différentes. Les données ayant les plus hautes fréquences sont les données oculaires et physiologiques, comparées à la fréquence de clics de la souris ou au changement de variables du simulateur, par exemple. Notons que :

- L'oculomètre génère 60 évènements par seconde;
- Le capteur de la RPG génère 256 mesures par seconde.

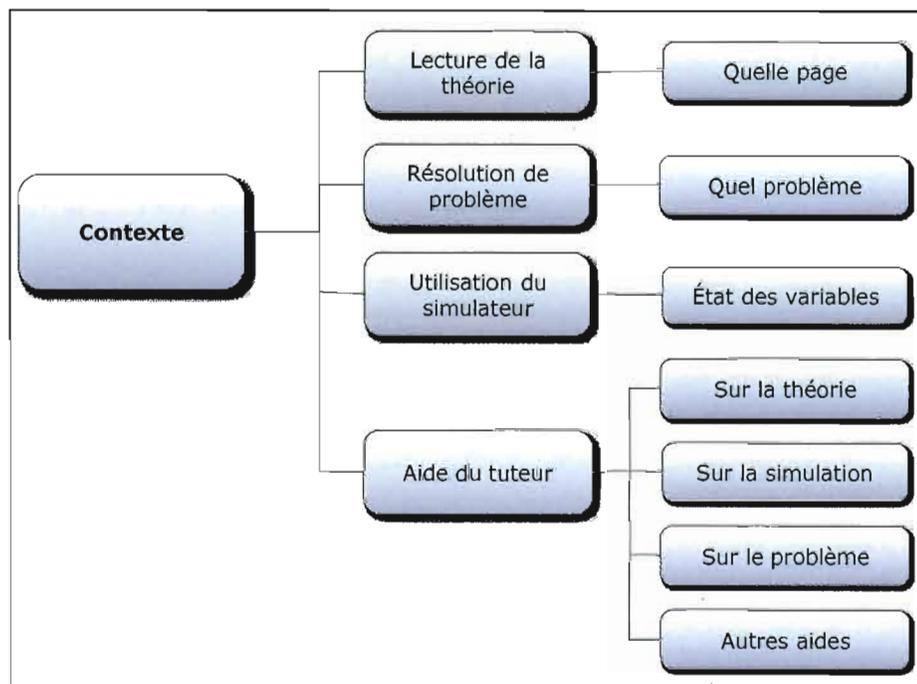


Figure 5.14 Exemple de situations de lors de l'apprentissage

La tâche de synchronisation de ces données consistait à obtenir une table unifiée ayant pour chaque information oculométrique la valeur correspondante de la RPG moyenne au même moment. Nous avons rajouté d'autres informations pour identifier le contexte associé comme le numéro de la page en cours de lecture ou le numéro du problème en cours de résolution. En somme, nous avons regroupé les données de façon à pouvoir déterminer pour chaque intervalle de temps qu'est-ce qui était affiché à l'écran du candidat, ce qu'il faisait, où il regardait et quel était le niveau de sa RPG.

L'exemple présenté dans la figure 5.14 illustre des situations dans lesquelles peut se trouver l'apprenant.

Le contexte est déterminé par le contenu de l'écran, pour chaque contexte nous avons identifié les événements et variables associés, ainsi que les durées des tâches, les positions du regard et le niveau de la RPG.

5.8.2 Validation et nettoyage des données

Les différentes tables de données générées sont sauvegardées à l'état brut pour garder un historique complet des événements qui avaient eu lieu. Il était nécessaire de procéder à un contrôle des données et de s'assurer de leur validité. Pour les données oculométriques, nous avons retiré les mesures non valides prises lors des situations qui pouvaient correspondre aux situations suivantes :

1. le candidat regardait en dehors de l'écran : la calibration était faite pour suivre le regard uniquement dans l'écran de l'apprenant. Un regard en dehors de cet espace est considéré comme étant non défini et se traduisait par une absence d'information, donc éliminé de notre base d'étude.
2. Le candidat faisait un clignement des yeux ou fermait ses yeux : dans ces situations, l'oculomètre ne recevait pas le retour de la lumière infrarouge émise vu que l'œil était fermé. Les données générées dans ce cas ont été également éliminées.
3. Le système était incapable de calculer la position du regard : dans certaines situations, l'oculomètre ne pouvait pas de générer des données fiables faute d'éclairage par exemple. Il nous était impossible d'identifier la cause exacte de l'absence des données. Le système générait des indicateurs permettant d'identifier ces données : les variables fournies « *ValidityLeft* » et « *ValidityRight* » sont nulles si la position est correctement repérée sinon prend une valeur entre 1 et 4, 4 signifie le pire résultat.

Nous tenons à remarquer que les données éliminées ne dépassaient pas les 10% des données collectées, ce qui n'a pas atteint la validité des données analysées. Les données éliminées pouvaient révéler des informations pertinentes, par exemple, l'étude des données citées dans le cas 1. et 2. peuvent s'avérer pertinentes pour analyser d'autres types de comportement de l'apprenant comme l'étude des clignements des yeux qui peut être associée à des états émotionnels. Nous ne sommes pas concentrés sur ce type d'étude et nous avons décidé de ne pas en tenir compte lors de notre analyse de données.

Dans les trois cas cités ci-haut, tout ce qu'on pouvait savoir c'est que l'oculomètre était incapable de repérer l'œil du candidat, donc on ne pouvait pas savoir ce qu'il regardait.

Nous n'avons pas eu de problèmes de perte de données avec les mesures physiologiques, une fois les capteurs sont bien installés, les mesures s'effectuaient parfaitement bien. Le seul risque était d'enlever les capteurs ou de les déplacer, ce qui n'a pas eu lieu.

Pour toutes les expériences, le système de capture des signaux physiologiques (Biograph) suppose qu'elles commencent à l'instant 00:00:00.000, nous avons donc recalculé le temps absolu pour retrouver les correspondances avec l'oculomètre. Le résultat est un tableau de couples (temps absolu, valeur RPG). La fréquence des données a été ramenée à la même fréquence que celle de l'oculomètre, soit 60 par seconde. L'ensemble des données de la RPG est ajouté aux données précédentes.

L'enregistrement de ces deux types de données n'avait pas commencé au même instant, nous avons lancé la capture de la RPG environ 3 minutes avant l'oculomètre dans le but de mesurer les RPG de l'état naturel du candidat (baseline). Il n'existe pas une seule façon de normaliser les valeurs de la RPG. Nous avons opté pour les normaliser selon la formule utilisée par Lisetti et Nasoz (Lisetti & Nasoz, 2004) :

$$\text{GSR}_{\text{normalized}} = \frac{\text{GSR} - \text{GSR}_{\text{relaxation}}}{\text{GSR}_{\text{relaxation}}}$$

Bien que cette formule réduit l'intervalle de variation de la RPG et permet de comparer plusieurs les mesures de plusieurs candidats, il en demeure difficile de déterminer avec précision la valeur de la RPG en relaxation. La relaxation est le moment où le candidat est dans un état naturel ou normal, sans présence de stimulus et sans faire d'activité : ceci devrait correspondre à un état de repos ou « sans émotion ». Nous rappelons que pour faire la mesure physiologique, le candidat porte des capteurs, ce qu'il ne fait pas toujours et qu'il s'attend à une expérimentation et une évaluation dont il ignore les détails du déroulement. Nous avons pris des mesures quelques minutes avant de commencer l'expérimentation et avons remarqué une variation importante de la RPG. La figure 5.15 montre l'évolution de la RPG pour le candidat 1, l'intervalle de variation est assez important ce qui empêche de supposer l'état de repos ou relaxation.

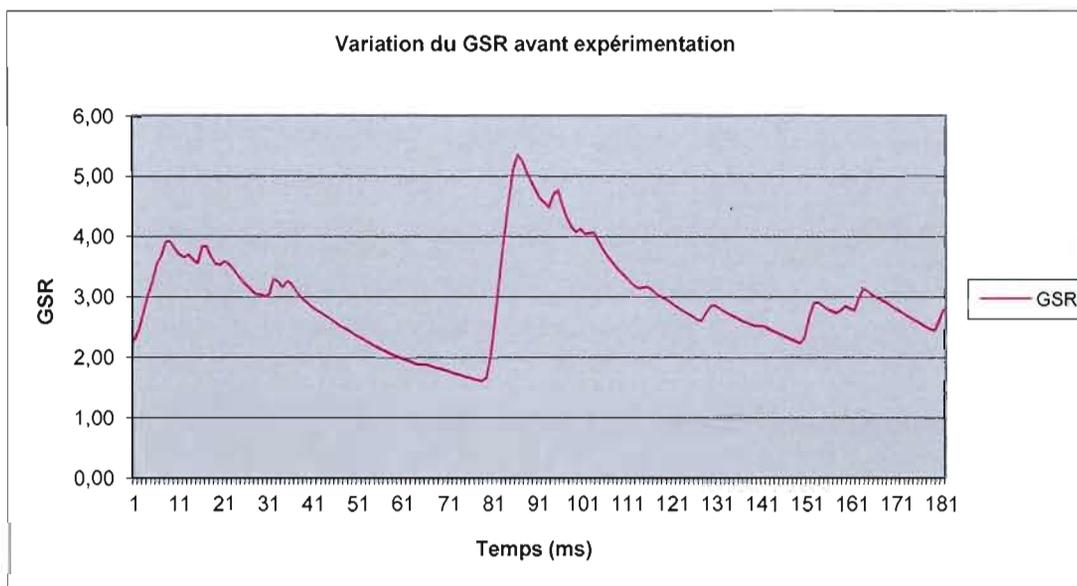


Figure 5.15 Variation de la RPG avant l'expérimentation

Nous n'avons pas utilisé la formule précédente vu qu'elle nécessite de déterminer l'état de relaxation des candidats, donc impose de faire d'autres expérimentations.

Nous avons opté pour la formule utilisée par Dawson, Schell et Fillion (Dawson, Schell, & Fillion, 2000) soit :

$$GSR_{\text{normalized}} = \frac{GSR - GSR_{\text{min}}}{GSR_{\text{max}} - GSR_{\text{min}}}$$

Ceci nous a permis de comparer l'évolution de la RPG des différents candidats.

Le début de l'expérience était marqué par le lancement de l'application chez l'étudiant. L'étape suivante consistait à faire la correspondance entre les données précédentes et l'identification de la page visualisée par l'étudiant. Le fichier contenant des données relatives aux actions de l'apprenant nous fournissait cette information. La structure est la suivante :

- Temps absolu : le temps en millisecondes de l'évènement
- Type de l'évènement : clic d'un bouton de la souris, touche tapée, variable du simulateur modifiée.
- Description de l'évènement
- Contexte : identifier si l'apprenant est dans l'un des contextes suivant : lecture de la théorie, résolution de problème ou simulation après l'évènement. Ceci signifie ce qu'on obtient après avoir cliqué sur un bouton de commandes par exemple.
- Numéro de page : donne le numéro de la page dans la partie théorique.
- Numéro de solution : s'il s'agit d'un choix de solution, on note le numéro de la solution sélectionnée.

Ces informations ont été fusionnées avec les précédentes ce qui nous donnait un tableau regroupant les évènements prélevés lors de nos expérimentations. On pourrait savoir ainsi en tout moment :

- Le contexte courant chez l'étudiant
- La zone regardée

- Le diamètre de la pupille
- La position du regard
- La solution à une question s'il a répondu

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats des analyses statistiques et de l'extraction de relations à partir des données. Nous clôturons le chapitre par une analyse du questionnaire post-expérimentation et la suggestion d'un prototype d'agent qui pourra exploiter les résultats.

CHAPITRE VI

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

6.1 Introduction

L'utilisation efficace d'un logiciel nécessite généralement une formation sur ses différentes fonctionnalités et ses interfaces. Le besoin en formation peut s'avérer moins important si l'utilisation du logiciel est conçue pour une utilisation intuitive, mais ceci est au risque d'une utilisation partielle ou limitée du logiciel (Ringle & Halstead-Nussloch, 1989). Pour une bonne utilisation et une bonne maîtrise d'un logiciel, il est toujours conseillé d'avoir une formation. L'aide est très importante pour expliquer les concepts et les différentes manipulations. Notre environnement d'apprentissage a été conçu pour une classe bien ciblée d'apprenant, l'interface est simplifiée et permet avec une courte présentation d'acquérir la maîtrise de toutes les fonctions. Malgré cette simplicité, nous avons remarqué que certains candidats ont demandé de l'assistance pour effectuer certaines manipulations, ceci confirme bien que la transparence et l'intuitivité d'une interface demeurent insuffisantes pour résoudre les difficultés d'utilisation. Néanmoins lors de nos expérimentations, nous nous intéressions à l'aide liée à la construction des connaissances et à la compréhension de nouvelles notions liées au cours de la physique quantique.

Lors de la résolution des problèmes, l'apprenant peut être confronté à des problèmes d'utilisation du simulateur, ce qui ajoute une charge cognitive

supplémentaire à celle reliée à la résolution même du problème posé. Pour certaines questions, l'apprenant doit chercher des connaissances ou effectuer des simulations, il devra donc quitter la question courante et garder en mémoire le contexte global. Pour minimiser l'effort de mémorisation et limiter les va-et-vient entre l'énoncé et les autres ressources du cours, nous avons gardé l'énoncé de la question toujours visible. L'aide qui est fournie à l'apprenant lui présente les informations pertinentes et lui indique comment en chercher efficacement d'autres.

Le système d'aide vise à permettre aux candidats d'acquérir de nouvelles connaissances et de s'assurer d'atteindre les objectifs visés par le cours. Les exercices avaient pour but d'inciter les candidats à construire de nouvelles connaissances en utilisant les ressources disponibles qui sont la théorie, la simulation et l'aide du tuteur. Le tuteur ne donne en aucun cas la solution, il se limite à orienter, à expliquer et à aider à surmonter une impasse.

6.2 Observation des traces

Bien que les environnements informatiques d'apprentissage humain gagnent de la popularité, leur personnalisation demeure complexe. Le tuteur et l'apprenant ont des comportements difficiles à comprendre. Lors de l'utilisation de l'environnement d'apprentissage, nous nous sommes concentrés sur l'aide que donne le professeur : dans quelles conditions il intervient et quelles sont les actions probables faites par l'apprenant qui en ont été les déclencheurs. Nous avons analysé les traces lors de l'utilisation de l'environnement en vue d'en déduire des règles qui régissent un comportement humain dans un tel contexte.

L'analyse des traces permet de retracer et analyser l'activité d'apprentissage. Elle permet également d'évaluer le scénario pédagogique et repérer ses points faibles et les améliorer (Barré , Hassina, & Choquet, 2005). Nous avons utilisé l'analyse des traces pour expliquer les causes probables de l'échec et les causes probables du déclenchement de l'aide par le tuteur.

6.3 Attribution d'une note

En nous basant sur les résultats des candidats, nous avons attribué une note globale pour chacun. Nous avons tenu compte du nombre de tentatives pour aboutir à la bonne solution. Une bonne solution du premier coup donne le maximum de points, soit 100 points. La note diminue de 25 points à chaque tentative supplémentaire, comme énuméré ci-après :

- 100 si l'apprenant répond à la première tentative
- 75 si l'apprenant répond à la deuxième tentative
- 50 si l'apprenant répond à la troisième tentative
- 25 si l'apprenant répond à la quatrième tentative

Les résultats globaux, comme présentés dans le tableau 6.1, nous montrent que la note moyenne est assez élevée, soit 78.28% avec un écart type de 7.61%, donc le résultat global est très bon.

Tableau 6.1 Note finale pour les différents apprenants pour la totalité des problèmes

Apprenant	Note	Nombre de tentatives	Moyenne des tentatives	Nombre de fois d'aides reçues
1	67.86%	32	2.29	19
2	71.43%	30	2.14	14
3	82.14%	24	1.71	7
4	87.50%	21	1.50	9
5	83.93%	23	1.64	12
6	76.79%	27	1.93	12
Moyenne	78.28%	26	1.87	12

L'attribution d'une note nous servira pour l'estimation de la performance par la suite. Ce tableau montre aussi le nombre moyen de tentatives effectuées pour trouver la bonne solution pour les problèmes posés. La meilleure note correspondait à une tentative et demie pour les différents problèmes alors que la note la plus faible est

obtenue en moyenne après 2.29 tentatives. La moyenne de 1.87 tentatives démontre que la solution a été trouvée en moins de 2 tentatives.

6.4 Analyses selon les objectifs

Nous nous sommes concentrés sur l'étude du comportement des apprenants en cherchant les causes probables de la variation de leurs niveaux de stress, de leurs concentrations (diamètre de la pupille) et des endroits regardés. Nous avons essayé de chercher les causes probables du déclenchement de l'aide (si les variables non verbales peuvent l'indiquer) et comment étaient les réactions face à l'erreur et à l'aide proposée. Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de recherches de relations à partir des analyses statistiques des données. Ces objectifs spécifiques ont été énoncés dans la section 5.2.

6.4.1 R1 : Comportement des apprenants lors de la lecture de la théorie

Nous avons effectué en premier une étude qualitative des traces d'utilisation lors de la lecture de la théorie. Le but de cette partie est d'analyser le comportement de l'apprenant durant la lecture de la théorie afin de vérifier si l'on peut utiliser les mesures pour évaluer les difficultés d'apprentissage. Il s'agit de chercher si le temps passé à lire la théorie est lié à : la variation de la RPG, la pupille, le nombre de tentatives menant à la bonne solution et le nombre d'aides reçues. Autrement dit quelle est l'importance ou l'influence de la lecture de la théorie sur la « performance » du candidat.

La lecture de la théorie est la première étape de l'apprentissage, tous les étudiants commencent par cette partie. Le temps passé à la lecture du cours diffère d'un étudiant à l'autre puisque chacun lisait à son rythme. Nous avons étudié le comportement de l'ensemble des candidats par rapport à chaque page, les résultats ont été récapitulés dans le tableau 6.2, qui contient les variables suivantes :

- Le numéro de la page de la théorie.

- Le temps moyen, en millisecondes, d'affichage de chaque page de la théorie : ceci nous renseigne sur la durée totale durant laquelle une page restait affichée.
- Le temps moyen passé à lire effectivement le texte de la théorie, ceci n'inclut que le temps passé à regarder la zone réservée aux pages de la théorie. Quand une page est présente à l'écran, l'apprenant peut regarder ailleurs. Cette mesure nous donne le temps réel passé à regarder la zone contenant le cours.
- Le diamètre moyen de la pupille pour chaque page, cette mesure nous renseigne sur la difficulté de la tâche durant la lecture d'une page.
- La RPG moyenne durant la lecture de chaque page, cette mesure nous renseigne sur l'état de stress moyen durant la lecture d'une page.
- Le pourcentage du temps passé à lire le texte par rapport au temps d'affichage de la page, cette mesure nous donne une estimation du temps effectif de lecture d'une page affichée.
- Le pourcentage de perte de regard : le temps passé à regarder ailleurs qu'à la zone de la page de la théorie. Lors de l'affichage d'une page, l'apprenant peut regarder en dehors de la zone réservée cours, soit pour chercher d'autres informations, explorer les alentours ou regarder ailleurs pour réfléchir.

Tableau 6.2 Tableau récapitulatif des mesures lors de la lecture de la théorie.

Page	Temps d'affichage moyen (ms)	Temps de lecture moyen (ms)	Pupille moyenne	RPG moyenne	% Temps lecture texte	% Perte
1	11707	7867	0,54	0,26	67%	33%
2	29648	26435	0,44	0,25	89%	11%
3	24513	18473	0,40	0,26	75%	25%
4	33804	30607	0,42	0,30	91%	9%
5	36949	26959	0,42	0,29	73%	27%
6	35485	31880	0,40	0,27	90%	10%
7	36890	32560	0,39	0,24	88%	12%
8	39477	34786	0,38	0,21	88%	12%
9	35843	33038	0,38	0,25	92%	8%
10	36094	32236	0,36	0,29	89%	11%
11	47165	42028	0,37	0,30	89%	11%
12	33400	24617	0,38	0,28	74%	26%
13	20084	8315	0,37	0,32	41%	59%
Moyenne	32389	26908	0,40	0,27	83%	17%

Nous remarquons qu'en moyenne, l'attention portée à la lecture de la théorie est assez importante. En effet, les candidats ont lu la théorie durant 83% du temps d'affichage des différentes pages. Ceci peut s'expliquer par la motivation initiale et l'effort fourni pour la compréhension de la matière. Les candidats savaient qu'ils auraient des questions et des problèmes à résoudre se rapportant à la matière présentée dans la théorie. Ceci était sans doute un élément motivateur qui les a incités à prêter attention à la théorie pour bien s'outiller et se préparer pour la partie suivante.

Les durées de regards d'une même page varient d'un individu à un autre, ceci est tout à fait normal, chacun lisait à son rythme et à sa manière. Nous avons remarqué que les deux pages extrêmes étaient les moins regardées. La première page est la page du titre, elle a été regardée en moyenne durant environ 8 secondes avec un écart type de 10 secondes, ceci est peut-être dû au fait que les candidats n'étaient pas préparés

de la même façon à entamer l'expérience et qu'une période d'adaptation et de familiarisation était nécessaire au début. La dernière page a été la moins regardée, elle mentionnait la fin de la partie théorique et le passage à la partie pratique. La durée de regard moyenne pour cette page était d'environ 8 secondes avec un écart type de 8 secondes. Ceci peut être dû au fait que les apprenants savaient qu'à la suite de cette dernière page, il y aurait le passage à la partie résolution de problèmes. Donc, ils s'apprêtaient à passer à la partie résolutions des problèmes ce qui invoquait une mise en évaluation des connaissances acquises.

La majorité des pages a été observée effectivement durant un intervalle entre 18 et 42 secondes, bien que ce temps semblait court, il était semble-t-il suffisant de plus les pages étaient simples et précises. Nous avons illustré dans la figure 6.1, les temps de lecture des pages de la théorie par candidat pour chaque page.

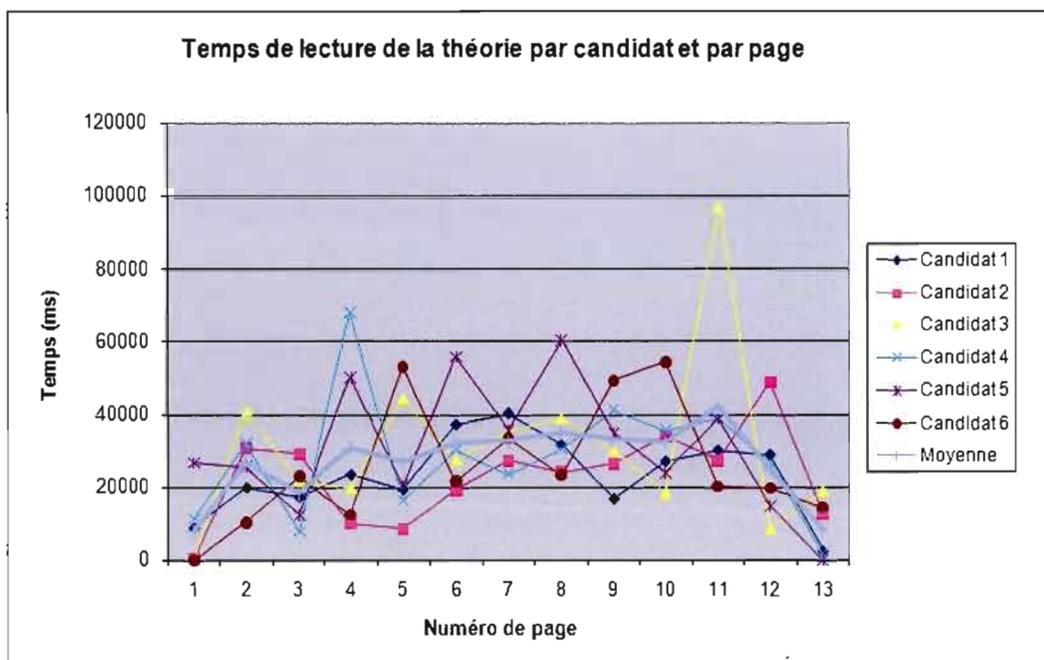


Figure 6.1 Temps de lecture de la théorie par candidat.

Le temps de lecture correspond aux mesures qui ont été prises par l'oculomètre, dans certains cas nous avons obtenu un temps de lecture nul bien que le temps

d'affichage de la page n'était pas nul et tous les candidats ont affirmé avoir lu toutes les pages, ceci peut être causé par :

- L'impossibilité d'identifier la position de l'œil : le candidat regardait ailleurs qu'à la zone du texte de la théorie ou ses yeux sont fermés.
- Le candidat a changé brusquement de position ou a quitté le champ de l'oculomètre.
- Les yeux effectuaient des mouvements rapides : trop de saccades et pas de fixations.
- Le signal capté était trop faible.

Nous avons complété les données du tableau 6.2 avec celles du tableau 6.1 pour avoir en même temps le nombre de tentatives et le nombre d'aides reçues pour chaque candidat. Nous présentons ci-après l'analyse du temps de lecture et sa relation avec la pupille, la RPG, l'aide et le nombre de tentatives (ce qui revient à la note).

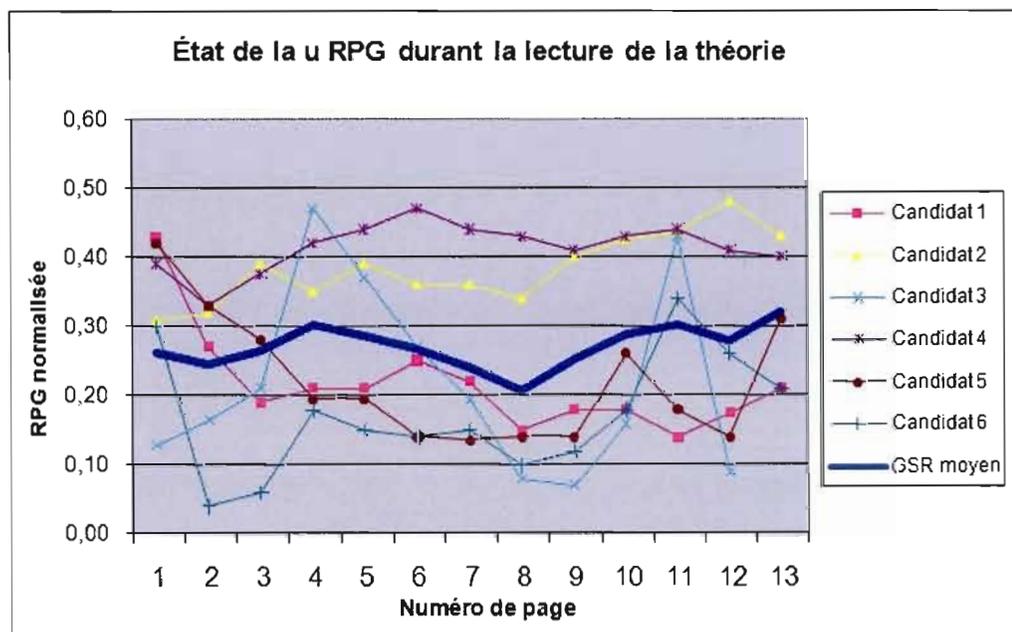


Figure 6.2 Variation de la RPG des candidats durant la lecture de la théorie.

Nous avons calculé la RPG moyenne normalisée pour chaque candidat lors de la lecture de chaque page. Les variations du niveau de la RPG de l'ensemble des candidats sont présentées par la figure 6.2. Nous avons récapitulé les moyennes des RPG et déterminé les écarts types dans le tableau 6.3. Nous avons remarqué que le stress moyen pour l'ensemble était presque stable, il variait entre 0.21 et 0.32 comme le montre la figure 6.2. Par contre, certains candidats ont présenté des variations plus importantes que d'autres, nous avons remarqué que le candidat 3 présentait une variation assez importante comparée à la moyenne.

Tableau 6.3 Variation de la RPG durant la lecture de la théorie

Candidat	RPG Moyenne	Écart type	Nombre de pages
1	0,22	0,07	13
2	0,38	0,05	13
3	0,23	0,14	13
4	0,42	0,03	13
5	0,21	0,07	13
6	0,16	0,08	13
Moyenne	0,27	0,12	

Nous avons illustré les données du tableau précédent par le graphique de la figure 6.3. Nous rappelons que la mesure de la RPG est une mesure qui dépend de chaque candidat, chacun avait sa propre réactivité.

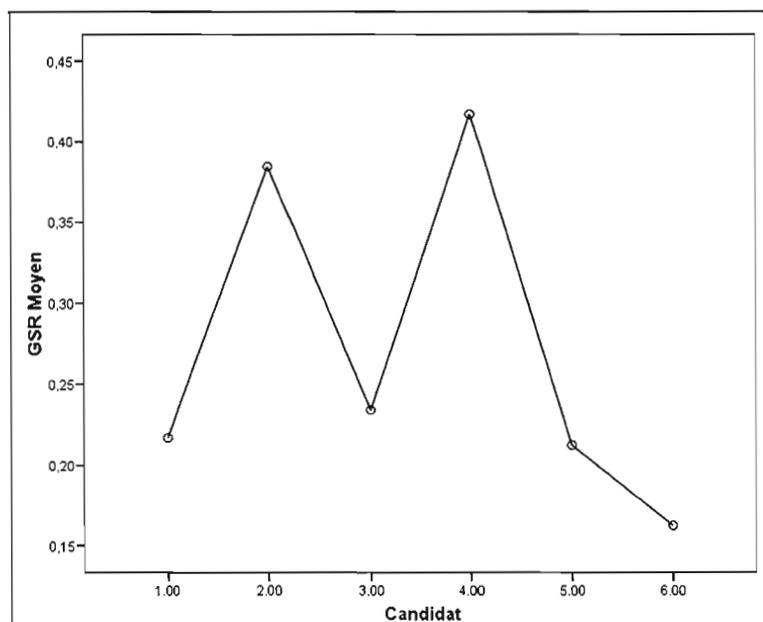


Figure 6.3 Niveau moyen de la RPG des candidats durant la lecture de la théorie.

Nous avons cherché si les différences du niveau de la RPG entre les candidats étaient statistiquement significatives. Le tableau 6.4 montre que le seuil de signification est nul, on peut conclure que statistiquement chaque individu avait une variation de la RPG différente des autres. Il en résulte que nous n'avons pas trouvé de ressemblance significative chez l'ensemble des candidats. Statistiquement, nous avons pu conclure qu'il y a une différence significative du niveau moyen de la RPG entre les six individus.

Tableau 6.4 Résultat ANOVA de la différence du niveau moyen de la RPG

Source	df	Mean Square	F	p-value
Between Groups	5	0,140	20,845	0,000
Within Groups	72	0,007		
Total	77			

R1-1 Analyse de la variation de l'état de stress lors de la lecture de la théorie :

Il s'agit de vérifier l'existence d'un lien entre l'état de stress de chaque candidat et le temps de lecture de la théorie. Autrement dit, est-ce que la durée de lecture a une influence sur le stress des différents candidats? Nous avons récapitulé les résultats d'analyse dans le tableau 6.5. Pour les candidats 2, 5 et 6, nous avons remarqué une corrélation significative entre le RPG et le temps de lecture de la théorie. Cette corrélation est positive dans le cas des candidats 2 et 6, mais elle est négative pour le candidat 5. Pour les candidats 1, 3 et 4, la corrélation est non significative au seuil de 5%. Cette divergence dans les résultats en fonction du candidat ne nous permettait pas de tirer une conclusion évidente sur l'ensemble de la population.

Tableau 6.5 Résultat de la corrélation entre la RPG et le temps de lecture de la théorie par candidat

Candidat	Pearson Correlation	P-value
1	-0,379	0,101
2	(*) 0,561	0,023
3	0,401	0,087
4	0,250	0,205
5	(*) -0,566	0,022
6	(*) 0,514	0,036

(*) indique une corrélation significative au seuil de 5%

Dans le but d'étudier le comportement de l'ensemble des candidats et de chercher une ressemblance dans leurs comportements, nous avons analysé le lien entre la lecture de la théorie et le niveau de la RPG pour tous les candidats. Le tableau 6.6 démontre l'absence de lien, nous avons trouvé un coefficient de corrélation $r = 0.083$ avec une probabilité $p = 0.235$. Ceci confirme bien qu'il n'y a pas une ressemblance significative chez l'ensemble des candidats.

Tableau 6.6 Corrélation entre la RPG et le temps de lecture de la théorie pour tous les candidats

		Temps de lecture de la théorie	RPG
Temps de lecture de la théorie	Pearson Correlation	1	0,083
	Sig. (1-tailed)		0,235
	N	78	78
RPG	Pearson Correlation	0,083	1
	Sig. (1-tailed)	0,235	
	N	78	78

En somme, nous avons conclu que pour la population étudiée, chaque candidat se comportait d'une manière différente des autres et qu'il nous était impossible d'établir un lien entre les durées de lecture de la théorie et de la variation de l'état de stress des candidats.

R1-2 : Analyse de la variation de la dilatation de la pupille lors de la lecture de la théorie :

Il s'agit de vérifier si la dilatation de la pupille du candidat est liée au temps de lecture de la théorie. Nous avons récapitulé les résultats dans le tableau 6.7.

Nous avons pu conclure qu'il existe une corrélation linéaire négative quasi significative entre la dilatation de la pupille et le temps de lecture de la théorie ($r = -0,152$; $p = 0,09$). Autrement dit, une augmentation du temps de lecture se traduit vraisemblablement par une baisse de la dilatation de la pupille. Nous rappelons que la dilatation de la pupille est rattachée à la difficulté de la tâche et à la fatigue.

Tableau 6.7 Résultat de la corrélation entre le temps de lecture de la théorie et la pupille pour tous les candidats

		Temps de lecture de la théorie	Pupille
Temps de lecture de la théorie	Pearson Correlation	1	-0,152
	Sig. (1-tailed)		0,092
	N	78	78
Pupille	Pearson Correlation	-0,152	1
	Sig. (1-tailed)	0,092	
	N	78	78

Pour notre expérimentation, nous avons conclu que plus le candidat passe de temps à lire la théorie plus la dilatation de sa pupille se réduit, donc plus la tâche devient facile ou sa compréhension augmente. Nous avons formulé la relation suivante :

R1-2 : Si le temps de lecture de la théorie augmente

Alors le diamètre de la pupille se réduit

Cette relation peut bien expliquer qu'une lecture de la théorie durant une période adéquate facilite la compréhension du cours. La lecture durant une courte période se traduit une pupille plus dilatée, donc exprime une difficulté d'apprentissage. Ceci peut être exploité par un agent tuteur artificiel qui mesure continuellement le temps alloué au regard de la théorie et pourrait décider de proposer au candidat de prolonger la durée de lecture.

R1-3 : Recherche si la durée de lecture de la théorie influence la performance

Il s'agit de vérifier si le temps de lecture de la théorie influence le nombre de tentatives pour trouver la bonne solution. Nous avons cherché à savoir si les étudiants

qui ont passé plus de temps à lire la théorie ont fait moins de tentatives pour trouver la bonne solution. Les données ont été analysées et présentées dans le tableau 6.8.

Tableau 6.8 Résultat de la corrélation entre le temps de lecture de la théorie et le nombre de tentatives pour tous les candidats

		Temps de lecture de la théorie	Nombre de tentatives
Temps de lecture de la théorie	Pearson Correlation	1	-0,173
	Sig. (1-tailed)		0,064
	N	78	78
Nombre de tentatives	Pearson Correlation	-0,173	1
	Sig. (1-tailed)	0,064	
	N	78	78

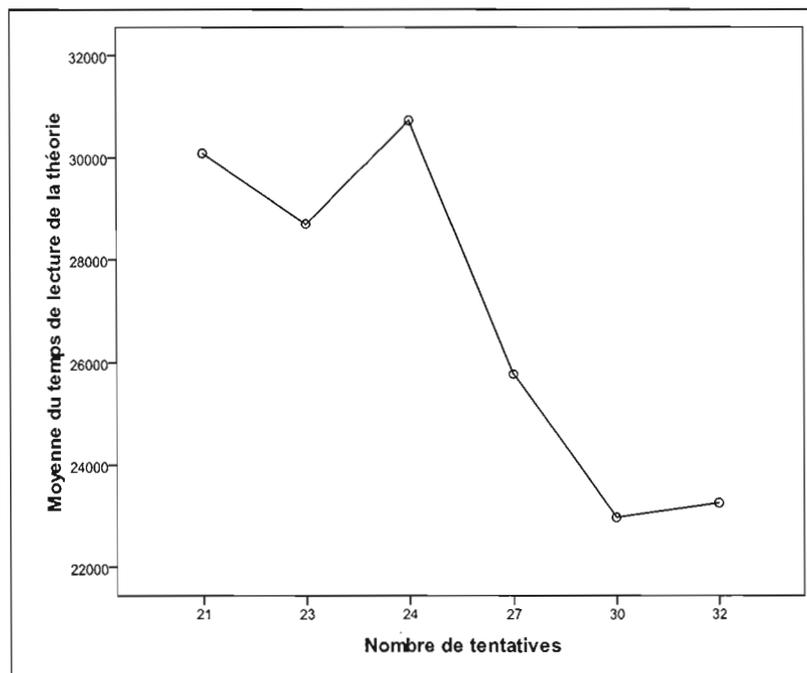


Figure 6.4 Temps moyen de lecture de la théorie en fonction du nombre de tentatives

Nous avons déduit qu'il existe une corrélation linéaire négative quasi

significative entre le temps de lecture de la théorie et le nombre de tentatives ($r = -0,173$; $p = 0,06$). Autrement dit, on peut affirmer qu'une augmentation du temps de lecture est associée à une réduction du nombre de tentatives. La figure 6.4 illustre le temps moyen de lecture de la théorie par page en fonction du nombre de tentatives effectuées.

Ces données peuvent servir dans une étape ultérieure à établir un temps seuil de lecture de la partie théorique dans le but de s'assurer que le contenu nécessaire a été bien lu avant de passer à l'étape de résolution de problèmes. Par conséquent, ceci devrait augmenter la réussite des problèmes posés en moins de tentatives.

D'après cette analyse, nous remarquons que la lecture de la théorie durant une courte période va contribuer à augmenter le nombre de tentatives lors de la résolution des problèmes. Nous pouvons formuler la relation suivante :

R1-3 : Si le temps de lecture de la théorie est inférieur à un temps minimal

Alors le nombre de tentatives pour résoudre le problème augmente

Cette relation peut être exploitée par le tuteur artificiel qui va essayer d'inciter l'apprenant à lire la théorie durant une période « raisonnable ».

R1-4 : Recherche de lien entre la durée de lecture de la théorie et le nombre de fois d'aides reçues

Il s'agit de vérifier si le temps de lecture de la théorie influence le nombre de fois d'aides reçues pour trouver la bonne solution des problèmes. Nous avons cherché à savoir si les candidats qui ont passé plus de temps à lire la théorie ont eu moins d'aides pour trouver la bonne solution. Le tableau 6.9 présente les résultats d'analyse : on peut conclure qu'il existe un lien de corrélation quasi significatif entre le temps passé à lire la théorie et le nombre d'aides reçus ($r=-0,146$; $p=0,101$). Il semble que plus le candidat passe de temps à lire la théorie moins il a recours à l'aide.

Tableau 6.9 Résultat de la corrélation entre le temps de lecture de la théorie et le nombre de fois d'aides reçues pour tous les candidats

		Temps de lecture de la théorie	Nombre de fois d'aides reçues
Temps de lecture de la théorie	Pearson Correlation	1	-0,146
	Sig. (1-tailed)		0,101
	N	78	78
Nombre de fois d'aides reçues	Pearson Correlation	-0,146	1
	Sig. (1-tailed)	0,101	
	N	78	78

Ces résultats appuient l'idée de déterminer un temps minimal (nécessaire) pour la lecture de la partie théorique. On remarque qu'un temps minimal devrait réduire le nombre d'aides requises par le candidat. D'après cette analyse, nous remarquons que la lecture de la théorie durant une courte période va nécessiter plus d'interventions du tuteur pour fournir de l'aide. Nous pouvons formuler la relation suivante :

R1-4 : Si le temps de lecture de la théorie est inférieur à un temps minimal

Alors le nombre d'interventions du tuteur pour aider augmente

Nous avons récapitulé les résultats des analyses relatives aux relations R1-1 à R1-4 dans le tableau 6.10 qui présente une synthèse des résultats. Une illustration graphique est présentée dans la figure 6.5. Il ressort aussi de ce tableau, que le diamètre de la pupille est positivement corrélé avec le nombre de tentatives et avec le nombre d'aides reçus. Autrement dit, plus le candidat effectue de tentatives plus le diamètre de sa pupille se dilate, de même plus il reçoit d'aide plus le diamètre de sa pupille se dilate. Ce qui nous a conduits à formuler les relations suivantes :

R1-4-1 : Si le diamètre de la pupille augmente

Alors le nombre de tentatives augmente

R1-4-2 : Si le diamètre de la pupille augmente

Alors le nombre d'aides augmente

Tableau 6.10 Synthèse des résultats des relations R1-1, R1-2, R1-3 et R1-4

		Temps de lecture de la théorie	Pupille	Niveau de stress	Nombre de tentatives	Nombre d'aides
Temps de lecture de la théorie	Pearson Correlation	1	-0,152*	0,083	-0,173*	-0,146*
	Sig. (1-tailed)		0,092	0,235	0,064	0,101
	N	78	78	78	78	78
Pupille	Pearson Correlation	-0,152*	1	0,120	0,380**	0,672**
	Sig. (1-tailed)	0,092		0,147	0,000	0,000
	N	78	78	78	78	78
Niveau de stress	Pearson Correlation	0,083	0,120	1	-0,153*	-0,144
	Sig. (1-tailed)	0,235	0,147		0,091	0,105
	N	78	78	78	78	78
Nombre de tentatives	Pearson Correlation	-0,173	0,380**	-0,153	1	0,843**
	Sig. (1-tailed)	0,064	0,000	0,091		0,000
	N	78	78	78	78	78
Nombre d'aides	Pearson Correlation	-0,146*	0,672**	-0,144	0,843**	1
	Sig. (1-tailed)	0,101	0,000	0,105	0,000	
	N	78	78	78	78	78

(*) : Indique une corrélation significative au seuil de 10%

(**) : Indique une corrélation significative au seuil de 5%

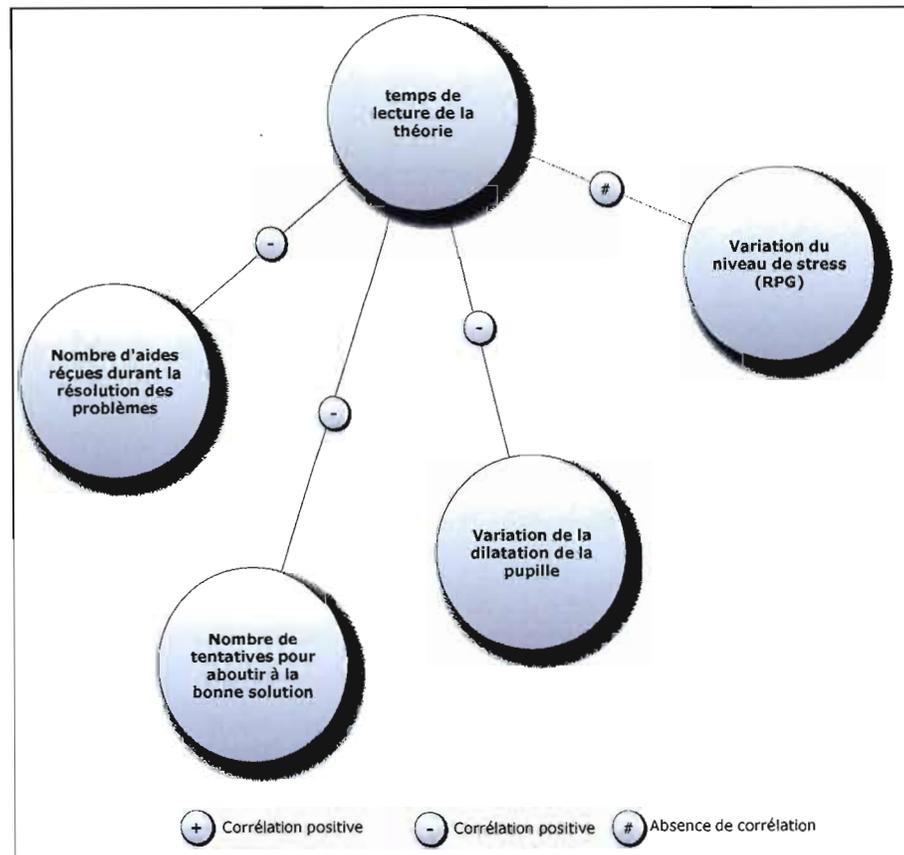


Figure 6.5 Récapitulation des relations R1-i

Nous avons également remarqué une corrélation négative entre le niveau de stress et le nombre de tentatives, ce qui signifiait que plus le nombre de tentatives augmente, plus le niveau de stress diminue. Ces résultats semblaient en apparence contre-intuitifs, nous les avons expliqués par le fait que le nombre de solutions possibles pour chaque problème était de quatre, donc les chances d'aboutir à la bonne solution augmentaient en fonction du nombre de tentatives. Un candidat qui choisissait ses solutions par hasard était sûrement sûr de trouver la bonne solution indépendamment du nombre de tentatives.

Un dernier constat qui ressort est la corrélation positive entre le nombre d'aides et le nombre de tentatives, ce qui est logique dans la mesure où plus le candidat se trompe plus il va avoir recours à de l'aide afin de trouver la bonne solution.

Conclusion :

Dans cette partie, nous avons étudié l'existence de liens entre le temps passé à lire la théorie et les quatre facteurs suivants :

1. La variation de la RPG;
2. La variation du diamètre de la pupille;
3. Le nombre de tentatives pour trouver la bonne solution du problème;
4. Le nombre d'aides reçues durant la résolution des problèmes.

Nous retenons que moins le candidat passe de temps à lire la théorie plus la dilatation de sa pupille augmente, plus il utilise de tentatives avant de trouver la bonne solution et plus il a recours à l'aide.

6.4.2 R2 : La résolution des problèmes

Après la lecture de la théorie, le candidat passe à l'étape de résolution des problèmes. Il s'agit de 14 problèmes au total. Pour les 7 premières, le candidat reçoit une rétroaction (message texte) pour lui expliquer pourquoi sa solution est incorrecte ou bien pour le féliciter pour sa bonne solution. Les 7 questions suivantes sont des questions de synthèse suite auxquelles, l'étudiant reçoit un message informant si sa réponse est bonne ou non. Dans cette partie, nous étudions le comportement du candidat lors de la résolution des problèmes : le temps qu'il passe à lire l'énoncé, le temps qu'il passe à regarder chaque choix de réponse, s'il décide de retourner voir la partie théorique ou d'utiliser le simulateur.

Nous avons cherché des relations formulées ci-après :

R2-1 : Recherche de lien entre le temps passé à lire l'énoncé et le nombre de tentatives pour résoudre le problème :

Nous avons proposé une série de problèmes aux candidats, chaque problème comportait un énoncé et quatre choix de solutions. Nous avons étudié l'existence d'un lien entre le temps de lecture de l'énoncé et le nombre de tentatives aboutissant à la bonne solution du problème.

Le candidat lisait l'énoncé du problème, ensuite il lisait les choix de solutions proposées. Après un certain temps de lecture et de réflexion et éventuellement l'utilisation du simulateur ou la relecture de la théorie, il sélectionne une solution. Ce temps variait d'un candidat à l'autre. Nous avons remarqué que certains candidats se dépêchaient à répondre sans passer un temps nécessaire à la lecture et la compréhension de l'énoncé du problème à résoudre en choisissant la mauvaise solution, tandis que d'autres trouvaient la bonne solution en passant peu de temps à lire l'énoncé. Dans le but de chercher si le temps passé à lire l'énoncé améliore le taux de réussite, nous avons effectué une comparaison des temps de lecture de l'énoncé de chaque problème chez tous les candidats. Ceci nous a permis de voir si les candidats qui ont passé plus de temps à lire ont fait moins de tentatives. Nous avons présenté les résultats dans la figure 6.6, nous avons remarqué qu'il existe une relation quadratique entre le temps de lecture de l'énoncé et le nombre de tentatives effectuées (rho de Spearman²⁸ $\rho = 0.225$; $p = 0.02$; $N = 84$): les candidats ayant répondu correctement dès la première tentative ont la moyenne de temps de lecture de l'énoncé la plus faible, cela peut être expliqué par le fait qu'ils étaient confiants d'avoir la bonne solution assez rapidement. Pour ceux qui ont fait deux ou trois tentatives, ils ont passé assez de temps de lecture de l'énoncé, ceci est probablement dû à une prudence plus importante pour réussir le problème. Ceux ayant épuisé le nombre de tentatives n'ont pas eu besoin de relire l'énoncé, nous pouvons penser que

²⁸ «Indice statistique compris entre - 1 et +1 qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation monotone (d'ordre) entre deux variables ordinales». <http://www.irdp.ch/edumetrie/lexique.htm>

ces candidats ont opté pour une stratégie de réponse par élimination au lieu de bien lire et comprendre l'énoncé du problème, en effet, il n'y a plus qu'un seul choix menant à la bonne solution.

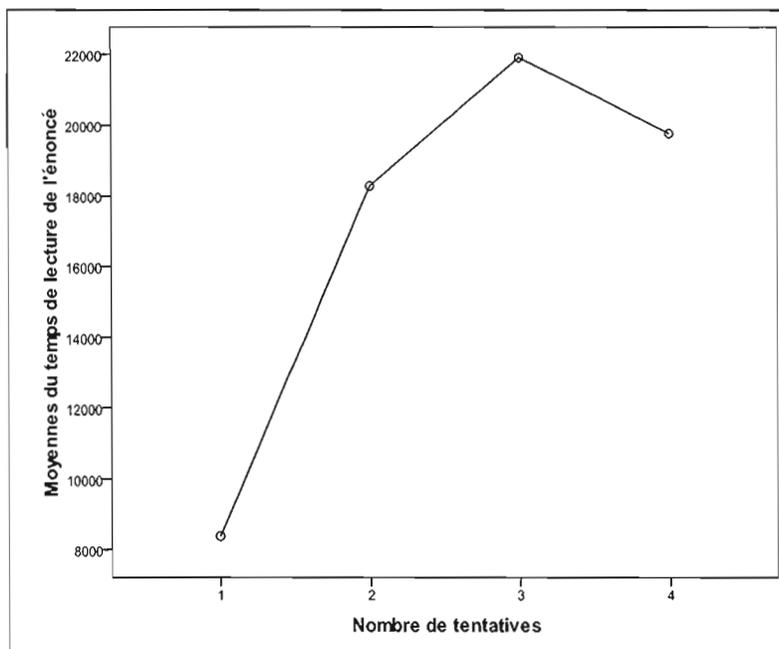


Figure 6.6 Temps moyen de lecture de l'énoncé et le nombre de tentatives.

Tableau 6.11 Résultats de la corrélation entre le nombre de tentatives et le temps de lecture de l'énoncé

			Nombre de tentatives	Temps de lecture de l'énoncé
Spearman's rho	Nombre de tentatives	Correlation Coefficient	1,000	0,225*
		Sig. (1-tailed)	.	0,020
		N	84	84
	Temps de lecture de l'énoncé	Correlation Coefficient	0,225*	1,000
		Sig. (1-tailed)	0,020	.
		N	84	84

Le tableau 6.11 montre l'existence d'un lien entre le nombre de tentatives et le temps de lecture de l'énoncé. Un temps assez long signifie que le candidat avait des difficultés à trouver la bonne solution. Nous avons formulé par conséquent la relation suivante :

R2-1: Si le temps de lecture de l'énoncé dépasse un temps minimal

Alors il y a plus de chances que le candidat effectue plusieurs tentatives

On peut déduire qu'il existe un temps minimum qui devra être alloué à la lecture de l'énoncé. Un temps prolongé permet de prédire que le candidat pourrait faire plusieurs tentatives.

R2-2 : Recherche de lien entre le temps passé à lire les choix de solutions et le nombre de tentatives

Nous avons effectué une analyse similaire entre le temps de lecture des choix de solutions et le nombre de tentatives. Les résultats montrent que la relation entre le temps de lecture des choix de solutions et le nombre de tentatives est similaire à celle retrouvée avec temps de lecture de l'énoncé (rho de Spearman $\rho = 0.352$; $p = 0.001$; $N = 84$) comme le montre le tableau 6.12.

Tableau 6.12 Résultats de la corrélation entre le nombre de tentatives et le temps de lecture des choix de solution

			Nombre de tentatives	Temps de lecture des choix de solution
Spearman's rho	Nombre de tentatives	Correlation Coefficient	1,000	0,352**
		Sig. (1-tailed)	.	0,001
		N	84	84
	Temps de lecture des choix de solution	Correlation Coefficient	0,352**	1,000
		Sig. (1-tailed)	0,001	.
		N	84	84

En effet, la relation entre le temps de lecture des choix de solutions et le nombre de tentatives est illustrée par la courbe dans la figure 6.7. Les candidats ayant passé le moins de temps à lire les choix de solutions ont répondu correctement du premier coup, nous pouvons conclure qu'ils étaient confiants de leur solution et qu'ils n'ont pas eu besoin de plus de temps pour réfléchir. Ceux qui ont passé trop de temps ne pouvaient pas répondre correctement de la première tentative, nous avons remarqué qu'ils ont passé plus que le double du temps consommé par les répondants dès la première tentative.

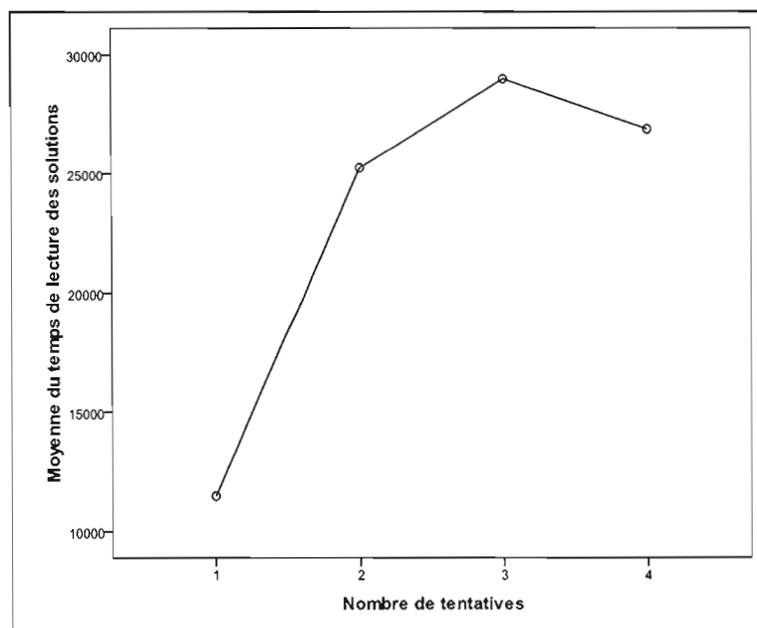


Figure 6.7 Temps de lecture des choix de solutions en fonction du nombre de tentatives

De la même façon, nous avons formulé la relation suivante :

R2-2 : Si le temps de lecture des choix de solutions dépasse un seuil

Alors il y a plus de chances que le candidat effectue plusieurs tentatives

Par conséquent, une lecture prolongée des choix des solutions proposées permet de prédire que l'apprenant a plus de chance de faire plus de tentatives lors de la résolution des problèmes.

R2-3 : Recherche de lien entre le temps cumulé passé à lire la théorie et le nombre de tentatives

En plus de la première étape consacrée à la lecture de la théorie, les candidats pouvaient relire la théorie à la demande. Nous avons calculé le temps cumulé alloué à la lecture de la théorie et cherché l'existence d'un lien avec le nombre de tentatives. Lors du commencement de la partie résolution des problèmes, tous les candidats avaient déjà accumulé une certaine connaissance de la matière après la lecture de la théorie. Chaque fois qu'un candidat retourne regarder la théorie, nous accumulons ce temps. Nous avons représenté les données dans la figure 6.8, l'évolution du temps de lecture de la théorie a évolué en moyenne de 15% par rapport au temps initial.

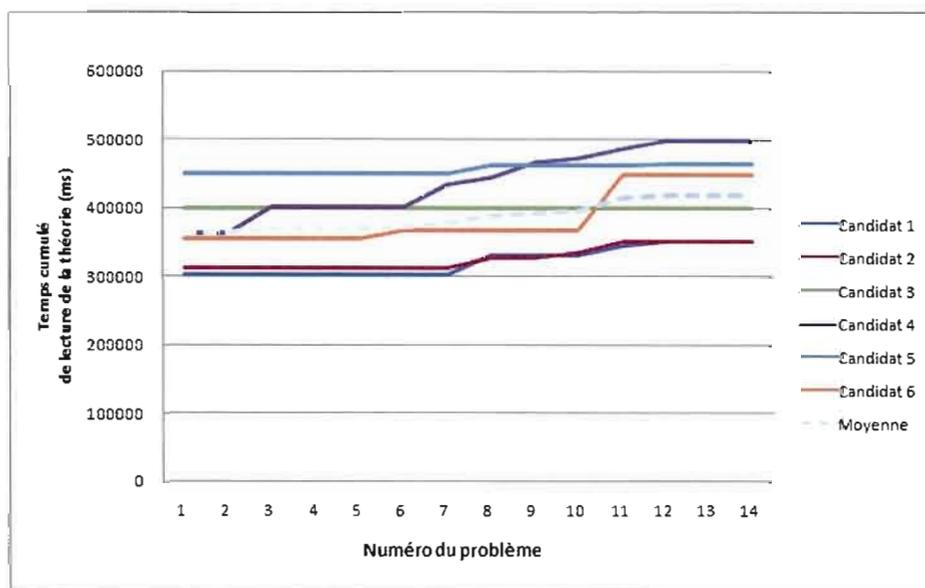


Figure 6.8 Temps de lecture de la théorie cumulé pour les différents problèmes

Les résultats démontrent l'existence d'une corrélation négative statistiquement significative ($r = -0.211$; $p = 0.027$) entre le temps cumulé passé à lire la théorie et le nombre de tentatives. Autrement dit, plus le candidat a cumulé de temps à lire la théorie moindre était le nombre de tentatives avant d'obtenir la bonne solution (tableau 6.13).

Tableau 6.13 Résultats de la corrélation entre le temps cumulé de lecture de la théorie et le nombre de tentatives

		Temps cumulé de lecture de la théorie	Nombre de tentatives
Temps cumulé de lecture de la théorie	Pearson Correlation	1	-0,211*
	Sig. (1-tailed)		0,027
	N	84	84
Nombre de tentatives	Pearson Correlation	-0,211*	1
	Sig. (1-tailed)	0,027	
	N	84	84

La figure 6.9 illustre la variation du temps cumulé en fonction du nombre de tentatives. Les candidats ayant passé plus de temps étaient capables de résoudre les problèmes dès la première tentative.

Nous avons par conséquent formulé la relation suivante :

ℛ2-3 Si le temps cumulé de lecture de théorie est supérieur à un seuil

Alors le candidat effectue moins de tentatives pour la résolution

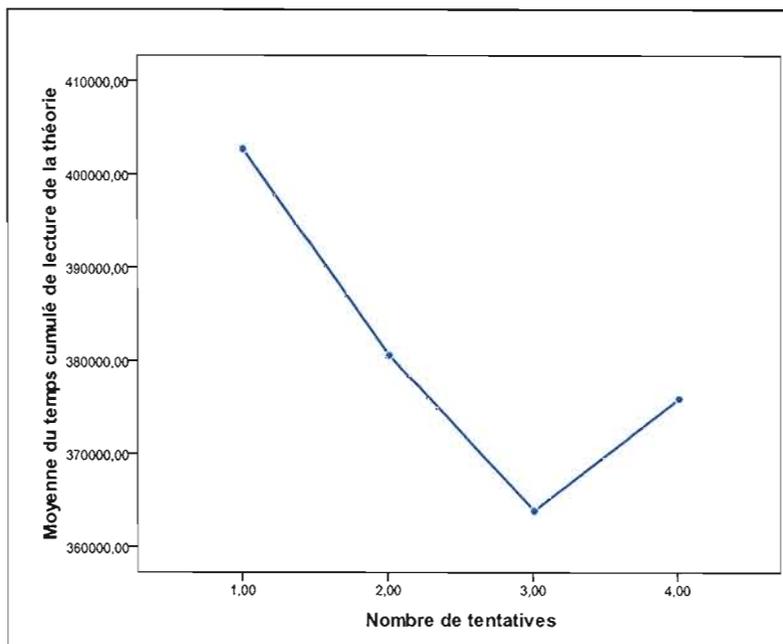


Figure 6.9 Temps moyen cumulé de lecture de la théorie et l'obtention de la bonne solution

R2-4 : Recherche de lien entre le temps cumulé passé à utiliser le simulateur et le nombre de tentatives

D'une manière similaire que la relation précédente, nous avons cherché si le temps cumulé passé à utiliser le simulateur est lié à l'obtention de la bonne solution. Ici nous cumulons le temps passé à utiliser le simulateur depuis le début jusqu'à la proposition d'une solution. Nous avons présenté les analyses dans le tableau 6.14.

Tableau 6.14 Résultat de la corrélation entre le temps cumulé à utiliser le simulateur et le nombre de tentatives

		Nombre de tentatives	Temps de simulation
Nombre de tentatives	Pearson Correlation	1	-0,088
	Sig. (1-tailed)		0,213
	N	84	84
Temps de simulation	Pearson Correlation	-0,088	1
	Sig. (1-tailed)	0,213	
	N	84	84

Les données démontrent l'absence d'un lien de corrélation entre le temps cumulé passé à utiliser le simulateur et le nombre de tentatives ($r = -0.088$, $p = 2.13$). Ce qui laisse croire que l'utilisation ou non du simulateur n'a pas forcément une influence directe sur l'obtention de la bonne solution.

R2-5 : Recherche de lien entre la variation de la RPG et le nombre de tentatives

Nous avons cherché dans cette étape l'existence d'un lien entre la RPG et la tendance à répondre correctement, ce qui se traduit par le nombre de tentatives. Les analyses présentées dans le tableau 6.15 nous indiquent qu'il n'y a pas de corrélation linéaire entre la RPG et le nombre de tentatives menant à la bonne solution.

Tableau 6.15 Résultat de la corrélation entre le niveau de stress et le nombre de tentatives.

		Niveau de stress (RPG)	Nombre de tentatives
Niveau de stress (RPG)	Pearson Correlation	1	-0,087
	Sig. (2-tailed)		0,431
	N	84	84
Nombre de tentatives	Pearson Correlation	-0,087	1
	Sig. (2-tailed)	0,431	
	N	84	84

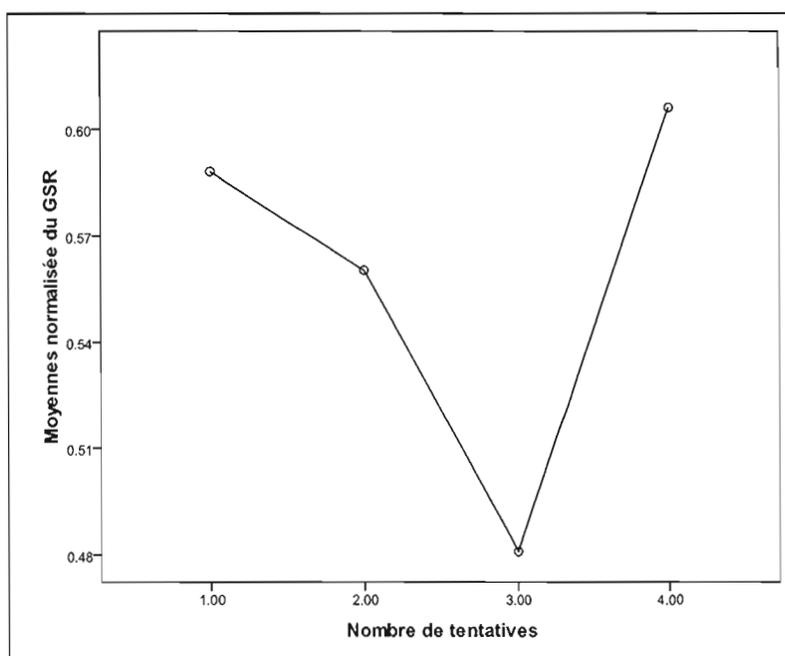


Figure 6.10 Variation de la RPG moyenne en fonction du nombre de tentatives

Les résultats ne nous ont pas permis de trouver des relations à partir de ces analyses, statistiquement, nous n'avons pas trouvé de lien entre la variation du niveau de la RPG et le nombre de tentatives pour la résolution des problèmes.

Nous avons effectué une représentation graphique de la variation de la RPG en fonction du nombre de tentatives, présentée dans la figure 6.10. On a remarqué que les candidats ayant réussi de la première tentative avaient la plus haute RPG moyenne. Nous avons expliqué ce stress élevé par le fait de vouloir réussir du premier coup et donc de prouver sa compétence. La RPG diminuait pour ceux ayant fait deux ou trois tentatives; nous avons supposé qu'ils avaient un doute sur la première solution et que ce doute diminue avec le nombre de tentatives. Le niveau de stress augmentait fortement pour ceux ayant effectué quatre tentatives, donc épuisé toutes les possibilités et manifestement ils se rendaient compte de l'échec dans ce problème.

R2-6 : Recherche de lien entre le temps passé à lire chaque choix de solution et le choix sélectionné :

Dans cette section, nous avons cherché si le temps passé à lire chaque choix de solution est lié à la sélection du choix. Nous avons effectué cette analyse dans le but d'étudier la possibilité de prédire la solution que le candidat va choisir à partir du temps de regard des solutions proposées²⁹. Nous avons présenté un échantillon de données dans le tableau 6.16, par exemple pour le problème numéro 3, le candidat a effectué 3 tentatives avant de trouver la bonne solution. Lors de la première tentative, il a passé plus de temps à lire la solution 3, et c'était la solution choisie. Lors de la deuxième tentative, il a passé plus de temps à lire le choix 4, et c'était la solution choisie. Lors de la troisième tentative, il a fait le choix numéro 2 correspondant à la bonne solution bien qu'il ne s'agissait pas du temps de regard le plus long.

²⁹ Les résultats de cette recherche ont été présentés à l'ACFAS 2010

Tableau 6.16 Exemple de données collectées sur le choix de solutions

Problème	Temps choix 1	Temps choix 2	Temps choix 3	Temps choix 4	Solution choisie
2	4728	4092	10651	2747	2
2	1183	1998	1015	2293	4
3	1132	1099	3979	3562	3
3	1449	2914	2396	3431	4
3	3832	2600	4200	4512	2
5	1365	2833	10242	883	1
7	1198	2533	4977	1182	3
9	1548	2932	7225	1816	2

Avant de valider un choix de solution, le candidat lisait les choix proposés. Le temps de lecture de chaque choix varie d'un candidat à l'autre. Le candidat peut valider son choix après la lecture de l'un ou de tous les choix proposés. Nous avons analysé le lien entre le temps passé à lire chaque choix et sa sélection. Les analyses sont présentées dans le tableau 6.17.

Tableau 6.17 Résultat temps moyen passé à lire chaque choix de solution et le choix sélectionné

		Temps passé à lire le choix numéro :			
Solution choisie		1	2	3	4
1	Moyenne	3055	1587	2748	2775
	N	36	36	36	36
	Écart type	4296	2221	3933	3903
2	Moyenne	1594	2877	2572	2816
	N	40	40	40	40
	Écart type	1836	3650	3327	2746
3	Moyenne	1914	1734	4469	2470
	N	38	38	38	38
	Écart type	2898	2270	4602	2173
4	Moyenne	1493	2372	2420	5629
	N	36	36	36	36
	Écart type	2839	3205	3943	7385
Total	Moyenne	2001	2157	3059	3394
	N	150	150	150	150
	Écart type	3094	2935	4017	4598

Le tableau 6.17 rapporte le temps moyen passé à lire chacun des choix de solution en fonction de la solution choisie. Par exemple, le temps moyen passé à lire le choix 1 est égal à 3055 dans le groupe ayant choisi la solution 1, il est égal à 1594 dans le groupe ayant choisi la solution 2 et égal à 1493 dans le groupe ayant choisi la solution 4. Il ressort de ce tableau que les candidats ont passé, en moyenne, plus de temps à lire le choix de la solution qu'ils choisiront. Autrement dit, il semble que les candidats s'attardent plus dans la lecture du choix qu'ils vont retenir, ce qui laisse croire qu'ils prennent un certain temps de réflexion avant de valider leur choix de

solution. La figure 6.11 schématise ce résultat. Le sommet de chacune des courbes du « temps passé à lire le choix x » coïncide bien avec le choix x retenu.

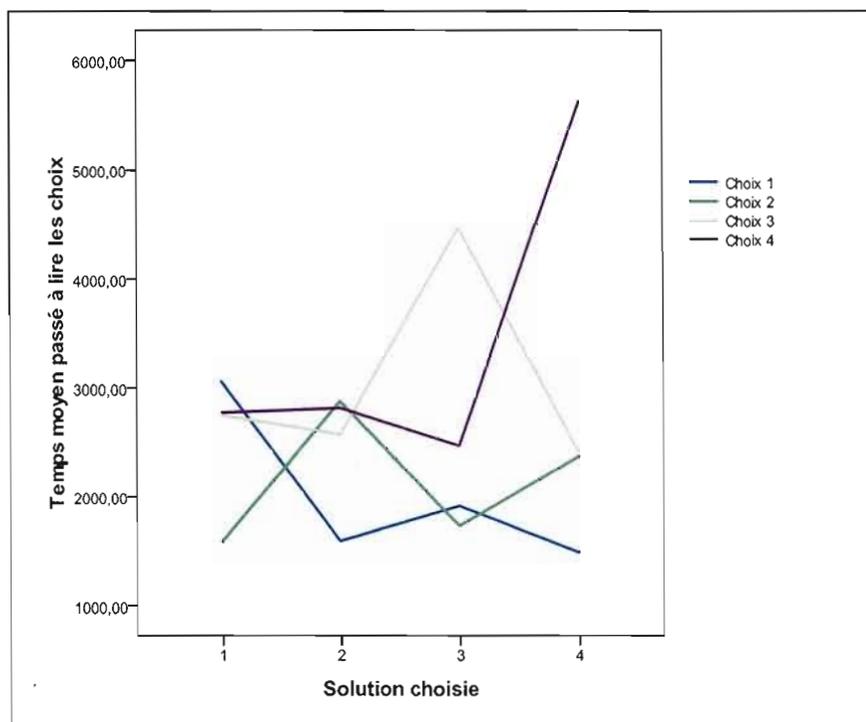


Figure 6.11 Temps moyen passé à lire chaque choix de solution et le choix sélectionné

Pour confirmer l'existence d'une différence statistiquement significative de la moyenne du temps passé à lire chacun des choix, nous avons procédé à une comparaison de moyenne de chaque choix de solution, comme présenté dans le tableau 6.18. Par exemple, la 1re ligne présente la comparaison de la moyenne du temps passé à lire le choix 1 sachant que le candidat a choisi la solution n° 1 versus le temps passé à lire le choix 1 sachant que le candidat a choisi la solution n° 2. Il ressort des résultats qu'il existe une différence statistiquement significative entre « le temps moyen passé à lire le choix n° 1 sachant que le candidat a choisi la solution n° 1 » et « le temps moyen passé à lire le choix 2 sachant que le candidat a choisi la solution n° 2 ».

Dans l'ensemble, les résultats indiquent l'existence de différences statistiquement significatives ($p < 0.1$) entre toutes les moyennes, sauf pour deux cas :

1. Temps passé à lire le choix n° 1 et solution choisie = 1 et temps passé à lire le choix n° 1 et solution choisie = 3; autrement dit, les candidats en moyenne ont passé un temps égal à lire le choix n° 1 lorsqu'ils ont choisi la solution n° 1 et lorsqu'ils ont choisi la solution n° 3.

Tableau 6.18 Résultats de la comparaison de moyenne du temps passé à lire le choix

Variable dépendante	(I) Solution choisie	(J) Solution choisie	Différence des moyennes (I-J)	Erreur standard	Sig.	Intervalle de confiance à 95%	
						Borne inférieure	Limite supérieure
Temps passé à lire le choix 1	1	2	1462**	704	0,040	71	2853
		3	1142	712	0,111	-267	2550
		4	1563**	722	0,032	135	2990
Temps passé à lire le choix 2	2	1	1289*	671	0,056	-35	2613
		3	1143*	661	0,086	-163	2449
		4	505	670	0,452	-819	1829
Temps passé à lire le choix 3	3	1	1720*	923	0,064	-105	3545
		2	1897**	899	0,037	119	-120
		4	2050**	923	0,028	225	1955
Temps passé à lire le choix 4	4	1	2855**	1052	0,007	775	4935
		2	2813**	1026	0,007	786	4841
		3	3159**	1038	0,003	1107	5212

(**) Indique une différence significative au seuil de 5%

(*) Indique une différence significative au seuil de 10%

2. Temps passé à lire le choix n° 2 et solution choisie = 2 et temps passé à lire le choix n° 2 et solution choisie = 4, autrement dit, les candidats ont, en moyenne, passé un temps égal à lire le choix n° 2 lorsqu'ils ont choisi la solution n° 2 et lorsqu'ils ont choisi la solution n° 4.

Si nous ne tenons pas en compte de ces deux exceptions, nous pouvons ainsi retenir que, dans l'ensemble, plus le candidat passe de temps à lire un choix de solution plus il y a de chance qu'il va le retenir.

D'après ces analyses, nous avons émis la relation suivante :

Q2-6 Si le temps de lecture d'un choix de solution est supérieur aux autres

Alors le candidat choisira la solution lue le plus longtemps

En conclusion pour cette partie, nous avons récapitulé les résultats dans la figure 6.12. Nous avons trouvé un lien entre le nombre de tentatives et le temps de lecture de l'énoncé, le temps total de lecture des choix de solutions et le temps cumulé de la lecture de la théorie. Les analyses statistiques n'étaient pas concluantes quant aux liens avec le temps cumulé d'utilisation du simulateur et le niveau moyen de stress.

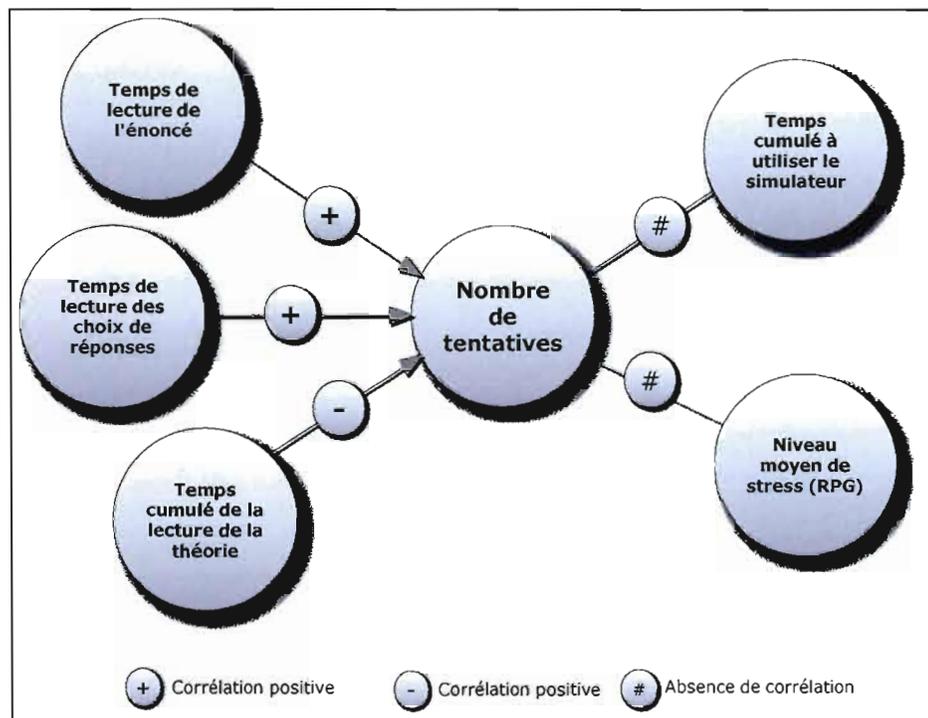


Figure 6.12 Récapitulatif des liens avec le nombre de tentatives

6.4.3 R3 : *L'influence de l'aide et les causes de son déclenchement*

Dans cette partie, nous avons essayé d'étudier le comportement du candidat quand il recevait de l'aide et de trouver des indicateurs sur son déclenchement. Le tuteur humain fournissait de l'aide à la demande ou bien quand il jugeait son intervention utile. Nous rappelons qu'il ne disposait pas des informations oculométriques ni physiologiques et qu'il ne voyait pas la face du candidat. Il disposait d'une copie de l'écran du candidat, donc regardait toutes les interactions du candidat, et pouvait dialoguer verbalement avec lui. Les interventions du tuteur pour aider les apprenants durant les expérimentations, ont été enregistrées. Nous avons revu et réécouté les enregistrements dans le but de catégoriser et de codifier l'aide proposée par le tuteur. Nous n'avons pas demandé au tuteur de justifier ses interventions, nous voulions assurer le déroulement des expérimentations dans un environnement aussi naturel que possible et sans le perturber ou le déconcentrer. Par conséquent, nous ne disposions pas des causes éventuelles de chaque intervention et nous avons essayé de trouver des indicateurs à partir des données.

Dans cette partie, nous avons analysé les données collectées et essayé de vérifier l'existence des relations suivantes :

R3-1 : Chercher l'influence de l'aide sur le niveau de la RPG

Nous avons pris les mesures de la RPG durant la résolution de problèmes et essayé de vérifier si l'aide fournie avait une influence sur de la RPG. Lors de nos analyses statistiques, nous avons effectué une comparaison de la moyenne entre le niveau de stress dans le groupe de candidats ayant reçu une aide versus ceux n'ayant pas reçu une aide. Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 6.19 et la figure 6.13. La moyenne normalisée du niveau de stress chez le groupe ayant reçu une aide est inférieure à celui chez le groupe n'ayant pas reçu d'aide d'environ 12%, avec des écarts types de 0.154 et de 0.137 respectivement. On note l'existence d'une différence statistiquement significative ($p = 0.009$) des deux moyennes : le niveau de

stress ressenti n'est pas le même pour les candidats ayant reçu une aide versus les candidats n'ayant pas bénéficié d'une aide. Il est plus élevé dans le dernier cas.

Tableau 6.19 Statistiques de groupe RPG

Groupe	N	Moyenne	Écart-type	Erreur standard moyenne
Reçu une aide	73	0,532	0,154	0,018
Pas d'aide	84	0,594	0,137	0,014

Pour évaluer la force de la relation statistique entre le niveau de stress et l'aide, nous avons calculé l'indice eta (plus eta (η) est grand plus la force de relation est grande). Dans ce cas $\eta = 0.21$, ce qui indique une relation modérée.

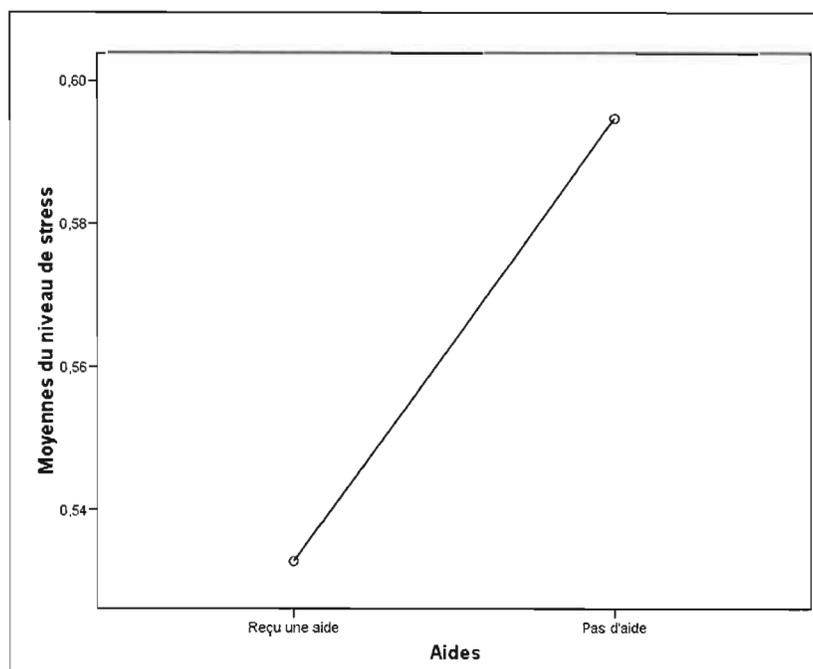


Figure 6.13 Aide fournie en fonction du niveau moyen du stress

Nous avons par conséquent émis la relation suivante :

R3-1 S'il y a de l'aide fournie

Alors le niveau de stress diminue

Bien que nous ayons constaté que l'aide fournie, d'une façon générale et indépendamment du nombre de fois, diminuait le stress, nous avons essayé de chercher si le nombre de fois d'aides avait une influence sur la variation de la RPG.

R3-2 : Chercher l'influence du nombre de fois d'aides sur le niveau de la RPG

Lors de cette analyse, nous avons tenu compte du nombre total d'aides reçues par candidat, indépendamment de la question pour examiner leur effet potentiel sur le niveau moyen de stress (RPG) de chacun des candidats. D'après les résultats des analyses présentés dans le tableau 6.20, nous avons remarqué qu'il existe une corrélation négative statistiquement significative entre le niveau moyen de stress et le nombre d'aides reçues ($r = -0.862$; $p = 0.027$) : plus le nombre de fois d'aides reçues augmente plus le niveau moyen de stress du candidat est réduit.

Tableau 6.20 Résultat de la corrélation entre le nombre total d'aides reçues et la RPG moyenne

		RPG moyenne	Nombre d'aides reçues
Nombre total d'aides reçues	Corrélation de Pearson	-0,862**	1
	Sig. (bilatérale)	0,027	
	N	6	6
RPG moyenne	Corrélation de Pearson	1	-0,862*
	Sig. (bilatérale)		0,027
	N	6	6

Ceci nous a conduits à émettre la relation suivante :

R3-2 Si le nombre de fois d'aides fournies augmente

Alors le niveau de stress diminue

R3-3 : Chercher un lien entre l'aide fournie et la variation du diamètre de la pupille

Nous avons cherché un lien entre l'aide fournie et la variation du diamètre de la pupille. Pour cela, nous avons analysé la variation du diamètre de la pupille chez le groupe ayant reçu de l'aide et celui n'ayant pas reçu d'aide. Les résultats nous ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative dans la variation de la dilatation de la pupille chez les deux groupes. Le tableau 6.21 montre que les valeurs moyennes sont de 0.45 et de 0.43. Statistiquement les valeurs sont similaires, par conséquent nous avons supposé l'absence de lien entre les deux variables.

Tableau 6.21 Variation du diamètre de la pupille

Groupe	N	Moyenne	Écart-type	Erreur standard moyenne
Reçu une aide	73	0,454	0,116	0,013
Pas d'aide	84	0,430	0,131	0,014

R3-4 Chercher un lien entre le nombre de fois d'aides et la variation du diamètre de la pupille

Lors de cette analyse, nous avons tenu compte du nombre total d'aides reçues par candidat, indépendamment de la question pour examiner leurs effets potentiels sur la dilatation moyenne de la pupille de chacun des candidats.

Les résultats démontrent l'absence d'un lien de corrélations significatives entre le nombre total d'aides reçues et la dilatation moyenne de la pupille de chacun des candidats ($p=0,462$). Autrement dit, l'augmentation ou la réduction du nombre total d'aides n'affecte pas la dilatation moyenne de la pupille du candidat (tableau 6.22).

Tableau 6.22 Résultats de la corrélation entre le nombre total d'aides reçues et la dilatation moyenne de la pupille

		Nombre total d'aides reçues	La dilatation moyenne de la pupille
Nombre total d'aides reçues	Corrélation de Pearson	1	0,376
	Sig. (bilatérale)		0,462
	N	6	6
La dilatation moyenne de la pupille	Corrélation de Pearson	0,376	1
	Sig. (bilatérale)	0,462	
	N	6	6

R3-5 : Chercher un lien entre l'aide fournie et le temps de lecture de l'énoncé

Pour voir si l'aide fournie influence ou pas le temps de lecture de l'énoncé, nous avons effectué une comparaison de la moyenne du temps de lecture de l'énoncé dans le groupe ayant reçu une aide versus le groupe n'ayant pas reçu d'aide. Les résultats de cette analyse se trouvent dans le tableau 6.23 et le tableau 6.24.

La moyenne du temps de lecture de l'énoncé pour le groupe ayant reçu de l'aide est très proche de celle du groupe n'ayant pas bénéficié d'une aide. Nous avons employé la « statistique *t* » pour mesurer l'écart entre les deux groupes. Il s'agit d'une mesure du rapport entre la différence des moyennes et une variable qui tient compte de la variance des groupes (Scherrer, 2007). Nous notons que dans le tableau 6.24 la statistique *t* est égale à - 0,133 et que la valeur *p* est égale à 0,895, ce qui indique l'absence d'une différence statistiquement significative entre la moyenne du temps de lecture de l'énoncé dans le groupe aide versus la moyenne dans le groupe n'ayant pas reçu d'aide.

Il n'y a pas de différence statistiquement significative du temps passé à lire l'énoncé dans le groupe ayant reçu de l'aide versus le groupe n'ayant pas eu recours à l'aide.

Tableau 6.23 Statistiques descriptives du temps de lecture de l'énoncé dans le groupe ayant reçu une aide versus le groupe n'ayant pas reçu d'aide

Groupe	Moyenne	Écart-type	N
Reçu une aide	7370	10881	84
Pas d'aide	7102	14269	73
Total	7245	12530	157

Nous avons effectué le test t pour comparer les moyennes des deux groupes. Le test t repose sur le postulat que la variance dans les deux groupes à comparer est similaire, autrement dit il y a homogénéité de la variance. Le test de Levene nous permet de valider (ou infirmer) ce postulat. Selon le tableau 6.24, le test de Levene montre que le postulat d'homogénéité de la variance est respecté. Nous remarquons que le p -value (Sig) est égal à 0,762, ce qui est supérieur au seuil 0.05³⁰, donc le postulat de l'égalité des variances est respectée.

Tableau 6.24 Résultats de la comparaison de la moyenne du temps de lecture de l'énoncé (Test d'échantillons indépendants)

	Test de Levene ³¹		Test-t pour égalité des moyennes					Intervalle de confiance ³²	
	F	Sig.	t	dl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Différence écart-type	Inf.	Sup.
Hypothèse de variances égales	0,092	0,762	-0,133	155	0,895	-267	2011	-4240	3705
Hypothèse de variances inégales			-0,13	133	0,896	-267,12	2049,17	-4320	3785

R3-6 : Chercher si l'aide a été fournie en fonction du temps passé à lire les choix de solutions

³⁰ SPSS calcule systématiquement deux valeurs de t , une première avec l'hypothèse d'égalité de la variance et une deuxième valeur avec l'hypothèse de variance non égale.

³¹ Le Test de Levene est utilisé pour vérifier l'égalité des variances

³² Intervalle de confiance 95% de la différence

Nous avons effectué une corrélation pour voir s'il y a un lien entre le nombre d'aides reçues et le temps passé à lire les choix de solution. Les résultats de cette analyse apparaissent dans le tableau 6.25 et le tableau 6.26 et la figure 6.14.

Le tableau 6.25 présente les statistiques descriptives, par exemple dans le groupe de candidats ayant reçu une seule aide, le temps moyen de lecture des choix de solution est égal à 19740 millisecondes avec un écart type égal à 17534. Dans le groupe ayant reçu trois aides, le temps moyen de lecture des choix de solution est égal à 26906 millisecondes avec un écart type égal à 1132.

Le tableau 6.26 présente l'analyse de corrélation proprement dite. Il ressort de ce tableau que le coefficient de corrélation entre le nombre d'aides et le temps passé à lire les choix de solution est égal à 0,377, la valeur p est égale à 0,002. Cela nous conduit à conclure qu'il existe un lien de corrélation statistiquement significatif entre le nombre d'aides reçues et le temps passé à lire les choix de solution. Ce lien est positif, c.-à-d. plus le temps de lecture des choix de solution augmente plus le nombre de fois d'aides reçues augmente.

Tableau 6.25 Statistiques descriptives du temps de lecture des choix de solution en fonction de nombre d'aides

Nb de fois d'aides	Moyenne	Ecart-type	N
0	12152	13129	29
1	19740	17534	39
2	29680	21224	14
3	26906	1132	2
Total	18948	17517	84

Tableau 6.26 Résultats de la corrélation entre le temps de lecture des choix de solution et le nombre de fois d'aides

		Temps de lecture des choix de solution	Nombre de fois d'aides
Temps de lecture des choix de solution	Corrélation de Pearson	1	0,337**
	Sig. (bilatérale)		0,002
	N	84	84
Nombre de fois d'aides	Corrélation de Pearson	0,337**	1
	Sig. (bilatérale)	0,002	
	N	84	84

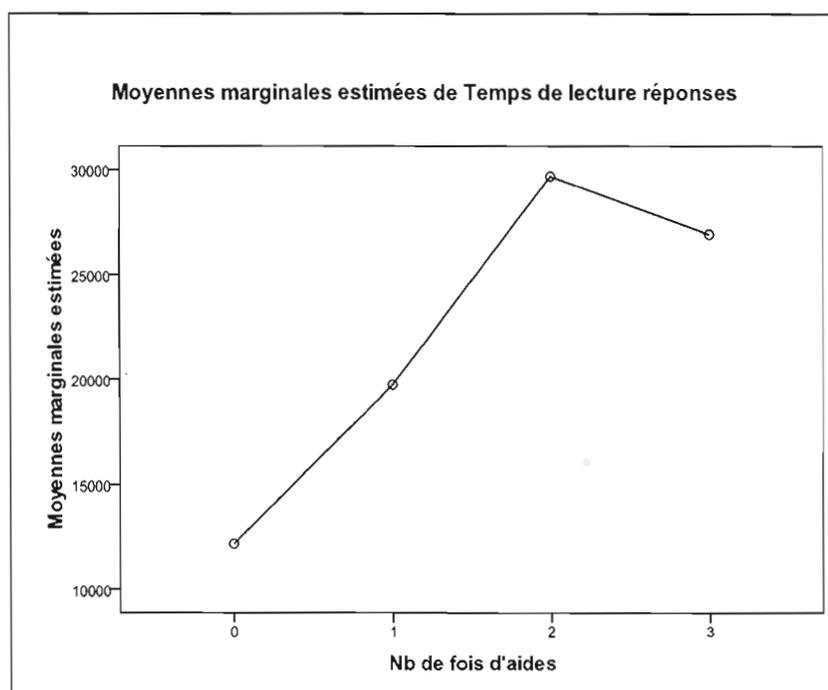


Figure 6.14 Temps de lecture des solutions en fonction du nombre de fois d'aides

Nous avons par conséquent émis la relation suivante :

R3-6 Si le temps de lecture des choix des solutions proposées augmente

Alors le nombre de fois d'aides augmente.

R3-7 : Chercher si l'aide a été fournie en fonction du nombre de tentatives

Pour tester l'existence d'un lien potentiel entre le nombre de fois où une aide a été fournie et le nombre de tentatives, nous avons procédé à un test de corrélation. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 6.27 et le tableau 6.28.

Le tableau 6.27 rapporte les statistiques descriptives. Par exemple, dans le groupe ayant effectué une seule tentative, la moyenne d'aide reçue est égale à 0,30 avec un écart type de 0,463. Dans le groupe ayant effectué quatre tentatives, la moyenne d'aide reçue est égale à 1,25 avec un écart type de 0,463.

Les résultats de l'analyse de corrélation (tableau 6.28) démontrent l'existence d'un lien de corrélation statistiquement significatif entre le nombre tentatives et le nombre d'aides reçues, avec un coefficient de corrélation égale à 0,557 et une valeur p égale à 0. Ainsi, il semble que plus le nombre de tentatives augmente plus le candidat reçoit d'aide.

Tableau 6.27 Statistiques descriptives du nombre de fois d'aides reçues

Nombre de tentatives	Moyenne	Écart-type	N
1	0,30	0,463	37
2	1,24	0,577	29
3	1,60	0,966	10
4	1,25	0,463	8
Total	0,87	0,773	84

Tableau 6.28 Résultats de la corrélation entre le nombre de fois d'aides reçues et le nombre de tentatives de choix de solution.

		Nombre total de fois d'aides	Nombre de tentatives
Nombre total de fois d'aides	Corrélation de Pearson	1	0.557**
	Sig. (bilatérale)		0.000
	N	84	84
Nombre de tentatives	Corrélation de Pearson	0.557**	1
	Sig. (bilatérale)	0.000	
	N	84	84

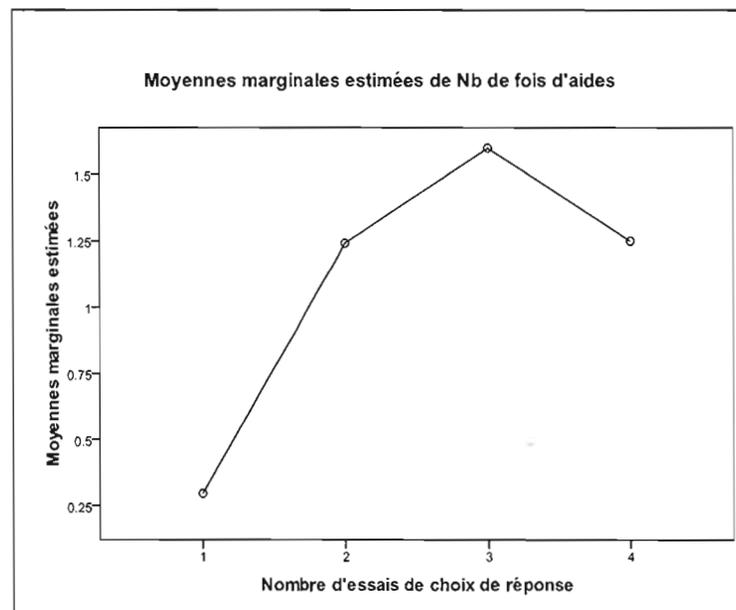


Figure 6.15 Temps de lecture des solutions en fonction du nombre de fois d'aides

Nous avons par conséquent émis la relation suivante :

R3-7 Si le nombre de tentatives augmente

Alors le nombre de fois d'aides augmente.

Les résultats de l'analyse de corrélation avec l'aide non typée sont récapitulés dans la figure 6.16.

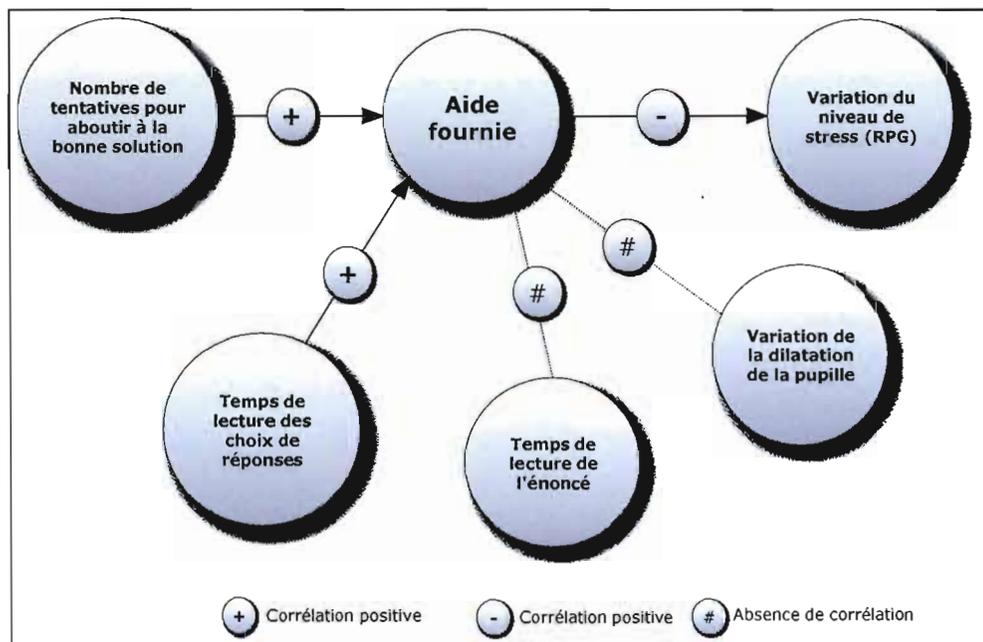


Figure 6.16 Récapitulatif des relations R3-*i* sur l'aide non typée

R3-8 : Analyse de l'aide par type

Dans le but d'étudier les aides proposées par le tuteur par type, nous avons procédé à une catégorisation et codification de l'aide comme le présente le tableau 6.29. Les données représentent les aides fournies à tous les candidats durant toutes les expérimentations et classées par type.

Tableau 6.29 Les types d'aides employés

Type de l'aide	Code	Occurrence
Conseil	CNS	9
Correction	COR	1
Directive	DIR	11
Encouragement	ENC	5
Explication	EXP	9
Message	MSG	11
Renfort	RFR	3
Renvoi au cours	RVC	3
Renvoi au simulateur	RVS	15
Questionnement	QES	6
	Total :	73

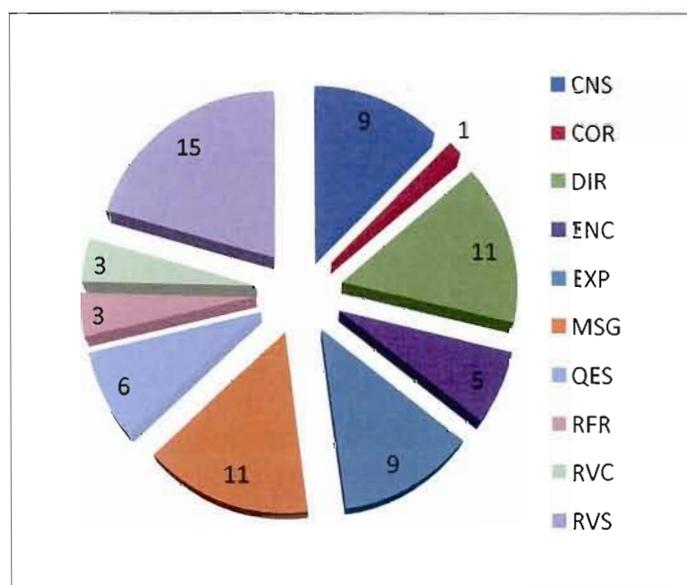


Figure 6.17 Fréquence des types d'aide

Nous remarquons que le nombre de fois où le tuteur propose une correction n'était que d'une seule fois sur un total de 73 interventions, ce qui confirme bien que le tuteur ne visait pas à corriger la proposition de l'apprenant, mais plutôt de l'inciter à trouver tout seul la solution. On remarque comme le montre la figure 6.17 que

l'aide la plus employée était un renvoi pour utiliser le simulateur, donc à modéliser le problème et à observer les variations pour s'aider à se construire la bonne solution.

Tableau 6.30 Tableau croisé du nombre d'aides par type et par question

Problème	CNS	COR	DIR	ENC	EXP	MSG	QES	RFR	RVC	RVS	Total
2	2		1	1		1				1	6
3		1	3		1					3	8
5	1		2			2				1	6
7	1			1		2					4
9	2					1					3
10			2		2	3					7
12	1				2	2		1		1	7
15					1				2	4	7
16	2									1	3
17			1		1					1	3
18				1			3				4
19				2			2	1			5
20			1		1		1		1	1	5
21			1		1			1		2	5
Total	9	1	11	5	9	11	6	3	3	15	73

Nous avons également constaté que le tuteur ne fournissait pas la même aide pour le même problème. Dans l'exemple du problème du problème numéro 20, il a proposé 5 fois une aide qui était à chaque fois différente d'un candidat à l'autre. Nous avons essayé de voir si la variation de la RPG ou la variation du diamètre de la pupille avaient une relation avec le type d'aide proposée.

Nous avons présenté la moyenne du niveau de stress et la dilatation de la pupille en fonction de la nature de l'aide dans la figure 6.18. Il ressort de cette figure que le groupe de candidats ayant reçu comme type d'aide un « conseil » avait en moyenne, le niveau de stress le plus bas ainsi que la dilatation de la pupille la plus faible, comparativement aux autres types d'aide.

Nous avons également noté que l'aide de type « renfort » était associée à une RPG élevée ainsi qu'une dilatation de pupille plus importante. Le renfort avait pour but de fournir plus d'explications sur la solution du problème après aboutissement à la bonne solution. Ce type d'aide a été fourni après plusieurs tentatives. Probablement, le candidat sentait plus de stress en se rendant compte de son erreur.

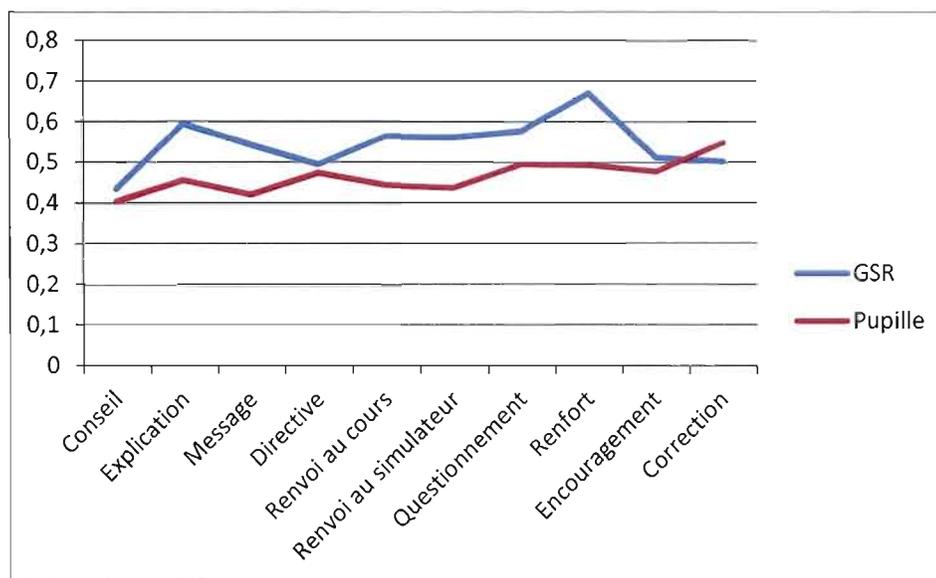


Figure 6.18 Variation de la RPG et la pupille en fonction du type d'aide

Le même constat ressort en analysant le temps de lecture de l'énoncé et le temps de lecture de la solution en fonction du type d'aide, nous l'avons présenté dans la figure 6.19. Le groupe qui a reçu un conseil comme type d'aide, semble être le mieux outillé et passe moins de temps à lire l'énoncé et la solution.

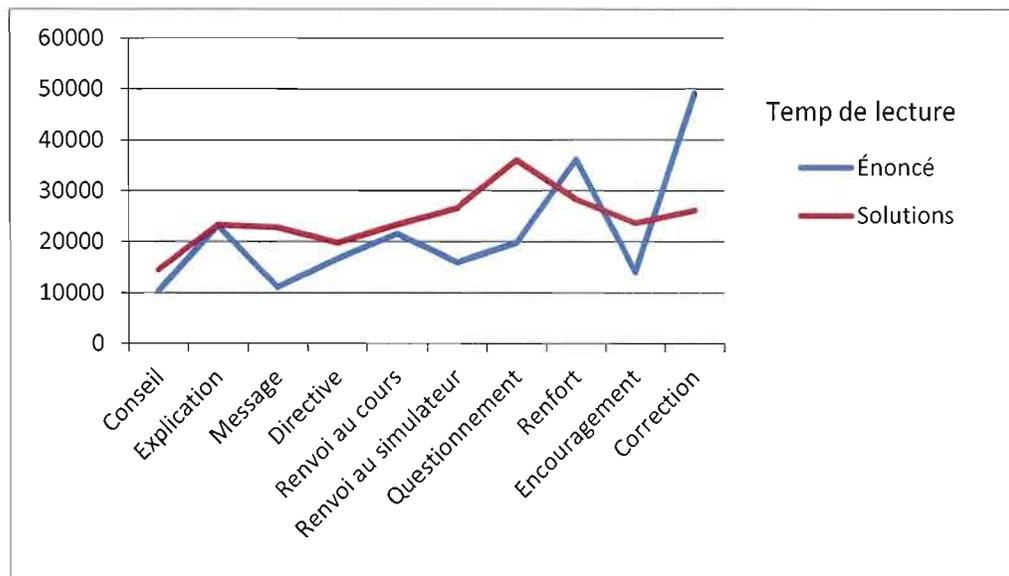


Figure 6.19 Temps de lecture de l'énoncé et des solutions en fonction du type d'aide

Le groupe conseillé est aussi celui qui a utilisé le moins de tentatives pour trouver la bonne solution, la figure 6.20 illustre ces résultats.

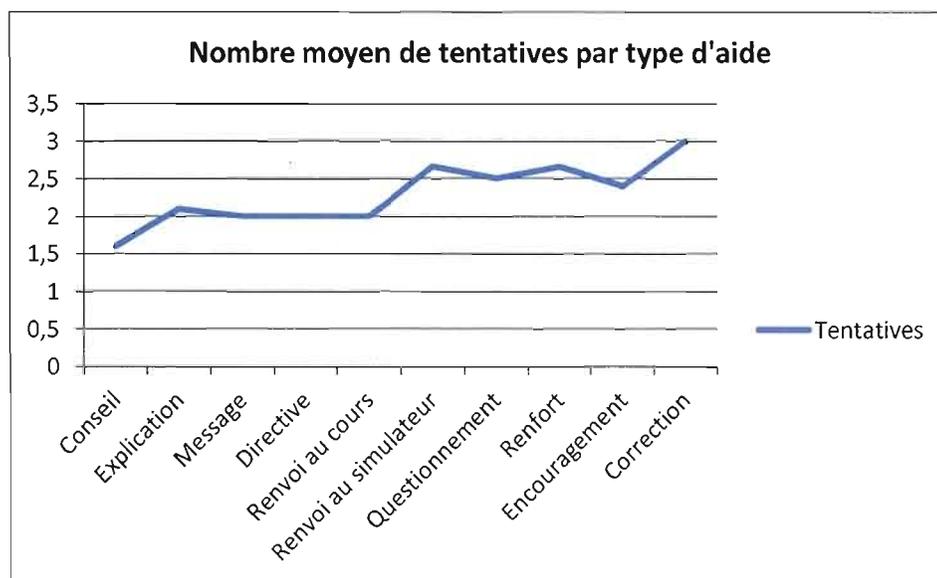


Figure 6.20 Nombre moyen de tentatives en fonction du type d'aide

À partir des analyses précédentes, nous avons émis les relations suivantes :

R3-8 Si le type d'aide = conseil

Alors la RPG diminue

R3-8-2 Si le type d'aide = conseil

Alors le diamètre de la pupille diminue

R3-8-3 Si le type d'aide = conseil

Alors le nombre de tentatives diminue

6.4.4 R4 : L'attitude de l'apprenant face à l'erreur

Dans cette section, nous avons analysé les actions entreprises par les candidats quand ils n'arrivaient pas à résoudre un problème. Nous rappelons qu'ils pouvaient soit :

- Retourner à la théorie pour chercher à mieux comprendre des notions;
- Retourner au simulateur pour refaire des manipulations et illustrer le problème;
- Demander ou recevoir de l'aide de la part du tuteur;
- Combiner deux ou plusieurs actions citées ci-haut.

Pour chaque problème posé, le candidat devrait fournir une solution. Il pouvait répondre juste après la lecture de l'énoncé et des solutions proposées ou bien utiliser les ressources mises à sa disposition. S'il proposait une solution erronée, il pouvait reprendre et utiliser une autre stratégie pour la résolution du problème pour mieux réussir la tentative suivante. La figure 6.21 présente les actions possibles du candidat suite à une erreur.

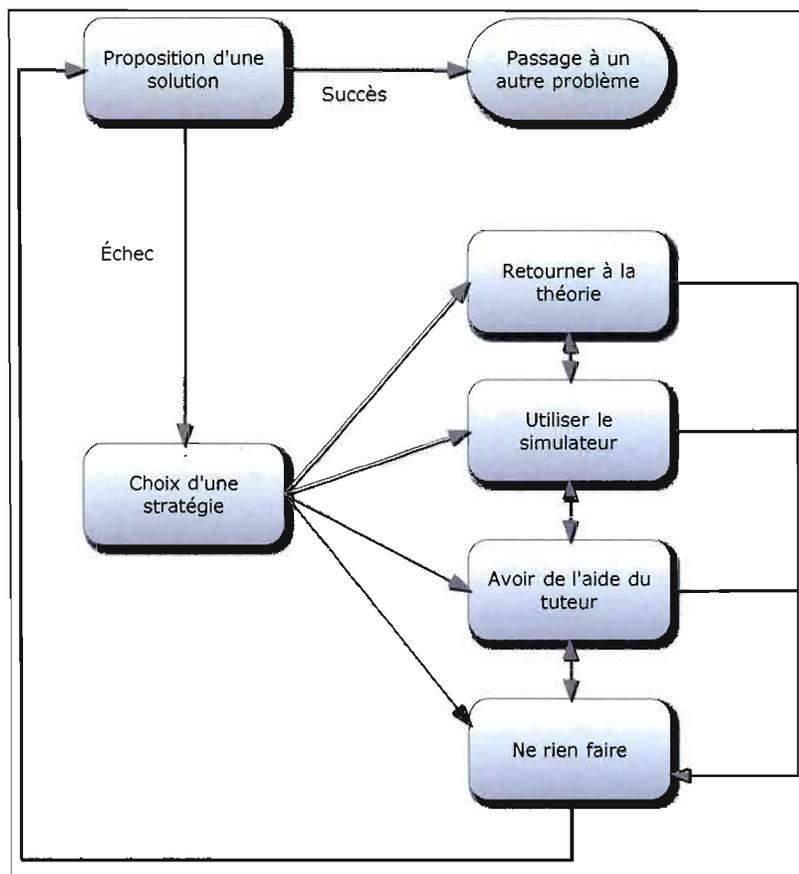


Figure 6.21 Démarche en cas de solution erronée

Nous nous sommes intéressés à l'étude des cas qui n'aboutissent pas à la bonne solution. En effet, le candidat avait besoin de plus d'aide, ou de plus de connaissances, quand il se trouvait incapable de résoudre un problème donné. Nous avons présenté dans le tableau 6.31 un résumé du nombre de tentatives effectuées pour la résolution de chaque problème. Les cas correspondants à un nombre de tentatives de 1 indiquent que la bonne solution a été trouvée du premier coup.

Tableau 6.31 Nombre de tentatives par problème et par apprenant

Problème	Apprenant						Moyenne
	1	2	3	4	5	6	
2	3	3	1	1	2	1	1.83
3	3	2	3	2	2	1	2.17
5	1	1	1	2	3	1	1.50
7	2	3	1	1	1	3	1.83
9	1	1	1	1	1	2	1.17
10	2	2	1	2	2	2	1.83
12	2	2	2	3	1	2	2.00
15	2	3	4	2	4	4	3.17
16	1	1	1	1	1	1	1.00
17	4	2	2	2	1	1	2.00
18	4	2	1	1	1	2	1.83
19	1	2	1	1	2	3	1.67
20	2	2	1	1	1	2	1.50
21	4	4	4	1	1	2	2.67
Moyenne	2.29	2.14	1.71	1.50	1.64	1.93	

Nous avons cherché les causes probables menant à une mauvaise solution, pour cela, nous avons analysé les zones regardées avant la saisie de la solution erronée.

Durant chaque problème, l'apprenant lisait l'énoncé ainsi que les choix de solutions proposées. Après la sélection d'une solution, il est informé de l'exactitude de sa solution. Si la solution était bonne, il passait au problème suivant sinon il effectuait une nouvelle tentative. Avant la nouvelle tentative, il pouvait relire de nouveau l'énoncé et les choix de solutions ou bien de refaire immédiatement une autre sélection. Dans tous les cas, il pouvait relire la théorie ou utiliser le simulateur avant de répondre. Dans le cas d'une mauvaise solution, nous avons essayé d'analyser comment les candidats se comportaient. Il y avait quatre possibilités :

1. Relecture de l'énoncé;

2. Relecture des choix de solutions;
3. Relecture de la théorie;
4. Utilisation du simulateur.

1. Relecture de l'énoncé

Pour pouvoir résoudre les problèmes, les candidats devraient savoir ce qui était demandé. Pour chaque problème, nous avons présenté un énoncé sous forme d'un texte qui pouvait inclure des graphiques. Nous avons remarqué que l'énoncé pouvait être lu plusieurs fois et qu'un va-et-vient entre l'énoncé et les choix de solutions pouvait être fait. Nous avons mesuré le temps passé à lire l'énoncé depuis le commencement du problème, la fin étant la sélection d'un choix de solution. La première tentative pouvait s'avérer un succès ou un échec. Nous n'avons pas traité les cas de succès du premier coup, car tout simplement il n'y avait qu'une seule tentative. Nous nous sommes intéressés aux cas d'échec pour savoir si un candidat qui ne réussissait pas son problème du premier coup allait relire l'énoncé de nouveau lors de la prochaine tentative.

Tableau 6.32 Variation du temps de lecture de l'énoncé entre les deux premières tentatives

Candidat	Variation moyenne de lecture de l'énoncé	Nombre de cas d'augmentations	Nombre de cas de diminutions
1	-79%	0	9
2	-29%	3	8
3	-58%	0	5
4	-21%	1	5
5	-81%	0	6
6	-55%	1	8
Moyenne	-54%	11%	89%

Nous avons mesuré le temps passé à lire l'énoncé lors de la première tentative et l'avons comparé au temps de relecture de l'énoncé lors de la deuxième tentative dans

le but de voir si les candidats sentaient qu'ils n'avaient pas bien compris l'énoncé. Le tableau 6.32 présente les résultats obtenus.

Nous avons conclu que dans la majorité des cas (89%), le temps de relecture de l'énoncé diminue lors de la deuxième tentative d'environ 54%. Pour notre environnement d'apprentissage, nous avons gardé affiché l'énoncé du problème pour permettre aux apprenants de se rafraîchir la mémoire. Le fait que la relecture prenait moins de temps lors d'une autre tentative pouvait s'expliquer par la clarté des énoncés qui étaient élaborés par l'expert du domaine. Nous pouvions supposer que les candidats avaient bien compris les énoncés dès le départ et n'avaient pas trop besoin des les relire.

2. Relecture des choix de solutions

Une fois le candidat informé que sa première tentative a abouti à un échec, il reprenait de nouveau le problème. Dans cette partie, nous avons étudié si le candidat a passé plus de temps à relire les choix des solutions proposées. Le tableau 6.33 présente pour les différents candidats la variation du temps de lecture des choix de solutions entre la première et deuxième tentative.

Tableau 6.33 Variation du temps de relecture des choix de solutions entre les deux premières tentatives

Candidat	Variation moyenne du temps de lecture des choix de solutions	Nombre de cas d'augmentations	Nombre de cas de diminutions
1	238%	3	7
2	21%	3	8
3	67%	1	2
4	4%	2	4
5	-64%	0	6
6	-23%	1	8
Moyenne	41%	22%	78%

D'une manière générale, la variation était positive entre les deux tentatives, il y avait une moyenne d'augmentation de 41%. Cette augmentation était portée par uniquement 22% des cas, nous avons eu une augmentation pour 10 cas sur un total de 45 cas, mais l'augmentation est assez forte. Nous avons remarqué que la variation était très importante chez le candidat numéro 1 (238%), lors des deuxièmes tentatives il a passé plus que deux fois de temps à relire les choix de solutions. En analysant les causes probables de cette augmentation, nous nous sommes rendu compte que pour certaines questions lors de la première tentative, il n'y avait eu qu'un très bref regard des différents choix ou bien l'oculomètre n'avait pu capter le regard durant cette période. Lors de la deuxième tentative, le temps avait nettement augmenté.

3. Relecture de la théorie

Le cours théorique était à la disposition des candidats à chaque instant. Bien qu'il n'offre pas de réponses directes aux questions posées, il demeurait une ressource utile expliquant et clarifiant des éléments des problèmes. Dans leur cheminement vers la bonne solution, les candidats retournaient à la théorie dans les cas suivants :

- S'ils passaient longtemps à trouver la bonne solution;
- S'ils sentaient le besoin ou se rappelaient avoir déjà vu des indices dans la théorie;
- Pour s'assurer de leurs solutions avant de la valider.

Nous avons récapitulé ces données dans le tableau 6.34. Pour les différents problèmes, nous avons présenté le nombre de fois où il y avait eu relecture de la théorie et combien de cas ont mené à un succès ou à un échec.

Tableau 6.34 Résultats de la relecture de la théorie

Problème	Cas de relecture de la théorie	Échec	Succès
2	0	0	0
3	2	2	0
5	1	1	0
7	0	0	0
9	0	0	0
10	1	1	0
12	1	1	0
15	2	2	0
16	3	0	3
17	0	0	0
18	3	2	1
19	5	3	2
20	0	0	0
21	1	1	0
Total	19	13	6

Nous avons remarqué que dans 6 cas sur 19 les candidats avaient pu trouver une bonne solution après la relecture de la théorie et dans 13 cas ils n'avaient pas eu de succès. Après la première tentative erronée, une relecture de la théorie pouvait améliorer la performance du candidat.

4. Utilisation du simulateur

Le simulateur, présenté à la fin de la partie théorique, était également accessible en tout moment. Nous avons remarqué qu'il a été utilisé beaucoup plus que le cours théorique soit à 29 reprises (contre 19 cas). Le tableau 6.35 nous indique que dans 11 cas sur 30 les candidats avaient pu trouver la bonne solution avec la simulation, soit dans 38% des cas.

Tableau 6.35 Résultat de l'utilisation du simulateur

Problème	Utilisation Simulateur	Échec	Succès
2	2	2	0
3	5	3	2
5	1	0	1
7	1	1	0
9	1	1	0
10	2	2	0
12	2	2	0
15	4	0	4
16	0	0	0
17	1	0	1
18	1	1	0
19	4	2	2
20	4	3	1
21	1	1	0
Total	29	18	11

D'une certaine manière, nous avons constaté que la simulation a contribué à une amélioration de la réussite après une première tentative erronée.

6.4.5 R5 : Réaction à l'aide proposée

Les candidats étaient informés de leurs erreurs par un message informatif qui contenait quelques arguments pour expliquer pourquoi cette solution n'était pas la bonne. Ceci est vrai pour la première série des 7 premières questions, durant la deuxième série des 7 questions suivantes, le message mentionnait uniquement le fait qu'il s'agissait d'une bonne ou une mauvaise solution, sans aucune explication. L'aide du tuteur était difficile à traiter d'une façon automatique, il nous fallait une méthode pour reconnaître et analyser le discours verbal. Pour notre recherche, nous

avons traité manuellement l'aide du tuteur en ce qui concerne le sens et la catégorisation de l'aide. Pour l'aide proposé d'une façon automatique, nous avons analysé les données de la première série pour expliquer les points suivants:

R5-1 Chercher si les candidats avaient suffisamment lu le texte d'aide affiché

Dans le but de vérifier si l'aide textuelle était bien acceptée par les apprenants et de vérifier qu'elle était lue, nous avons analysé les durées de regard de la zone réservée au texte d'aide. Nous avons délimité une zone d'intérêt à la fenêtre d'aide et nous avons par la suite cumulé le temps de regard de cette zone durant sa présence à l'écran. Le texte d'aide était bref et bien ciblé et facile à interpréter, il visait de justifier pourquoi la solution proposée ne pouvait pas être correcte.

Nous avons résumé les résultats obtenus dans le tableau 6.36 qui présente le nombre de fois d'aides affichées et une répartition par temps de lecture. Les messages comportaient en moyenne une vingtaine de mots, nous avons par conséquent fixé arbitrairement un seuil de 3 secondes pour la lecture du message. Nous avons calculé le temps de lecture pour les deux cas : inférieur et supérieur à 3 secondes. Nous avons remarqué que l'aide était lue à 94%, ce qui nous a permis de conclure que l'aide proposée par le système est lue. Le système n'affichait une aide que suite à une solution erronée, donc l'apparition de l'aide signifie l'échec dans la résolution du problème. Le système affiche un message de félicitation dans le cas contraire. Certains candidats semblaient ne pas passer assez de temps à lire cette aide, probablement ils se contentaient d'être informés de leur échec. En effet, nous avons constaté que dans 25% des cas, l'aide était lue durant moins de 3s.

Tableau 6.36 Lecture de l'aide

Nb d'aides	Temps de lecture < 3s	Temps de lecture >= 3s	Pas de lecture
32	8	22	2
%	25%	69%	6%

R5-2 Chercher si la lecture de l'aide favorise la réussite dans la tentative suivante

Nous avons cherché l'impact de l'aide affichée lors des tentatives suivantes dans le but de savoir si l'aide affichée a amélioré la réussite lors de la prochaine tentative, nous avons calculé le nombre de cas où le candidat réussit sa tentative suivante ou l'échoue. Nous avons récapitulé les résultats dans le tableau 6.37 qui nous informe que si un candidat échoue la première tentative et qu'il reçoit de l'aide alors il réussit son épreuve dans la tentative suivante dans 71% des cas.

Tableau 6.37 Cas de réussite ou d'échec après l'aide affichée

Cas non réussi à la première tentative	Tentatives suivantes non réussies	Tentatives suivantes réussies
32	9	23
%	28%	71%

Nous avons donc constaté que l'aide textuelle contribuait positivement à la réussite après un échec.

Ce chapitre a présenté une série d'analyses des données issues de différentes sources. Les résultats des analyses statistiques ont permis de démontrer la possibilité de trouver des corrélations significatives pouvant être transformées en règles utilisables par un agent artificiel. Les relations trouvées découlent des données empiriques.

6.5 Analyse du questionnaire

Nous avons utilisé un questionnaire à la fin de chaque expérimentation pour cerner la perception des apprenants sur notre environnement d'apprentissage et pour évaluer leurs apprentissages. L'échelle d'évaluation était sur 5 points, par conséquent toutes les moyennes calculées ci-après sont par rapport à 5. Nous avons converti les

moyennes obtenues en pourcentage pour faciliter l'interprétation. Dans le questionnaire, nous avons identifié les rubriques suivantes :

1. Connaissances préalables en physique quantique : Pour nous assurer que les candidats ont des profils similaires sur la matière à apprendre et qu'ils ont aussi les connaissances préalables adéquates. Nous avons calculé une note moyenne de 99% ce qui nous rassure que les candidats choisis sont représentatifs et ont des profils homogènes;
2. Perception de l'environnement d'apprentissage : l'idée était d'avoir des commentaires sur la qualité du cours théorique, la qualité de l'interface et de la partie résolution de problèmes. Les candidats semblent très convaincus des facilités offertes par l'environnement et la clarté de cours et des problèmes à résoudre. Nous avons calculé une note moyenne de 88% affirmant une perception très positive;
3. Perception des effets des équipements : Le cours se déroulait en présence de caméras et de capteurs physiologiques, nous avons demandé aux candidats de nous indiquer leurs avis sur les équipements installés. Cet environnement était inhabituel pour eux et causait un léger inconfort oublié après quelques minutes d'utilisation. Nous avons calculé une note moyenne de 84% ce qui prouvait qu'en général, les apprenants trouvaient cet environnement non intrusif et confortable;
4. Le besoin d'aide et la perception de l'aide proposée : Cette rubrique permet d'évaluer si les apprenants avaient des difficultés lors de l'utilisation de l'environnement d'apprentissage ou de la résolution des problèmes. Les apprenants ont exprimé leur besoin d'aide pour résoudre certains problèmes (moyenne de 90%) et ont indiqué que l'aide proposée était bien utile;
5. Perception du rôle du professeur : Nous nous sommes intéressés à collecter les avis des apprenants sur leurs perceptions du rôle du professeur qui les assistait

le long des expérimentations. Nous avons calculé une note de 93% ce qui prouvait que l'aide du professeur était très utile;

6. Connaissances acquises : En dernière étape, nous avons essayé de savoir si les apprenants ont jugé que l'utilisation de notre environnement a permis l'amélioration de leurs connaissances dans ce domaine. Nous avons calculé une moyenne de 90%, ce qui était bien satisfaisant car elle traduit le fait que les apprenants estiment qu'ils ont acquis de nouvelles connaissances à l'aide de notre système.

Nous avons comparé cette auto-évaluation au jugement du professeur. Le professeur s'est basé sur les questions posées par les apprenants, les réponses fournies et les démarches entreprises lors de la résolution des problèmes. Il a utilisé également les réponses aux trois questions de synthèses présentées ci-après :

1. Après avoir exploré la simulation, résumez-nous en une phrase ce qu'est l'effet photoélectrique.
2. Selon-vous, quel principal phénomène ne peut être expliqué par le modèle classique ?
3. En quoi le modèle des photons permet-il d'expliquer la présence d'une fréquence de coupure ?

Les apprenants devaient mettre en valeur les connaissances acquises de ce cours en répondant par écrit dans un court paragraphe. Le professeur a synthétisé les notions clés dans ces trois questions ouvertes et jugeait que les réponses à ces questions reflétaient la maîtrise de l'effet photoélectrique.

Nous avons demandé aux apprenants leurs préférences ou suggestions en ce qui concerne le suivi d'un cours dans des conditions similaires. Nous avons noté que les apprenants étaient plus favorables à un cours classique avec la présence du professeur (97%) et en la présence d'autres apprenants (93%). Ils étaient unanimes quant à l'utilité du simulateur Phet lors de leur apprentissage. À 73%, les apprenants ont manifesté une volonté de suivre ce genre de cours dans les mêmes conditions

expérimentales que celles que nous avons mises sur pied. Nous avons récapitulé les réponses des candidats dans le tableau 6.38.

Tableau 6.38 Résultat des réponses au questionnaire

Classe des questions	Moyenne	%
1. Connaissances préalables en physique quantique	4,97	99%
2. Perception de l'environnement d'apprentissage	4,39	88%
3. Perception des effets des équipements	4,21	84%
4. Le besoin d'aide et la perception de l'aide proposée	4,50	90%
5. Perception du rôle du professeur	4,67	93%
6. Connaissances acquises	4,50	90%

Nous terminons l'analyse du questionnaire par une comparaison entre les notes obtenues en fonctions des réponses des apprenants (notes calculées), les notes obtenues par des évaluations subjectives des candidats et les notes attribuées par le professeur (tableau 6.39). Nous avons calculé un facteur de corrélation de 0,73 entre les notes calculées et celles attribuées par le professeur; nous supposons que le jugement du professeur est influencé par les résultats des résolutions des problèmes.

Tableau 6.39 Résultat des évaluations de l'apprentissage

Apprenant	Note calculée	Note de l'auto-évaluation	Note du professeur
1	67,86%	70%	60%
2	71,43%	90%	75%
3	82,14%	70%	70%
4	87,50%	80%	85%
5	83,93%	90%	80%
6	76,79%	90%	80%
Moyenne	78,28%	82%	75%

6.6 Conclusions

Les analyses statistiques nous ont permis d'identifier des interdépendances à partir des données. Ces résultats peuvent être exploités pour la construction d'une base de règles comportementales de l'agent tuteur artificiel. Dans ce qui suit, nous proposons quelques exemples de règles qui peuvent être déduites de ces résultats :

- La lecture de la première partie théorique se faisait au rythme et à la façon de chacun. La mesure de la RPG nous confirme que chaque apprenant se comportait d'une façon différente des autres. Nous avons noté que le professeur n'a fait aucune intervention à cette étape. Par conséquent, nous ne proposons aucune action à ce niveau sauf si une autre règle, qui propose d'aider se montre prioritaire. Ceci peut se traduire par la règle suivante :

Règle 1 : Lors de la lecture initiale de la théorie

Alors ne pas intervenir.

- Nous avons trouvé une relation entre le temps de lecture de la théorie et la dilation de la pupille. En effet, plus le temps de lecture est réduit plus la pupille se dilate, donc plus la tâche est difficile plus l'apprenant se concentre. Également, si le temps de lecture de la théorie est plus court cela va engendrer une augmentation du nombre de tentatives et du nombre d'interventions du tuteur lors de la résolution des problèmes. Nous pouvons définir une règle pour veiller à ce que le temps de lecture dépasse un temps minimal nécessaire pour un bon apprentissage afin que l'apprenant nécessite moins d'aide et puisse mieux réussir la résolution des problèmes. Nous pouvons énoncer la règle suivante :

Règle 2 : Si le temps de lecture de la théorie est inférieur à un temps minimal

Alors inciter l'apprenant à passer plus de temps à la lecture.

Nous attribuons plus de poids à la règle 2 qu'à la règle 1. Son application devra améliorer l'apprentissage et surtout tenter d'éviter de mettre l'apprenant en difficulté. Il n'y a pas de concurrence ou de contradiction entre ces deux règles. Les deux proposent de laisser l'apprenant lire sans l'interrompre, mais si sa lecture est trop rapide, alors il faut l'inciter à lire plus longtemps.

On peut prendre comme valeur du temps minimal le temps moyen des apprenants qui ont obtenu les meilleures notes et l'ajuster en fonction du rythme de lecture de chacun. Le cours comporte plusieurs pages, il est possible de calculer un temps minimum par page.

- Lors de la lecture des énoncés des problèmes, nous avons remarqué qu'une durée prolongée de lecture de l'énoncé permet de prédire que l'apprenant fera plusieurs tentatives avant de trouver la bonne solution du problème. Nous proposons à l'agent artificiel d'intervenir s'il détecte que l'apprenant a passé trop de temps à lire l'énoncé, ce qui suggère que l'apprenant semble être en difficulté. Nous pouvons formuler la règle suivante :

Règle 3 : Si le temps de lecture de l'énoncé dépasse un temps minimal

Alors intervenir pour aider l'apprenant

On peut prendre comme valeur du temps minimal le temps moyen de lecture des énoncés par les apprenants qui ont obtenu les meilleures notes et l'ajuster en fonction du rythme de lecture de chacun. Il existe plusieurs énoncés de problèmes à résoudre, donc il est possible de calculer un temps minimum par énoncé ou par problème, qui peut varier d'un problème à l'autre

L'intervention peut se faire de différentes manières. Il est possible de fournir des conseils, d'expliquer l'énoncé du problème de façon différente, de retourner à la théorie ou de proposer d'utiliser la simulation.

- Une lecture prolongée des choix de solutions proposées est liée à l'augmentation du nombre de tentatives et donc peut renseigner sur des

difficultés chez l'apprenant. L'agent devra intervenir comme dans le cas précédent. Nous pouvons formuler la règle suivante :

Règle 4 : Si le temps de lecture des solutions dépasse un temps minimal

Alors intervenir pour aider l'apprenant

- Nous avons remarqué qu'une augmentation du temps cumulé de la lecture de la théorie réduit le nombre de tentatives. L'agent artificiel peut intervenir pour inciter l'apprenant à consulter le cours théorique s'il estime que le temps de lecture a été insuffisant. Nous pouvons formuler la règle suivante :

Règle 5 : Si le temps cumulé à lire la théorie est inférieur à un temps minimal

Alors inciter l'apprenant à retourner consulter la théorie.

- Cette règle est semblable à la règle 2 mais s'applique plus tard lorsque l'apprenant essaie de résoudre les problèmes.
- Les résultats nous permettent de prédire la solution que l'apprenant va sélectionner. L'analyse nous a démontré que l'apprenant a tendance à choisir la solution qu'il regarde plus que les autres. L'agent peut identifier si la solution regardée plus que les autres est erronée. Il peut alors proposer à l'apprenant de relire les autres solutions plus longtemps, le renvoyer à la partie théorique, le renvoyer la simulation ou de lui afficher une aide. Nous pouvons formuler la règle suivante :

Règle 6 : Si la solution lue plus longtemps que les autres est erronée

Alors conseiller à l'apprenant de relire les autres énoncées ou la théorie ou d'essayer la simulation.

- Les résultats prouvent que l'aide fournie diminue le niveau de stress de l'apprenant et contribue à réduire le nombre de tentatives et les interventions

du tuteur. L'agent artificiel pourra intervenir lors de la détection d'une variation importante du niveau de stress pour proposer de l'aide. Nous pouvons formuler la règle suivante :

Règle 7 : Si le niveau de stress augmente

Alors aider le candidat

Nous avons pu implémenter un premier prototype d'un agent artificiel qui peut accueillir et exécuter les règles comportementales énoncées. Étant donné que notre environnement d'apprentissage est capable d'intercepter les données oculométriques et physiologiques d'une façon continue. Nous avons traité les données au fur et à mesure de leur réception. En fonction du contexte, le système peut déterminer, s'il est utile de proposer une aide adéquate. Nous avons pu implémenter des fonctions suivantes :

- Proposer une aide si une valeur de stress est dépassée;
- Proposer une aide si la durée de regard d'une zone dépasse une valeur;
- Proposer une aide si la durée de regard d'une zone est inférieure une valeur; la durée minimale est délimitée par le temps d'affichage de la page en question et le moment de passage à une autre page;
- Pointer une zone dans l'écran.

L'aide a été proposée de différentes manières :

- Affichage d'un texte dans une fenêtre;
- Faire apparaître un ACA avec une bulle contenant le texte d'aide;
- Faire apparaître un aca avec une bulle contenant le texte d'aide avec une lecture vocale (en langue française).

Le pointage de zones se faisait par l'encadrement d'une zone de l'écran avec les options suivantes :

- Placer un aca proche de la zone en question en la pointant;
- Encadrer ou encercler une zone de l'écran.

L'implémentation de ces règles prouve la possibilité d'intégrer des mesures physiologiques et oculométriques dans un système d'aide dans le but de contribuer à l'amélioration de l'apprentissage.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. Résumé de la démarche

Dans cette recherche, nous avons exploré et analysé le comportement non verbal lors d'un apprentissage en ligne dans le but de montrer l'importance des données issues de l'oculomètre et des capteurs physiologiques. Nos analyses nous ont conduits à présenter des règles comportementales pouvant être utilisées par un tuteur artificiel. Les interactions entre l'apprenant et la machine peuvent être améliorées en tenant compte des informations non verbales.

Les domaines de l'EIAH et de l'IHM utilisent plusieurs technologies et sont en évolution continue. Dans l'état de l'art, nous avons présenté quelques recherches qui étaient reliées à l'utilisation des informations oculométriques et physiologiques, mais nous avons constaté leur faible utilisation dans le domaine de l'EIAH. Nous reconnaissons que ceci était dû essentiellement aux coûts élevés de ses systèmes et de leurs faibles disponibilités.

Nous avons visé au début la conception d'un système tutoriel intelligent qui réagit en temps réel pour fournir de l'aide aux apprenants en fonction de l'analyse des données non verbales. Notre système devait s'inspirer du comportement d'un tuteur humain. Pour cela, nous avons créé un environnement d'apprentissage pour observer et analyser le comportement du tuteur et les réactions de l'apprenant. Nous avons conçu un système qui offrait un cours en physique quantique se rapportant à l'effet photoélectrique et destiné à des étudiants du CÉGEP. Le cours comportait une partie théorique et une série de problèmes à résoudre; le tout a été élaboré et validé avec un

expert du domaine. Nous avons aussi intégré et adapté un simulateur pour permettre aux apprenants d'effectuer des manipulations et d'illustrer les problèmes posés. Une communication en temps réel a été établie avec le simulateur pour identifier les manipulations effectuées et les envoyer au poste du tuteur; ceci permettait de savoir avec exactitude l'état des variables du simulateur en tout instant.

Nos expérimentations se sont déroulées dans des conditions naturelles, ni l'apprenant ni le tuteur n'étaient interrompus pour expliquer ou justifier leurs actions. Nous avons bien expliqué qu'il ne s'agissait pas d'une évaluation de compétences, mais d'un test de l'introduction de nouvelles technologies pour favoriser un apprentissage en ligne. Une quantité importante de données a été collectée et sauvegardée dans une base de données que nous avons structurée de façon à pouvoir retracer toutes les interactions de l'apprenant.

La préparation et le nettoyage des données étaient une phase cruciale et assez laborieuse. Chaque expérimentation a généré une quantité importante de données textuelles en plus des fichiers vidéo. Nous avons éliminé les données bruitées et non utilisables. En effet, l'oculomètre pouvait perdre parfois la position du regard ou recevoir un signal trop faible rendant certaines informations collectées peu fiables. Nous avons aussi gardé les informations pertinentes pour nos analyses en faisant une projection sur les données oculométriques. Les données physiologiques étaient également nettoyées en éliminant les données inutiles et en normalisant les valeurs recueillies. Nous avons gardé les données brutes à partir desquelles nous avons généré des données plus compactées pour faciliter et alléger les traitements et les analyses. Cette phase a été automatisée; nous avons développé un module de prétraitement de données qui nous a permis d'assurer un passage entre les données brutes et les données prêtes à l'analyse. Nous avons eu recours à maintes reprises à ce module pour des mises au point et pour la définition des données générées.

Les dialogues, ou communications pédagogiques entre apprenants et tuteur ont été considérés comme la composante verbale de notre collecte de données. Cette

composante verbale issue du visionnage des vidéos nous a permis de codifier les actes pédagogiques du tuteur visionnés et écoutés à maintes reprises. Nous avons restreint notre codification à la catégorisation de l'aide et à la détermination du moment de son déclenchement. Les interventions du tuteur ont été analysées dans le but de chercher des indices dans les informations collectées pouvant justifier ses interventions. Les informations verbales pourraient être utilisées par un agent artificiel pour reproduire d'une façon plausible l'aide fournie par le tuteur humain en l'affichant sous forme de texte ou en la lisant.

Une étape cruciale dans notre recherche était d'organiser les données verbales et non verbales dans une base de données comportementale et de les analyser. Les analyses visaient la recherche de corrélations à partir des données. En effet, nous avons procédé à une série d'analyses statistiques aboutissant à la formulation de règles pouvant servir comme base de démarrage d'un agent artificiel.

2. Résumé des contributions

Dans notre recherche, nous avons relevé plusieurs défis, particulièrement le développement d'un environnement d'apprentissage informatisé intégrant un simulateur externe, la collecte et l'intégration en temps réel des informations verbales et non verbales et l'établissement d'une communication avec un simulateur externe. La finalité de la recherche visait la conception d'un agent tuteur artificiel dont le comportement est régi par les règles extraites des analyses des interactions humain-machine.

Notre étude nous a permis d'aboutir à des résultats qui permettent de lier les comportements non verbaux à des états cognitifs se prêtant à un diagnostic cognitif. En effet, dans un tutorat humain, le tuteur possède les facultés de diagnostic du comportement de l'apprenant de manière naturelle et intuitive, ces processus et ces mécanismes sont non explicites et difficilement déchiffrables pour les transposer dans un tuteur artificiel.

Nous avons intégré des données verbales et non verbales issues d'une interaction humain-machine dans une situation d'apprentissage constructiviste. Ceci a permis de mettre l'accent sur l'importance des données non verbales en apprentissage et sur la possibilité de les utiliser dans un environnement d'apprentissage automatisé. Nous avons démontré l'existence et la pertinence d'autres sources d'informations, comme le suivi du regard et les mesures physiologiques, pouvant être intégrées dans des environnements d'apprentissage. Le domaine de l'intelligence artificielle en éducation peut bénéficier de cette étude pour produire des artefacts qui favorisent l'apprentissage en ligne et améliorer le support aux usagers.

Notre étude ne prétend pas établir des règles généralisables; le comportement humain comporte toujours des processus difficilement interprétables. Les expérimentations réalisées avec la population sélectionnée nous ont permis de dégager des règles pouvant servir d'initiateur du comportement d'un agent artificiel. Notre approche qui consistait à adapter un simulateur et à l'intégrer dans un environnement d'apprentissage permettant la collecte de données non verbales n'a pas été utilisée, à notre connaissance, par d'autres chercheurs.

Le simulateur utilisé fait partie d'une bibliothèque importante de simulateurs d'enseignement de la physique développés par la même équipe en utilisant les mêmes techniques. Ceci encourage l'adaptation de notre environnement pour accueillir d'autres simulations et notamment de créer une interface pouvant assurer une communication entre ces simulateurs et notre environnement.

Notre étude propose de nouvelles pistes de recherches pour utiliser des informations non verbales et pour concevoir un environnement d'apprentissage évolutif pouvant intégrer une bibliothèque de cours utilisant des simulateurs avec un système d'aide évolutif et adaptatif.

3. Perspectives

Les règles déduites pourraient être raffinées et augmentées au fil des expérimentations. Le corpus collecté devrait être élargi avec d'autres

expérimentations d'une part pour valider les règles extraites et d'autres parts pour établir d'autres hypothèses et les valider.

Pour valider le comportement de l'agent artificiel, il faudrait tester les règles extraites en définissant son rôle et la manière selon laquelle il va le jouer. La présence du tuteur humain serait nécessaire pour valider et ajuster ses réactions. Les informations non verbales devraient être mises à la disposition du tuteur humain pour enrichir le modèle de l'usager; il est bien utile de savoir si l'apprenant n'a pas regardé une zone ou a été stressé dans une certaine situation.

Les expérimentations dans des environnements d'apprentissage nécessitent une bonne mise au point du curriculum à présenter et une validation par les experts du domaine. Pour des cours ciblés, il est indispensable de trouver une population homogène où les candidats ont des profils cognitifs semblables. Les résultats seraient meilleurs si le nombre de cas est assez significatif. Pour enrichir notre système, il sera intéressant d'effectuer d'autres expérimentations avec différents tuteurs humains et de comparer leurs interventions.

Nous pouvons également suivre le regard du tuteur humain et ses réactions physiologiques pour mieux comprendre et prédire la nature et les moments probables de ses interventions. D'autres informations non verbales peuvent bien contribuer à améliorer notre environnement d'apprentissage comme la prise en charge des expressions faciales du tuteur et de l'apprenant. Ceci permettra d'étudier non seulement d'autres corrélations entre le verbal, les états émotionnels et le suivi du regard, mais aussi, permettra d'étudier d'autres hypothèses et d'inclure d'autres paramètres dans le comportement de l'agent artificiel.

Les préparations des données pour des analyses statistiques sont réutilisables et prêtes à intégrer d'autres sources de données avec des modifications mineures. L'intégration d'autres données peut confirmer ou infirmer certaines règles et par conséquent permettre d'ajuster le comportement de l'agent artificiel. Nos travaux ont un caractère exploratoire et analytique, les résultats contribuent à fixer des situations

initiales d'un agent artificiel et ils doivent être enrichis pour être utilisables dans des situations réelles.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, J., & Slater, T. (2002). Implementing In-Class Collaborative Learning Group Activities in Large Lecture Astronomy. *Journal of College Science Teaching*, 31(2), 384-387.
- Alamargot, D. (2001). L'acquisition des connaissances. Dans D. Gaonac'h & C. Golder (dir.), *Enseigner à des adolescents. Manuel de Psychologie* (p. 78-113). Paris: Hachette Education.
- Amalberti, R., & Valot, C. (1993). *Le Magicien d'Oz*. Communication présenté CERMA, journée du PRC Rhône-Alpes.
- Argyle, M. (2007). *Social interaction*. New Brunswick, N.J.: AldienTransaction.
- Aroyo, L., Dicheva, D., & Velez, I. (2001). *A concept-based approach to support learning in a web-based course environment*. Communication présenté 10th International Conference on Artificial Intelligence in Education : Frontiers of Artificial Intelligence and Applications. Vol 68, Session 10 - Track 1. IOS Press., San Antonio, Texas, May 19-23 2001.
- Aubergé, V. (2002). Prosodie et émotion. *Actes des Deuxièmes Assises Nationales du GdR*, 3, 263-273.
- Baccino, T. (2004). *La lecture électronique*. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble.
- Baccino, T., Bellino, C., & Colombi, T. (2005). *Mesure de l'utilisabilité des interfaces*. Paris: Hermès science publications.
- Baccino, T., & Colombi, T. (2001). L'analyse des mouvements des yeux sur le Web. *Paris, Hermes*.

- Balota, D., Pollatsek, A., & Rayner, K. (1985). The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology*, 17(3), 364-390.
- Barber, P. J., & Legge, D. (1976). *Perception and information*. London: Methuen.
- Barré, V., Hassina, E.-K., & Choquet, C. (2005). *Re-engineering of collaborative e-learning systems: evaluation of system, collaboration and acquired knowledge qualities*. Communication présentée AIED'05 Workshop: Usage analysis in learning systems: Proceedings of the 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education, AIED 2005, Supporting Learning through Intelligent and Socially Informed Technology, July 18-22, 2005, Amsterdam, The Netherlands. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol.125, p.9-16, IOS Press, Amsterdam.
- Barrier, G. (2008). *La communication non verbale : comprendre les gestes : perception et signification*. (4^e éd.). Issy-les-Moulineaux, France: ESF Éditeur.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276-292.
- Betrancourt, M., Bauer-Morrison, J., & Tversky, B. (2001). Les animations sont-elles vraiment plus efficaces? *Revue d'intelligence artificielle*, 14(1-2), 149-166.
- Blondin, J. P., Freixa i Baqué, E., Bergeron, J., & Roy, J. C. (1990). Classification et nomenclature des phénomènes électriques cutanés (activité électrodermale). *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement*, 22(2), 151.
- Bonnet, C. (1989). La perception visuelle des formes. Dans C. Bonnet, R. Ghiglione & J.-F. Richard (dir.), *Traité de psychologie cognitive. Tome 1 : Perception, action, langage* (p. 1-76). Paris: Dunod.
- Boucsein, W. (1999). Electrodermal activity as an indicator of emotional processes. *Korean Journal of the Science of Emotion and Sensibility*, 2(1), 1-25.
- Bruner, J. (1997). Celebrating divergence: Piaget and Vygotsky. *Human Development*, 40(2), 63-73.
- Bruner, J. S. (1960). *The process of education*. Cambridge: Harvard University Press.
- Brusilovsky, P. (1996). Methods and techniques of adaptive hypermedia. *User modeling and user-adapted interaction*, 6(2), 87-129.

- Brusilovsky, P., & Peylo, C. (2003). Adaptive and intelligent Web-based educational systems. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 13(2), 159-172.
- Brysbaert, M., Drieghe, D., & Vitu, F. (2005). Word skipping: Implications for theories of eye movement control in reading. Dans G. Underwood (dir.), *Cognitive processes in eye guidance* (p. 53-77). New York, NY: Oxford University Press.
- Caelen, J. (1996). À l'écoute de la parole humaine. *Recherche*(285), 62-65.
- Caelen, J., Eglin, V., Hollard, S., & Meillon, B. (2003). *Mouvements oculaires et évaluation de documents électroniques*. Communication présentée CIDE: Colloque international sur le document électronique. Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS), p.77-86.
- Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1983). What Your Eyes Do while Your Mind Is Reading. Dans K. Rayner (dir.), *Eye movements in reading: Perceptual and language processes* (p. 275-307). San Diego, CA: Academic Press.
- Cassell, J., Sullivan, J., Prevost, S., & Churchill, E. F. (2000). *Embodied conversational agents*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Cattell, J. M. (1886). The time taken up by cerebral operations. *Mind*, 11(42), 220-242.
- Charlier, J., Sourdille, P., Behague, M., & Buquet, C. (1992). *Commande par le Regard d'un Système de Visualisation 2D : exemple du Microscope Opérateur*. Communication présentée Interface to real and virtual worlds (Informatique '92), Montpellier, France, 23-27 mars. Nanterre : EC2, p.659-666, Montpellier, France. Repéré à <http://www.useit.com/eyetracking/>
- Collet, C. (1999). *Capture et suivi du regard par un système de vision dans le contexte de la communication homme-machine*. (Thèse de doctorat en informatique, Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI) - CNRS, Orsay, France).
- Collewyn, H. (1998). Eye movement recording. Dans R. H. S. Carpenter & J. G. Robson (dir.), *Vision research: A practical guide to laboratory methods* (p. 245-285). Oxford: Oxford University Press.
- Conati, C., & Merten, C. (2007). Eye-tracking for user modeling in exploratory learning environments: An empirical evaluation. *Knowledge-Based Systems*, 20(6), 557-574.

- Conati, C., & Vanlehn, K. (2000). Toward computer-based support of meta-cognitive skills: A computational framework to coach self-explanation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 11(4), 389-415.
- Critchley, H. (2002). Electrodermal responses: what happens in the brain. *The Neuroscientist*, 8(2), 132.
- Da Silva, P., Courboulay, V., Prigent, A., & Estraillier, P. (2009). Attention visuelle et systèmes proies/prédateurs.
- Dawson, M. E., Schell, A. M., & Filion, D. L. (2000). The electrodermal system. Dans J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary & G. G. Berntson (dir.), *Handbook of psychophysiology* (2^e éd., p. 200-223). New York: Cambridge University Press.
- Deerwester, S., Dumais, S., Furnas, G., Landauer, T., & Harshman, R. (1990). Indexing by latent semantic analysis. *Journal of the American society for information science*, 41(6), 391-407.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18(1), 193-222.
- Dodge, R. (1900). Visual perception during eye movement. *Psychological Review*, 7(5), 454-465.
- Doise, W., Mugny, G., & Perret Clermont, A. N. (1975). Social interaction and the development of cognitive operations. *European Journal of Social Psychology*, 5(3), 367-383.
- Drieghe, D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (2005). Eye movements and word skipping during reading revisited. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(5), 954-969.
- Duchowski, A. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34(4), 455.
- Duchowski, A. (2007). *Eye tracking methodology: Theory and practice*. (2^e éd.). New York: Springer-Verlag.
- Dufresne, A. (1992). *Ergonomie cognitive, Hypermédias et Apprentissage*. Communication présentée Actes des premières journées scientifiques Hypermédias et Apprentissage, 24-25 septembre, Chatenay-Malabry, Paris : INRP, p.121-132, Paris.

- Dufresne, A. (2001). *ExploraGraph: Improving interfaces to improve adaptive support*. Communication présentée Proceedings of the AIED'2001.
- Dufresne, A. (2003). Interfaces et intégration des environnements pour le soutien aux activités de téléapprentissage. Dans A. Senteni & A. Taurisson (dir.), *Pédagogies. net : L'essor des communautés virtuelles d'apprentissage* (p. 139-166). Québec: Les Presses de l'Université du Québec.
- Dufresne, A., & Paquette, G. (2000). *ExploraGraph: A flexible and adaptive interface to support distance learning*. Communication présentée Proceedings of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications, EDMEDIA'2000, Chesapeake, VA: AACE, p.304-309.
- Duvernet, C., Padiolleau, C., & Pignot, P. (2001). Simulations dans l'enseignement des sciences économiques et sociales. *Revue de l'association Enseignement Public & Informatique*.
- Engbert, R., Kliegl, R., & Longtin, A. (2004). Complexity of eye movements in reading. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, 14(2), 493-504.
- Farouk, M., Rety, J. H., Delozanne, E., Grugeon, B., Bensimon, N., & Martin, J. C. (2007). Stratégies d'utilisation de la direction du regard en situation de communication interpersonnelle enseignant-élève. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour la Formation (STICEF) : Les Dimensions émotionnelles de l'interaction dans un EIAH*, 14, 14 pages.
- Fenn, W. O., & Hursh, J. B. (1934). Movements of the eye when the lids are closed. *American Journal of Physiology*, 118, 8-14.
- Firth, J. R. (1957). A synopsis of linguistic theory 1930-1955. Dans J. R. Firth (dir.), *Studies in linguistic analysis* (p. 1-32). Oxford: Blackwell.
- Frederiksen, C. H., Donin, J., & Roy, M. (2000). *Human tutoring as a model for computer tutors: Studying human tutoring from a cognitive perspective*. Communication présentée Proceedings of Workshop on Modeling Human Teaching Tactics and Strategies, ITS.
- Frey, L., White Jr, K., & Hutchison, T. (1990). Eye-gaze word processing. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(4), 944-950.
- Giasson, J. (1990). *La compréhension en lecture*. Boucherville, Québec: G. Morin.

- Giasson, J. (1997). *La lecture: de la théorie à la pratique*. Gaetan Morin.
- Guéraud, V. (1998). *Une approche auteur pour le développement de simulations pédagogiques à partir d'un environnement hypermédia*. Communication présentée Quatrième colloque hypermédiat et apprentissages, Lyon : INRP, p.108-120.
- Guéraud, V., Pernin, J. P., Cagnat, J. M., & Cortes, G. (1999). Environnements d'apprentissage basés sur la simulation: Outils auteur et expérimentations= Simulation based learning environments. Authoring tools and experiments. *Sciences et techniques éducatives*, 6(1), 95-141.
- Hernández, Y., Arroyo, G., & Sucar, L. E. (2009). *Obtaining Teachers' Expertise to Refine an Affective Model in an Intelligent Tutor for Learning Robotics*. Communication présentée Eighth Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2009, 9-13 Nov. Washington DC : IEEE Computer Society, p.122-127.
- Hix, D., & Hartson, H. R. (1993). *Developing user interfaces: ensuring usability through product & process*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Hornof, A., Cavender, A., & Hoselton, R. (2004). *EyeDraw: a system for drawing pictures with the eyes*. Communication présentée CHI '04 extended abstracts on Human factors in computing systems (CHI EA '04), New York, NY : ACM, p.1251-1254.
- Howse, M. A. (1998). *Student Ecosystems Problem Solving Using Computer Simulation*. Communication présentée 71st Annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, San Diego, CA, April 19-22.
- Huey, E. B. (1908). *The psychology and pedagogy of reading: With a review of the history of reading and writing and of methods, texts, and hygiene in reading*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
- Humphreys, G., & Bruce, V. (1989). *Visual cognition: Computational, experimental and neuropsychological perspectives*. Hove, UK: Psychology Press.
- Hutchinson, T., White Jr, K., Martin, W., Reichert, K., & Frey, L. (1989). Human-computer interaction using eye-gaze input. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19(6), 1527-1534.
- Iqbal, S. T., & Bailey, P. B. (2004). *Using eye gaze patterns to identify user tasks*. Communication présentée The Grace Hopper Celebration of Women in Computing.

- Istance, H., Spinner, C., & Howarth, P. (1996). *Providing motor impaired users with access to standard Graphical User Interface (GUI) software via eye-based interaction*. Communication présentée Proceedings of the 1st European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies (ECDVRAT '96), Maidenhead, UK, p.109-116, Maidenhead, UK.
- Jacob, P. (2003). Philosophie et neurosciences: le cas de la vision. *La Philosophie Cognitive*.
- Jacob, R. (1991). The use of eye movements in human-computer interaction techniques: what you look at is what you get. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 9(2), 169.
- Jacob, R. J. K. (1995). Eye tracking in advanced interface design. Dans W. Barfield & T. A. Furness III (dir.), *Virtual environments and advanced interface design* (p. 258-288). New York, NY: Oxford University Press.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York: Holt.
- Javal, E. (1905). *Physiologie de la lecture et de l'écriture*. Paris Retz-C.E.P.L.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models : towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Just, M., & Carpenter, P. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329-354.
- Kant, E. (1976). *Critique de la raison pure*. Paris: Garnier Flammarion.
- Kastner, S., & Ungerleider, L. G. (2000). Mechanisms of visual attention in the human cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 23(1), 315-341.
- Kendon, A. (1967). Some functions of gaze-direction in social interaction. *Acta Psychologica*, 26(1), 22.
- Kintsch, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: A construction-integration model. *Psychological Review*, 95(2), 163-182.
- Klein, R., & Pontefract, A. (1994). Does Oculomotor Readiness Mediate Cognitive Control of Visual Attention? Revisited! Dans C. Umiltà & M. Moscovitch (dir.), *Attention and Performance XV: Conscious and Nonconscious Information Processing* (p. 333-350). Cambridge, MA: MIT Press.

- Knudsen, E. (2007). Fundamental components of attention. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 57-78.
- Laguardia, J. G., & Ryan, R. M. (2000). Buts personnels, besoins psychologiques fondamentaux et bien-être: théorie de l'autodétermination et applications. *Revue québécoise de psychologie*, 21(2), 281-304.
- Lichtenberg, G. C. (1997). *Le Miroir de l'âme*. Paris: ditions Corti.
- Lindsay, P. H., Norman, D. A., & Jobin, R. (1980). *Traitement de l'information et comportement humain: une introduction à la psychologie*. Montréal: Éditions Études vivantes.
- Lisetti, C., & Nasoz, F. (2004). Using noninvasive wearable computers to recognize human emotions from physiological signals. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004(11), 1672–1687.
- Locke, J. (1882). *Quelques pensées sur l'éducation*. Paris: Hachette.
- Lowe, R. (1999). Extracting information from an animation during complex visual learning. *European Journal of Psychology of Education*, 14(2), 225-244.
- Mardaga, S. (2009). *La personnalité comme modulateur de la réactivité émotionnelle: une approche psychophysiological*. (Mémoire de maîtrise, Université de Liege, Belgique). Repéré à <http://www.openthesis.org/documents/La-comme-modulateur-de-la-529885.html>
- McKagan, S., Perkins, K., Dubson, M., Malley, C., Reid, S., LeMaster, R. (2008). Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76, 406.
- Mendelsohn, P. (1995). EIAO et psychologie cognitive. *Sciences et techniques éducatives*, 2(1), 9-29.
- Miellet, S. (2004). *Médiation phonologique, accès lexical et contrôle oculomoteur en lecture*. (Thèse de Doctorat, Université Charles-De-Gaulle Lille III, Villeneuve-d'Ascq, France).
- Monty, R. A., & Senders, J. W. (1976). *Eye movements and psychological processes*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mutet, S. (2003). *Simulation globale et formation des enseignants*. Tübingen, Allemagne: Gunter Narr Verlag.

- Neumann, E., & Blanton, R. (1970). The early history of electrodermal research. *Psychophysiology*, 6(4), 453-475.
- Nielsen, J. (1997). *User interface design for the WWW*. Communication présentée CHI '97 extended abstracts on Human factors in computing systems: looking to the future (CHI EA '97). New York, NY : ACM, p.140-141.
- Nielsen, J., & Pernice, K. (2009). *Eyetracking web usability*. Indianapolis, IN: New Riders Pub.
- Nkambou, R., Delozanne, E., & Frasson, C. (2007). Les dimensions émotionnelles de l'interaction dans un EIAH. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour la Formation (STICEF)*, 14.
- Nkambou, R., Laporte, Y., Yatchou, R., & Gouradarès, G. (2003). Embodied emotional agent in intelligent training system. Dans J. Kacprzyk, A. Abraham & L. C. Jain (dir.), *Recent advances in intelligent paradigms and applications* (p. 235-253). Heidelberg, Germany: Physica-Verlag GmbH.
- Nonnon, P., Touma, G., Dufresne, A., Guerdelli, F., & Rouatbi, M. (2004). *Des environnements informatisés d'apprentissage*. Communication présentée ACFAS'2004, 10-12 mai, Montreal, (Québec), Canada.
- Paquette, G., & Tchounikine, P. (1999). *Une approche méthodologique pour la construction de systèmes conseillers*. Communication présentée 10^{es} Journées Ingénierie des Connaissances (IC'99), Palaiseau, École polytechnique, 14-16 juin, Chambéry, France : AFIA, p.1-12.
- Pavlov, I. P. (1902). *The work of the digestive glands*. London: Charles Griffin.
- Petri, H. L., & Govern, J. M. (1991). *Motivation: Theory, research, and applications*. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.
- Piaget, J. (1975). *L'équilibration des structures cognitives: problème central du développement*. Paris: Presses universitaires de France.
- Piaget, J. (1976). *Le comportement, moteur de l'évolution*. Paris: Gallimard.
- Piaget, J. (2003). *La représentation du monde chez l'enfant*.
- Pocock, G., & Richards, C. (2004a). *Physiologie humaine: les fondements de la médecine*. Elsevier Masson.

- Pocock, G., & Richards, C. D. (2004b). *Physiologie humaine : les fondements de la médecine*. Paris: Elsevier Masson.
- Posner, M., Snyder, C., & Davidson, B. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109(2), 160-174.
- Pritchard, R. M. (1961). Stabilised image on the retina. *Scientific American*, 204(6), 72-79.
- Rayner, K. (1975). The perceptual span and peripheral cues in reading. *Cognitive Psychology*, 7(1), 65-81.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422.
- Rayner, K., & Bertera, J. (1979). Reading without a fovea. *Science*, 206(4417), 468-469.
- Rayner, K., & Pollatsek, A. (1989). *The psychology of reading*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Rayner, K., & Pollatsek, A. (1992). Eye movements and scene perception. *Canadian Journal of Psychology*, 46(3), 342-376.
- Rayner, K., Warren, T., Juhasz, B., & Liversedge, S. (2004). The effect of plausibility on eye movements in reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 30(6), 1290-1301.
- Richard, J. (1990). *Les activités mentales: Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris: Armand Colin.
- Richmond, V. P., McCroskey, J. C., & Hickson, M. L. (2007). *Nonverbal behavior in interpersonal relations*. (6^e éd.). Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Richoux, B., Salvétat, C., & Beaufils, D. (2002). Simulation numérique dans l'enseignement de la physique: enjeux, conditions. *Bulletin de l'Union des physiciens*, mars(842), 497-521.
- Rieber, L. (1990). Using computer animated graphics in science instruction with children. *Journal of Educational Psychology*, 82(1), 135-140.
- Ringle, M., & Halstead-Nussloch, R. (1989). Shaping user input: a strategy for natural language dialogue design. *Interacting with computers*, 1(3), 227-244.

- Robberechts, L. (1974). *Essai sur la philosophie réflexive*. Namur: Presses universitaires de Namur.
- Robinson, D. A. (1963). A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Transactions on Bio-medical Electronics*, 10(4), 137-145.
- Ryan, R., & Deci, E. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, 55(1), 68-78.
- Sadler, P., Whitney, C., Shore, L., & Deutsch, F. (1999). Visualization and representation of physical systems: Wavemaker as an aid to conceptualizing wave phenomena. *Journal of Science Education and Technology*, 8(3), 197-209.
- Salvucci, D. D., & Anderson, J. R. (2000). *Intelligent gaze-added interfaces*. Communication présentée Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI '00). New York, NY : ACM, p.273-280.
- Sansonnet, J.-P., Leray, D., & Martin, J.-C. (2006). Architecture of a framework for generic assisting conversational agents (*Intelligent Virtual Agents : Proceedings of the 6th international conference IVA 2006, Marina Del Rey, CA, USA, August 21-23* (Vol. 4133, Lecture notes in computer science, p. 145-156). New York, NY: Springer.
- Schank, R. C., & Abelson, R. P. (1977). *Scripts, plans, goals and understanding: An inquiry into human knowledge structures*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Scherrer, B. (2007). *Biostatistique*. (2ème édition^e éd.). Montréal: Gaëtan Morin (Chenelière).
- Schnotz, W., & Lowe, R. (2003). External and Internal Representations in Multimedia Learning. Introduction. *Learning and Instruction*, 13(2), 117-123.
- Schultheis, H., & Jameson, A. (2004). Assessing cognitive load in adaptive hypermedia systems: Physiological and behavioral methods (*International conference on adaptive hypermedia and adaptive web-based systems (AH 2004)*. Eindhoven , PAYS-BAS, 23-26 August (Vol. 3137, Lecture notes in computer science, p. 225-234). New York, NY: Springer.

- Shah, F., Evens, M., Michael, J., & Rovick, A. (2002). Classifying student initiatives and tutor responses in human keyboard-to-keyboard tutoring sessions. *Discourse Processes*, 33(1), 23-52.
- Sibert, J. L., Gokturk, M., & Lavine, R. A. (2000). *The reading assistant: eye gaze triggered auditory prompting for reading remediation*. Communication présentée Proceedings of the 13th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '00). New York, NY : ACM, p.101-107.
- Sims, V., & Hegarty, M. (1997). Mental Animation in the Visuospatial Sketchpad Evidence From Dual-Task Studies. *Memory and Cognition*, 25(3), 321-332.
- Skinner, B. (1982). Contrived reinforcement. *The Behavior Analyst*, 5(1), 3.
- Starker, I., & Bolt, R. A. (1990). *A gaze-responsive self-disclosing display*. Communication présentée Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Empowering people (CHI '90). New York, NY : ACM, p.3-10.
- Strahm, M., & Baccino, T. (2006). L'impact des schémas non analogiques conceptuels dans la compréhension de textes expositifs: stratégies visuelles selon l'expertise. *Psychologie française*, 51(1), 25-40.
- Strauss, R., & Kinzie, M. (1994). Student achievement & attitudes in a pilot study comparing an interactive videodisc simulation to conventional dissection. *The American Biology Teacher*, 56(7), 398-402.
- Tarchanoff, J. (1889). Décharges électriques dans la peau de l'homme sous l'influence de l'excitation des organes des sens et de différentes formes d'activité psychique. *Comptes Rendus des séances de la Société de Biologie* 41, S. 441, 451.
- Thorndike, E. L. (1913). *Educational psychology: The original nature of man*. New York, NY: Teachers College, Columbia University.
- Underwood, G., Clews, S., & Everatt, J. (1990). How do readers know where to look next? Local information distributions influence eye fixations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 42(1), 39-65.
- VanLehn, K., Siler, S., Murray, C., Yamauchi, T., & Baggett, W. (2003). Why do only some events cause learning during human tutoring? *Cognition and Instruction*, 21(3), 209-249.

- Vygotsky, L. S., Cole, M., John-Steiner, V., Scribner, S., & Souberman, E. (1978). *Mind and society: The development of higher psychological processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Wan der Meij, J., & de Jong, T. (2006). Supporting students' learning with multiple representations in a dynamic simulation-based learning environment. *Learning and Instruction, 16*(3), 199-212.
- Wang, M., Haertel, G., & Walberg, H. (1993). Toward a knowledge base for school learning. *Review of educational research, 63*(3), 249.
- Watson, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological Review, 20*(2), 158-177.
- Web. (2005). Revue l'attracteur. Repéré le 10/03/2009 2009 à <http://www.attracteur.qc.ca>
- Wenger, E. (1986). *Artificial intelligence and tutoring systems: Computational approaches to the communication of knowledge*. Los Altos, CA: Kaufman Publishers.
- Windschitl, M. (2000). Supporting the development of science inquiry skills with special classes of software. *Educational technology research and development, 48*(2), 81-95.
- Windschitl, M., & 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.
- Winkels, R. (1992). *Explorations in intelligent tutoring and help*. Washington, DC: IOS Press.
- Wolverton, G. S., & Zola, D. (1983). The temporal characteristics of visual information extraction during reading. Dans K. Rayner (dir.), *Eye movements in reading: Perceptual and language processes* (p. 41-51). New York, NY: Academic Press.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. New York, NY: Plenum press.

APPENDICE A

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Titre du projet

Intégration des mesures physiologiques et oculométriques pour la mesure de l'attention et de la compréhension et pour le soutien à l'apprentissage

Responsables du projet

Prof. Aude Dufresne, Ph.D.

aude.dufresne@umontreal.ca

Département de Communication, Université de Montréal

90, avenue Vincent-d'Indy

Montréal, Qc, Canada, H2V 2S9

(514) 343-7371

Prof. Roger Nkambou

nkambou.roger@uqam.ca

Faculté des Sciences de l'Uqam

Case postale 8888, succursale Centre-ville

Montréal (Québec) H3C 3P8

Téléphone (514) 987-3000, poste 8395

Préambule

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche impliquant d'un système tutoriel pour l'apprentissage des sciences physiques en utilisant les mesures physiologiques et oculométriques. Avant d'accepter de participer à ce projet, veuillez considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire de consentement vous explique le but de cette étude, les procédures, les avantages, les risques et inconvénients, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Le présent formulaire peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser des questions aux chercheurs et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

Les personnes ayant une déficience visuelle, auditive, tactile ou n'ayant pas la complète mobilité de leurs deux bras et de leurs deux mains ne pourront pas participer à l'expérimentation.

A) RENSEIGNEMENTS AUX PARTICIPANTS

1. Objectifs de la recherche.

Le projet auquel nous vous invitons à participer vise à développer un nouveau système tutoriel capable d'identifier l'état de stress de l'apprenant et d'identifier ce qu'il regarde. Le système devra améliorer la qualité de l'apprentissage en analysant les informations sur son regard et sur son stress. Le comportement de ce système est inspiré du comportement d'un tuteur humain qui est en train d'enseigner un cours à un étudiant. Dans la première phase, nous allons observer le comportement de l'apprenant et les interactions avec le tuteur. Dans la seconde phase, nous allons remplacer le tuteur humain par le système tutoriel et tester ses capacités d'offrir une aide adéquate aux apprenants. Le système sera ajusté graduellement et améliorée à travers une série d'expérimentations avec les participants. Chaque phase fera appel à 10 participants. Chaque participant est appelé à suivre la présentation du cours de physique et de résoudre des exercices reliés au cours d'une séance d'une durée d'environ 1h. Ces tests auront lieu à l'université de Montréal, aux laboratoires universitaires de Bell, Pavillon V135. À sa complétion, nous espérons que ce projet aura démontré qu'il est possible d'employer un tuteur automatisé pour aider les apprenants à apprendre. Il aura aussi permis de mieux comprendre l'étendue, les forces et les faiblesses de ce système.

2. Participation à la recherche

Vous êtes invité à participer à une séance d'expérimentation durant laquelle vous aurez à :

- (1) répondre à un court questionnaire portant sur vos capacités en sciences physiques : connaissance de l'effet photoélectrique.

- (2) accomplir des tâches reliées à la lecture du cours de physique vu sous l'angle classique et l'angle quantique
- (3) résoudre quelques exercices en utilisant le système présentant le cours de physique
- (4) répondre à des questions post expérimentales qui nous permettront de recueillir vos impressions sur le système.

Tout au long de l'apprentissage vous serez assisté par un professeur, qui pourra répondre à vos questions et vous aider. La séance durera environ 1h et des pauses vous seront accordées lorsque jugées nécessaires. Vous serez filmés durant les tâches d'interaction avec le système et votre regard et les mesures de stress seraient enregistrés pour être analysés.

3. Confidentialité

Tous les renseignements personnels recueillis à votre sujet au cours de l'étude seront codifiés afin d'assurer leur confidentialité. Ces données seront conservées sous clé par le responsable de l'étude durant et pour une période de 7 ans après la fin du projet, après quoi, elles seront détruites. Durant cette période, seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès. En cas de présentation de résultats de cette recherche ou de publication, rien ne pourra permettre de vous identifier.

4. Avantages et inconvénients

En participant à cette recherche, vous pourrez contribuer à l'avancement de vos connaissances sur la physique quantique et sur les instruments de mesure du suivi oculaire et du stress. Vous aurez un aperçu sur des nouvelles technologies de mesures pouvant accompagner l'apprentissage. Votre participation à la recherche vous donnera une occasion de tester ce matériel de pointe.

Les risques découlant de votre participation sont minimaux. Les responsables du projet ont mis tous les efforts nécessaires pour préparer une séance d'expérimentation sécuritaire et confortable. L'utilisation d'un capteur physiologique : mesure du GRS (conductance de la peau) qui sera placé sur deux doigts sans aucune colle ni irritation, peut présenter un petit inconfort, mais (la sensation disparaîtra peu de temps après l'installation 5-10 minutes). Il n'y a aucun risque et le participant continue à se servir de sa main normalement.

Ce capteur peut être retiré en tout temps et très rapidement.

De plus, il vous sera peut-être difficile de répondre à certaines questions. Vous ne serez donc pas obligés de répondre à une question si vous la jugez trop difficile.

Le but de ce projet n'est pas de juger votre habileté d'apprentissage d'un cours de physique, mais plutôt d'évaluer ce qu'un système tutoriel doit offrir à l'apprenant

pour assurer un apprentissage adéquat. Le déplacement de votre domicile au site de recherche et la durée de la session d'environ 1h heures pourraient aussi représenter un inconvénient pour vous.

5. Droit de retrait

Les responsables du projet s'engagent à répondre de façon satisfaisante à toutes vos questions concernant le projet de recherche. Ces questions peuvent être adressées à n'importe quel moment (i.e., avant, pendant et après les séances) en personne, par téléphone ou par courriel.

Votre participation au projet de recherche décrit ci-dessus est tout à fait libre et volontaire. En cas de retrait de votre part, les documents audiovisuels et écrits vous concernant seront détruits

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).

6. Indemnité

Vous serez compensé pour cette recherche à raison de ...\$ afin de pallier aux frais de transport.

APPENDICE B

LES VARIABLES DE SORTIE DE L'OCULOMETRE

Tobii T/X series Eye Trackers (source : www.tobii.com)

Timestamp	Timestamp in milliseconds for when the gaze data was collected
Gaze PointXLeft	Horizontal screen position of the gaze point for the left eye
GazePointYLeft	Vertical screen position of the gaze point for the left eye
CamXLeft	Horizontal location of the left pupil in the camera image (0 is left edge, 1 is right edge)
CamYLeft	Vertical location of the left pupil in the camera image (0 is top, 1 is bottom)
DistanceLeft	Distance from the eye tracker to the left eye. The distance is given in mm on a straight axis right out from the eye tracker plane
PupilLeft	Size of the pupil (left eye) in mm. The distance and pupil size measures are calculated to be as close to real values as possible. However, individual differences in the eyes of subjects and the strength of glasses/contact lenses will cause errors in these values. The measures still reflect changes in head position and pupil size accurately.
ValidityLeft	Validity of the gaze data. The validity is 0 if the eye is found and the tracking quality good. If the eye cannot be found by the eye tracker the validity code will be 4. Read more under the Validity codes section further down
Gaze PointXRight	The horizontal screen position of the gaze point for the right eye
GazePointYRight	Vertical screen position of the gaze point for the right eye
CamXRight	Horizontal location of the right pupil in the camera image (0 is left edge, 1 is right edge)
CamYRight	Vertical location of the right pupil in the camera image (0 is top, 1 is bottom)
DistanceRight	Distance from the eye tracker to the right eye. The distance is given in mm on a straight axis right out from the eye tracker plane
PupilRight	Size of the pupil (right eye) in mm. The distance and pupil size measures are calculated to be as close to real values as possible. However, individual differences in the eyes of subjects and the strength of glasses/contact lenses will cause errors in these values. However, the measures still reflect changes in head position and pupil size accurately
ValidityRight	Validity of the gaze data. The validity is 0 if the eye is found and the tracking quality good. If the eye cannot be found by the eye tracker the validity code will be 4. The value is for the right eye. Read more under the Validity codes section further down Additional data available in the Tobii Studio Raw Data Export

DateTimeStamp	Timestamp recalculated using the computer date time, shown in hours, minutes, seconds and milliseconds (hh:mm:ss:ms)
DateTimeStampStartOffset	Timestamp converted into hh:mm:ss format. The start time for the recording is also shown in the Replay and Visualization views in Tobii Studio if the option Show Date is selected in the Recordings field.
Number	Timestamps in numbered order
FixationIndex	Indexes for the fixation points (values correspond to the order of the fixation).
GazePointX	Gaze PointX can be the horizontal screen position for either eye or the average for both eyes. The value to show here is specified in Tobii Studio. This value is also used for the fixation definition.
GazePointY	GazePointY can be the horizontal screen position for either eye or the average for both eyes. The value to show here is specified in Tobii Studio. This value is also used for the fixation definition.
Event	Events, automatic and logged, will show up under Events. The automatic events are start and end events for the different media, mouse clicks and key presses. The automatic events are listed in the event table under Event Key and Data. The logged events are the manually logged events entered either in the replay view or from the remote logger
EventKey	Unique event key is shown for different key presses.
Data1	Data field for the event. The contents of this field vary depending on what type of event this is.
Data2	Data field for the event. The contents of this field vary depending on what type of event this is.
Descriptor	Description of the event. The contents vary depending on what type of event this is.
StimuliName	The file name of the media given in the setup in Tobii Studio
MediaWidth	Media size in pixels
MediaHeight	Media size in pixels
MediaPosX	Distance from the left side of the screen to the media on the screen given in pixels
MediaPosY	Distance from the top of the screen to the media on the screen given in pixels
MappedFixationPointX	X coordinate for the fixation point mapped to the media coordinate system, where the origin for the coordinate system is the top left corner of the image/media
MappedFixationPointY	Y coordinate for the fixation point mapped to the media coordinate system, where the origin for the coordinate system is the top left corner of the image/media
FixationDuration	Fixation duration. The time in milliseconds that a fixation lasts
Aoilds	ID number for the AOI, usually a counter starting at zero for the first AOI
AoiNames	Name of the AOI or AOIs if fixations on multiple AOIs are to be written on the same row
WebGroupImage	Filename of the image file that is used to visualize the web group
MappedGazeDataPointX	X coordinate for the raw gaze data point mapped to the media coordinate system where the origin for the coordinate system is the top left corner of the image/media
MappedGazeDataPointY	Y coordinate for the raw gaze data point mapped to the media coordinate system where the origin for the coordinate system is the top left corner of the image/media
MicroSecondTimestamp	Timestamp for this export row in microseconds
ValidityCodes	Validity code for each data point. This code is based on whether the system is able to identify correctly both eyes. It is recommended that the validity codes should always be used for data filtering, to remove data points that are obviously incorrect.

APPENDICE C

QUESTIONNAIRE POST EXPÉRIMENTATION

QUESTIONNAIRE D'EVALUATION DE LA FORMATION

Candidat # :

Date :.../.../....

Indiquez par une croix dans la colonne correspondante votre appréciation.

La signification des chiffres est la suivante :

1. Pas du tout d'accord	2. Pas d'accord	3. Ni en désaccord ni d'accord	4. D'accord	5. Tout à fait d'accord
-------------------------	-----------------	--------------------------------	-------------	-------------------------

1. Connaissances préalables en physique quantique	1	2	3	4	5
Je n'ai pas suivi un cours sur la physique quantique (effet photoélectrique)					
Je n'ai pas utilisé un simulateur de l'effet photoélectrique					
J'ai des connaissances préalables sur la lumière					
J'ai des connaissances préalables sur l'effet photoélectrique					
Je suis familier avec le vocabulaire et formules utilisés					
2. Perception de l'environnement d'apprentissage					
J'ai trouvé le cours théorique facile					
J'ai trouvé le cours théorique complet					
J'ai trouvé la progression cours et son enchaînement logiques					
Les graphiques du cours étaient pertinents					
Je n'ai pas eu besoin d'aide du professeur pour comprendre la partie théorique					
Je n'ai pas demandé de l'aide du professeur pour la partie théorique du cours					
J'étais à l'aise lors de l'utilisation de l'environnement d'apprentissage					
J'ai trouvé l'emplacement des boutons de commande adéquat					
J'ai trouvé le texte des boutons de commande clair					
Les énoncés des questions posées étaient clairs					
Les textes des choix de réponses étaient clairs					
3. Perception des effets des équipements					
La présence de l'oculomètre (l'appareil) me m'a pas dérangé					
J'ai oublié la présence de l'oculomètre après avoir commencé la séance					
Les capteurs physiologiques ne m'ont pas dérangé					

J'ai oublié la présence des capteurs physiologiques durant la séance					
4. Le besoin d'aide et la perception de l'aide proposée					
Les rétroactions m'ont apporté de l'aide pour répondre aux questions					
Les rétroactions m'ont incité à chercher les réponses par mes propres moyens					
L'aide du système était claire et facile à comprendre					
Les questions étaient faciles					
J'ai toujours essayé de trouver des réponses aux questions avant de demander l'aide du prof					
J'ai eu besoin d'aide pour résoudre certains problèmes					
Les problèmes posés m'ont incité à expérimenter					
5. Perception du rôle du professeur					
Les explications fournies par le professeur étaient claires et compréhensibles					
Le professeur était à mon écoute durant toute la session					
La présence du professeur m'était nécessaire					
L'aide du professeur était importante					
Le professeur intervenait quand j'en avais besoin					
6. Connaissances acquises					
L'environnement d'apprentissage m'a apporté des nouvelles connaissances					
J'ai bien compris la partie théorique					
J'ai bien réussi la partie expérimentale					
J'ai trouvé que la physique classique présentait des limitations					
7. Suggestions des apprenants					
J'ai préféré la présence du physique du prof					
J'ai préféré la présence d'autres étudiants dans la même salle que moi					
J'utiliserai le simulateur Phet lors du prochain cours sur l'effet photoélectrique					
J'accepterai de suivre un cours de ce genre sans la présence physique du prof					