

Thèse en informatique, faculté des arts et des sciences



UNIVERSITÉ
DE
MONTRÉAL

AMORÇAGE COGNITIF POUR AMÉLIORATION
DE L'ACQUISITION DE LA CONNAISSANCE DANS
UN SYSTÈME TUTORIEL INTELLIGENT

Pierre CHALFOUN | 2012

Université de Montréal

**Amorçage cognitif pour amélioration de l'acquisition de la connaissance
dans un système tutoriel intelligent**

par

Pierre Chalfoun

Département d'informatique et de recherche opérationnelle
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en informatique

Septembre 2012

© Pierre Chalfoun, 2012

Université de Montréal
Faculté des arts et des sciences

Cette thèse intitulée :

**Amorçage cognitif pour amélioration de l'acquisition de la connaissance
dans un système tutoriel intelligent**

présentée par :
Pierre Chalfoun

sera évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Yoshua Bengio, président-rapporteur
Claude Frasson, directeur de recherche
Roger Nkambou, membre du jury
Stefano Cerri, examinateur externe
Christine Dufour, représentante du Doyen

Résumé

Cette thèse vise à définir une nouvelle méthode d'enseignement pour les systèmes tutoriels intelligents dans le but d'améliorer l'acquisition des connaissances. L'apprentissage est un phénomène complexe faisant intervenir des mécanismes émotionnels et cognitifs de nature consciente et inconsciente. Nous nous intéressons à mieux comprendre les mécanismes inconscients du raisonnement lors de l'acquisition des connaissances. L'importance de ces processus inconscients pour le raisonnement est bien documentée en neurosciences, mais demeure encore largement inexplorée dans notre domaine de recherche. Dans cette thèse, nous proposons la mise en place d'une nouvelle approche pédagogique dans le domaine de l'éducation implémentant une taxonomie neuroscientifique de la perception humaine. Nous montrons que cette nouvelle approche agit sur le raisonnement et, à tour de rôle, améliore l'apprentissage général et l'induction de la connaissance dans un environnement de résolution de problème.

Dans une première partie, nous présentons l'implémentation de notre nouvelle méthode dans un système tutoriel visant à améliorer le raisonnement pour un meilleur apprentissage. De plus, compte tenu de l'importance des mécanismes émotionnels dans l'apprentissage, nous avons également procédé dans cette partie à la mesure des émotions par des capteurs physiologiques. L'efficacité de notre méthode pour l'apprentissage et son impact positif observé sur les émotions a été validée sur trente et un participants.

Dans une seconde partie, nous allons plus loin dans notre recherche en adaptant notre méthode visant à améliorer le raisonnement pour une meilleure induction de la connaissance. L'induction est un type de raisonnement qui permet de construire des règles générales à partir d'exemples spécifiques ou de faits particuliers. Afin de mieux comprendre l'impact de notre méthode sur les processus cognitifs impliqués dans ce type de raisonnement, nous avons eu recours à des capteurs cérébraux pour mesurer l'activité du cerveau des utilisateurs. La validation de notre approche réalisée sur quarante-trois volontaires montre l'efficacité de notre méthode pour l'induction de la connaissance et la viabilité de mesurer le raisonnement par des mesures cérébrales suite à l'application appropriée d'algorithmes de traitement de signal.

Suite à ces deux parties, nous clorons la thèse par une discussion applicative en décrivant la mise en place d'un nouveau système tutoriel intelligent intégrant les résultats de nos travaux.

Mots-clés : amorçage cognitif, inconscient cognitif, systèmes tutoriels intelligents, agent subliminal, émotion, cerveau, biométrie

Abstract

This thesis aims at defining a new learning method to improve knowledge acquisition for intelligent tutoring systems. Learning is a complex phenomenon interlinking both emotional and cognitive mechanisms on conscious and unconscious levels. We are interested in understanding the unconscious mechanisms involved in human reasoning for knowledge acquisition. The importance of these unconscious processes is well documented in neuroscience, but remains largely unexplored in our research field. In this thesis, we put forward a new pedagogical approach in the field of education based on a taxonomy of human perception in neuroscience. We show that this method improves on reasoning which in turn enhances overall learning and inductive capabilities for knowledge acquisition in a problem solving environment.

In a first part, we present the implementation of our new method in a tutorial system to improve reasoning hence leading to better learning. Furthermore, acknowledging the importance of emotional mechanisms in learning, we therefore recorded, in this first part, the emotional reactions of users using physiological sensors. The effectiveness of our method for learning and its positive impact on emotions has been validated on 31 participants.

In a second part, we go further in our research and enhance our approach in order to improve reasoning for a better induction of knowledge. Induction in a bottom-up logical reasoning approach where one constructs general rules from observed examples. To better understand the impact of our method on the cognitive processes involved in this type of reasoning, we used sensors to record the users' brain electrical activity. The validation of our approach was carried out on a cohort of 43 volunteers. We showed the effectiveness of our method on the induction of knowledge and sustainability of measuring user's reasoning by brain recordings after applying proper signal processing algorithms to the data.

Following the two parts, we finish the thesis by presenting the implementation of a new intelligent tutoring system incorporating the results found throughout this work.

Keywords : cognitive priming, unconscious cognition, intelligent tutoring systems, subliminal agent, emotion, brain, biometric

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS.....	xiv
REMERCIEMENTS.....	xvi
1. INTRODUCTION	18
1.1. SYSTEME TUTORIEL INTELLIGENT	20
1.2. SYSTÈME TUTORIEL ÉMOTIONNEL INTELLIGENT.....	21
1.3. L'APPRENTISSAGE DANS UN SYSTÈME TUTORIEL INTELLIGENT	22
1.3.1. LES DEUX PRINCIPAUX COURANTS DE RECHERCHE POUR LES STI.....	22
1.3.2. LIMITE DES STRATÉGIES PÉDAGOGIQUES ACTUELLES.....	24
1.4. INCONSCIENT COGNITIF	25
1.4.1. PERCEPTION INCONSCIENTE	26
1.4.2. PERCEPTION SUBLIMINALE	28
1.4.3. AMORÇAGE COGNITIF.....	29
1.5. OBJECTIFS DES TRAVAUX DE RECHERCHE	33
PARTIE I : AMÉLIORER L'APPRENTISSAGE DANS UN STI.....	36
2. AMORÇAGE COGNITIF : DIMENSION ÉMOTIONNELLE.....	38
2.1. TERMINOLOGIE	39
2.2. ÉMOTION ET APPRENTISSAGE	40
2.3. DÉTECTION DES ÉTATS AFFECTIFS PAR LA BIOMÉTRIE.....	41
2.3.1. PHYSIOLOGIE DES ÉMOTIONS : PRINCIPES ET MÉTHODES.....	43
2.3.2. NORMALISATION DES MESURES PHYSIOLOGIQUES.....	46
2.4. PROBLÉMATIQUE	48
2.5. MÉTHODE.....	48
2.5.1. L'AMORÇAGE COGNITIF UTILISÉ.....	51
2.5.2. LE SYSTÈME UTILISÉ.....	52
2.5.3. LES CAPTEURS PHYSIOLOGIQUES UTILISÉS.....	53
2.6. CONCLUSION	54

3. (REVUE N° 1) L'AMORÇAGE COGNITIF AMÉLIORE L'APPRENTISSAGE DANS UN STI VIRTUEL EN 3D	56
3.1. ABSTRACT	60
3.2. INTRODUCTION.....	60
3.3. SUBLIMINAL PRIMING.....	61
3.4. RELATED WORK	63
3.5. EXPERIMENT	64
3.5.1. DESIGN OF THE EXPERIMENT	64
3.5.2. MOCAS AND MATERIAL USED.....	66
3.5.3. LEARNERS TESTED.....	67
3.6. RESULTS AND DISCUSSION	68
3.7. CONCLUSION	71
4. DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	74
4.1. DISCUSSION SUR L'AMORÇAGE COGNITIF.....	75
4.1.1. EFFET CUMULATIF POSITIF OBSERVÉ	75
4.1.2. GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE D'AMORÇAGE UTILISÉE.....	77
4.2. DISCUSSION SUR LA DIMENSION ÉMOTIONNELLE	77
4.2.1. VARIATIONS AFFECTIVES OBSERVÉES PENDANT LA RÉOLUTION DE PROBLÈME	77
4.2.2. PERTINENCE DE LA PÉRIODE DE REPOS ("BASELINE").....	80
4.2.3. DURÉE DE VIE D'UNE ÉMOTION	81
4.2.4. DEGRÉ D'INTENSITÉ D'UNE ÉMOTION.....	81
4.2.5. UTILISATION DE CAPTEURS COMPLÉMENTAIRES	81
4.3. DISCUSSION SUR L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL UTILISÉ	82
4.3.1. AMÉLIORATIONS GÉNÉRALES DU MONDE VIRTUEL	82
4.3.2. OPTIMISER LA NAVIGATION	82
4.3.3. PERSONNALISATION DES AGENTS VIRTUELS.....	83
4.3.4. HOMOGENÉITÉ DE L'ÉCHANTILLON.....	84
4.4. CONCLUSION	84
PARTIE II : AMÉLIORER L'INDUCTION DE LA CONNAISSANCE.....	86
5. AMORÇAGE COGNITIF : DIMENSION CÉRÉBRALE.....	88
5.1. ENCÉPHALOGRAPHIE : PRINCIPES ET MÉTHODES	89
5.1.1. MÉTHODE N° 1 : ONDES CÉRÉBRALES	94
5.1.2. MÉTHODE N° 2 : POTENTIELS ÉVOQUÉS	95
5.1.3. JUSTIFICATION DU CHOIX DE LA MÉTHODE D'ANALYSE	97
5.1.4. FONCTIONS COGNITIVES MESURABLES PAR LA MÉTHODE ONDES CÉRÉBRALE.....	97
5.2. PROBLÉMATIQUE	100
5.3. MÉTHODE.....	101

5.3.1. DÉROULEMENT GÉNÉRAL DE L'EXPÉRIENCE.....	101
5.3.2. AMORÇAGE COGNITIF ENRICHIS.....	102
5.3.3. LE SYSTÈME UTILISÉ.....	103
5.3.4. LES CAPTEURS UTILISÉS.....	105
5.4. CONCLUSION.....	106
6. (REVUE N° 2) AMORÇAGE COGNITIF POUR LE RAISONNEMENT: NOUVELLE TECHNIQUE POUR AMÉLIORER L'ENSEIGNEMENT.....	108
6.1. ABSTRACT.....	112
6.2. INTRODUCTION.....	112
6.3. RELATED WORK.....	115
6.4. SUBLIMINAL PRIMING IN HCI.....	117
6.5. BACKGROUND ON EEG AND AFFECTIVE DATA.....	119
6.5.1. BACKGROUND ON EEG.....	119
6.5.2. BACKGROUND ON AFFECTIVE DATA.....	122
6.6. EXPERIMENT.....	123
6.6.1. METHODOLOGY.....	124
6.6.2. CUE CONSTRUCTION.....	126
6.6.3. PHYSIOLOGICAL RECORDINGS.....	126
6.7. RESULTS AND DISCUSSION.....	127
6.7.1. PRE-TEST RESULTS.....	127
6.7.2. DESCRIPTIVE ANALYSIS.....	128
6.7.3. AFFECTIVE DATA ANALYSIS.....	133
6.7.4. EEG DATA ANALYSIS.....	135
6.8. CONCLUSION AND FUTURE WORK.....	136
6.9. ACKNOWLEDGEMENTS.....	137
7. DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	138
7.1. DISCUSSION SUR L'AMORÇAGE COGNITIF.....	139
7.1.1. DIFFÉRENCES DE PERFORMANCE ENTRE LES GROUPES.....	139
7.1.2. L'IMPACT DU GROUPE SUR LA MANIÈRE DE RÉPONDRE À UNE QUESTION.....	141
7.1.3. RATIO DE SUCCÈS.....	142
7.1.4. MODIFICATION DYNAMIQUE DE LA VITESSE D'AMORÇAGE.....	143
7.1.5. TAILLE DE L'ÉCHANTILLON UTILISÉ.....	144
7.2. DISCUSSION SUR LA DIMENSION CÉRÉBRALE.....	144
7.2.1. APPORT DU EEG AU RAISONNEMENT LOGIQUE VERSUS INTUITIF.....	144
7.2.2. ASYMÉTRIE CÉRÉBRALE : QUELQUES LIMITATIONS.....	146
7.2.3. ANALYSE INDIVIDUELLE DES PLAGES DE FRÉQUENCES.....	147
7.3. CONCLUSION.....	148

8. DISCUSSION APPLICATIVE DE LA RECHERCHE	150
8.1. CHARLIE : UN STI CLIENT-SERVEUR MULTI-AGENTS AVEC AMORÇAGE COGNITIF.....	151
8.1.1. CRÉER DES LEÇONS	154
8.1.2. ORDONNER LA MATIÈRE	155
8.1.2.1. PARAMÉTRER LES LEÇONS ET QUESTIONS.....	155
8.1.2.2. CRÉER LA LISTE DES PRÉREQUIS POUR LES LEÇONS	156
8.1.3. APPLIQUER DES STRATÉGIES PÉDAGOGIQUES	157
8.1.4. APPLIQUER L'AMORÇAGE COGNITIF	158
8.1.5. MODÉLISER L'APPRENANT	160
8.1.5.1. AUTHENTIFIER ET AJOUTER DES APPRENANTS	160
8.1.5.2. SUIVI DES RÉSULTATS	161
8.1.5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES BIOMÉTRIQUES.....	162
8.1.6. ENREGISTRER LES OPÉRATIONS.....	163
8.2. CONCLUSION	165
9. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION.....	166
9.1. CONTRIBUTION POUR LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE	167
9.2. TRAVAUX FUTURS	169
BIBLIOGRAPHIE.....	172

Liste des tableaux

TABLEAU 2.1 – CAPTEURS MULTIPLES POUR MESURER DIVERS ÉTATS AFFECTIFS.....	42
TABLEAU 2.2 – RÉSUMÉ DES DIVERS CAPTEURS ET LEUR RÔLE POUR LA DÉTECTION ÉMOTIONNELLE.	45
TABLEAU 2.3 – EXEMPLE DE NORMALISATION AFIN DE FAIRE UNE COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS GROUPES	47
TABLEAU 3.1 – DISTRUBUTION DES APPRENANTS	68
TABLEAU 3.2 – NIVEAU DE MOTIVATION DES APPRENANTS	68
TABLEAU 3.3 – NIVEAU D’ENGAGEMENT DES APPRENANTS	69
TABLEAU 5.1 – PLAGES DE FRÉQUENCES EEG LES PLUS FRÉQUEMMENT UTILISÉES	94
TABLEAU 6.1 – DISTRIBUTION DES APPRENANTS.	125
TABLEAU 6.2 – RÉSULTATS DES TESTS PSYCHOMÉTRIQUES DES APPRENANTS.....	128
TABLEAU 6.3 – DISTRIBUTION DES APPRENANTS	129
TABLEAU 6.4 – ANALYSE CROISÉE DES ERREURS EN FONCTION DES RÉPONSES ET DE LA LEÇON	129
TABLEAU 6.5 – ANALYSE CROISÉE DES ERREURS EN FONCTION DES RÉPONSES ET DU GROUPE	130
TABLEAU 6.6 – ANALYSE CROISÉE DES ERREURS EN FONCTION DES RÉPONSES, DE LA LEÇON ET DU GROUPE	131
TABLEAU 6.7 – RAPPORT DE PERFORMANCE DU RATIO DE SUCCÈS	132
TABLEAU 6.8 – RAPPORT GÉNÉRAL DE PERFORMANCE	133
TABLEAU 7.1 – DIFFÉRENCES ENTRE UTILISATEURS.....	140
TABLEAU 7.2 – DIFFÉRENCES DE PERFORMANCE LORS DE LA RÉPONSE AUX QUESTIONS EN FONCTION DU GROUPE.....	141
TABLEAU 7.3 – TABLEAU RÉSUMANT LES RÉSULTATS DU RATIO DE SUCCÈS EN FONCTION DES GROUPES	142
TABLEAU 8.1 – LISTE DES FONCTIONNALITÉS DE HAUT NIVEAU DE CHARLIE	154

Liste des figures

FIGURE 1.1 – ÉVOLUTION DES MÉTHODES D'APPRENTISSAGES AU FIL DU TEMPS	19
FIGURE 1.2 - LES COMPOSANTES PRINCIPALES D'UN SYSTÈME TUTORIEL INTELLIGENT.....	20
FIGURE 1.3 – LES TROIS ÉTAPES DU TRAITEMENT DE L'INFORMATION SELON LE COGNITIVISME	23
FIGURE 1.4 – CATÉGORISATION DE L'INCONSCIENT COGNITIF.....	25
FIGURE 1.5 – PERCEPTION ET TRAITEMENT INCONSCIENT DES VISAGES ÉMOTIONNELS	27
FIGURE 1.6 – PERCEPTION INCONSCIENTE DES VISAGES DE PEUR VERSUS LES VISAGES NEUTRES	28
FIGURE 1.7 – LE TRAITEMENT INCONSCIENT DES REPRÉSENTATIONS SÉMANTIQUES DES MOTS	30
FIGURE 1.8 - AMORÇAGE COGNITIF NUMÉRIQUE	31
FIGURE 2.1 – LA RÉPARTITION DES CAPTEURS EN FONCTION DU SYSTÈME NERVEUX	43
FIGURE 2.2 – MODÈLE DE LANG POUR LA CLASSIFICATION DES ÉMOTIONS	44
FIGURE 2.3 – PRINCIPE DE LA NORMALISATION DES DONNÉES PHYSIOLOGIQUES	47
FIGURE 2.4 – LA LEÇON ENSEIGNÉE AINSI QUE LES TROIS RÈGLES QUE L'APPRENANT DOIT COMPRENDRE POUR RÉUSSIR.	49
FIGURE 2.5 – DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE	50
FIGURE 2.6 – UN EXEMPLE D'AMORÇAGE COGNITIF ENTRE DEUX TRANSPARENTS.....	51
FIGURE 2.7 – UNE VUE DE HAUT DE L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL AVEC SES QUATRE SALLES	52
FIGURE 2.8 – LE STI EN 3D MODIFIÉ POUR CETTE ÉTUDE.....	53
FIGURE 2.9 – MATÉRIEL PHYSIOLOGIQUE UTILISÉ POUR ENREGISTRER LES ÉMOTIONS.....	54
FIGURE 3.1 – CARRÉ MAGIQUE IMPAIR D'ORDRE 5.	65
FIGURE 3.2 – AMORÇAGE COGNITIF DE LA SOLUTION ENTRE DEUX TRANSPARENTS	66
FIGURE 3.3 – L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL D'APPRENTISSAGE EN 3D	67
FIGURE 3.4 – LE NOMBRE TOTAL D'ERREURS COMMISES POUR CHAQUE RÈGLE	69
FIGURE 3.5 – TEMPS MOYEN DE RÉPONSE À CHAQUE QUESTION.....	70
FIGURE 3.6 – MOYENNE DU SIGNAL GSR POUR TOUS LES SUJETS LORS DE L'APPRENTISSAGE DE LA DEUXIÈME RÈGLE	71
FIGURE 4.1 – IMPACT DES VARIATIONS ÉMOTIONNELLES SUR LES RÉSULTATS PAR RÈGLE	76
FIGURE 4.2 – VARIATIONS ÉMOTIONNELLES OBSERVÉES SUITE AUX AMORCES LORS DE L'APPRENTISSAGE	78
FIGURE 4.3 – VUE DE HAUT DE LA CONFIGURATION DU MONDE VIRTUEL UTILISÉ.....	83
FIGURE 5.1 – ORIGINES D'UN TRACÉ EEG	90
FIGURE 5.2 – ONDES CÉRÉBRALES ENREGISTRÉES PENDANT UNE SECONDE	91
FIGURE 5.3 – MATÉRIEL PHYSIOLOGIQUE UTILISÉ POUR ENREGISTRER LES ONDES CÉRÉBRALES.....	92
FIGURE 5.4 – LES FONCTIONS COGNITIVES EN FONCTION DES HÉMISPHÈRES	93
FIGURE 5.5 – APERÇU DES DEUX MÉTHODES D'ANALYSE EEG SUR 10 SECONDES DE DONNÉES.	93
FIGURE 5.6 - PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE POTENTIELS ÉVOQUÉS.	96

FIGURE 5.7 – DEUX MÉTHODES POUR CALCULER UNE ASYMÉTRIE CÉRÉBRALE.....	98
FIGURE 5.8 – DÉROULEMENT DE LA DEUXIÈME ÉTUDE	101
FIGURE 5.9 – AMORÇAGE COGNITIF D’UNE ASTUCE <i>RÉPONSE</i> EN (A) VERSUS UNE AMORCE <i>ERREUR</i> EN (B)	103
FIGURE 5.10 - SAISIE D'ÉCRAN DU SYSTÈME UTILISÉ ET RÉACTION DE L'APPRENANTE SUITE À UNE ERREUR COMMISE	104
FIGURE 5.11 – MATÉRIEL PHYSIOLOGIQUE UTILISÉ POUR ENREGISTRER LES ÉMOTIONS	105
FIGURE 6.1 – TRAITEMENT DE DIX SECONDES DE DONNÉES BIOMÉTRIQUES PAR DEUX MÉTHODES D’ANALYSE DE L’EEG.....	120
FIGURE 6.2 – ESPACE AFFECTIF EN DEUX DIMENSIONS EN FONCTION DE LA VALENCE ET L’ACTIVATION.	123
FIGURE 6.3 – LES CINQ ÉTAPES DE LA MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	124
FIGURE 6.4 – AMORCE RÉPONSE VERSUS AMORCE ERREUR	126
FIGURE 6.5 – MATÉRIEL UTILISÉ POUR L’ENREGISTREMENT DES DONNÉES BIOMÉTRIQUES	127
FIGURE 6.6 - RÉSULTATS DE L’ANALYSE ÉMOTIONNELLE DES SIGNAUX PHYSIOLOGIQUES	134
FIGURE 6.7 - RÉSULTATS DE L’ANALYSE CÉRÉBRALE DES ASYMÉTRIES DE LA PLAGE BETA ET DE LA BANDE 40HZ	135
FIGURE 7.1 – L’APPORT IMPORTANT DES DONNÉES EEG DANS L’ANALYSE DES ÉTATS MENTAUX ET AFFECTIFS	145
FIGURE 7.2 – RAISONNEMENT INTUITIF PAR UNE APPRENANTE LORS DE L’APPRENTISSAGE D’UNE LEÇON	146
FIGURE 8.1 – ARCHITECTURE CLIENT-SERVEUR DE CHARLIE.....	151
FIGURE 8.2 – LES OBJECTIFS VISÉS PAR LES AGENTS EN SUIVANT LA MÉTHODOLOGIE TROPOS.....	153
FIGURE 8.3 – PROCESSUS DE GÉNÉRATION SEMI-AUTOMATIQUE DE LEÇONS.....	155
FIGURE 8.4 – AFFICHAGE D’UNE QUESTION DANS L’INTERFACE À PARTIR DE DONNÉES XML.....	156
FIGURE 8.5 – EXTRAIT DE RÈGLES PRÉ-REQUISES PROVENANT DU SERVEUR ET TRAITÉES PAR L’INTERFACE.....	157
FIGURE 8.6 – ENTITÉS SOLLICITÉES PAR L’AGENT SUBLIMINAL	158
FIGURE 8.7 – UN EXEMPLE D’AMORÇAGE COGNITIF POUR CHARLIE.....	159
FIGURE 8.8 – DEUX SCÉNARIOS POUR L’AUTHENTIFICATION	161
FIGURE 8.9 – SAUVEGARDE DES RÉSULTATS SUR LE SERVEUR ET LEUR AFFICHAGE DANS L’INTERFACE.....	162
FIGURE 8.10 – EXTRAIT DE DONNÉES CÉRÉBRALES TRAITÉES EN PARALLÈLE À L’UTILISATION DU SYSTÈME	163
FIGURE 8.11 – FICHIER JOURNAL GLOBAL POUR TOUTES LES OPÉRATIONS SUR LE SERVEUR (JAVA)	164
FIGURE 8.12 – FICHIER JOURNAL GLOBAL POUR TOUTES LES OPÉRATIONS SUR LE CLIENT (C++)	165

Abréviations et notations

Terme	Signification
2D	Environnement à deux D imensions
3D	Environnement à trois D imensions (environnement virtuel)
ACL	A gent C ommunication L anguage
AMS	Fait référence à l'agent responsable des autres agents dans la plateforme JADE (« A gent M anagement S ystem »)
BVP	Capteur physiologique pour la pression sanguine (« B lood V olume P ressure »). On utilise ce capteur pour calculer le rythme cardiaque.
CHARLIE	Le nom du système tutoriel intelligent que nous avons mis sur pied. Le nom est en hommage postume à mon père.
DF	Fait référence à l'agent facilitateur de service dans la plateforme JADE (« D irectory F acilitator »)
EEG	Capteur cérébral employé dans l'ÉlectroEncéphaloGraphie (mesure de l'activité cérébrale).
ERP	Méthode de traitement du signal pour étudier le comportement du signal EEG brut en lien avec un événement déclencheur (« E vent R elated P otential »)
FIPA	F oundation F or I ntelligent P hysical A gents
FFT	Transformée rapide de Fourier (« F ast F ourier T ransform »)
GSR	Capteur physiologique pour la sudation de la peau (« G alvanic S kin R esponse »)
HCI	Interaction homme machine (« H uman C omputer I nteraction »)
HR	Le rythme cardiaque (« H eart R ate »)
IBI	L'intervalle de temps entre les battements cardiaques (« I nter- B eat I ntervals »)
JADE	J ava A gent D evelopment F ramework
Jadex	Plateforme construite sur JADE pour la construction d'agents intelligents cognitifs
Ln	Fait référence à la fonction du logarithme naturel appliquée à un signal EEG.
MOCAS	M OTivational and C ulturally A ware S ystem
MVC	Architecture de conception des applications (« M odel- V iew- C ontroller »)
P300	Une réaction cérébrale suite à un stimulus pertinent au cerveau que l'on retrouve par ERP. P pour amplitude positive et 300 pour la latence observée suite à un stimulus. Idem pour N400 , mais N pour amplitude négative.
RESP	Capteur physiologique pour la R ESPiration
SMA	S ystèmes M ulti- A gents
STI	S ystèmes T utoriels I ntelligents
STEI	S ystèmes T utoriels É motionnels I ntelligents
TCP/IP	Protocole de transmission des données sur Internet (« T ransmission C ontrol P rotocol/ I nternet P rotocol »)
TEMP	Capteur physiologique pour la température de la peau (« S kin T EMPerature »)
TAOM4E	L'outil officiel de la méthodologie TROPOS pour la conception d'agents intelligents (« T ool for A gent O riented visual M odeling for the E clipse platform »)
XML	Langage pour faciliter l'échange de données entre les systèmes (« e Xtensible M arkup L anguage»)

À Fadia et Sandrine pour votre amour inconditionnel

Remerciements

La lecture des remerciements a toujours fait partie d'une des premières sections que je regarde dans une thèse. Je n'avais jamais vraiment réalisé pourquoi jusqu'au moment où je me retrouve moi-même à rédiger cette section. Vous me permettrez donc de savourer ce moment qui n'arrive qu'une fois dans une vie. Une thèse, à l'image d'une des activités préférées de mon directeur, est comme un voyage en mer. Il nous faut rassembler plusieurs conditions gagnantes pour traverser avec succès les eaux parfois troubles et profondes que sont les défis de la vie. Plusieurs personnes ont contribué de façon très significative à ce voyage et je voudrais prendre le temps, en bon matelot, de proprement les remercier.

D'entrée de jeu, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à mon directeur, le professeur Claude Frasson, pour la confiance qu'il m'a accordée tant au niveau scientifique, en me laissant carte blanche pour mettre le cap dans une nouvelle direction pluridisciplinaire, qu'au niveau administratif, en acceptant de me confier des tâches de gestion et d'administration reflétant bien la réalité d'un chercheur. J'en suis sorti très grandi. Merci Capitaine.

Ensuite, j'aimerais sincèrement remercier les membres du jury, les professeurs Roger Nkambou, Yoshua Bengio, Christine Dufour et en particulier le professeur Stefano Cerri pour le temps précieux que vous avez accepté d'accorder à la lecture de cette thèse. Vos commentaires constructifs ont permis de bonifier ce travail de façon importante et solidifier mon bateau.

Je tiens également à remercier le Fond Québécois pour la Recherche sur la Société et la Culture (FQRSC) pour avoir financé cette belle aventure. Aussi, un très grand merci à tout le personnel de l'université, autant les gens du support informatique que le secrétariat du DIRO. J'ai une pensée particulière pour Mariette Paradis pour son aide précieuse et sa patience.

Je remercie par la suite mes ami(e)s et collègues de travail, présents et passés, de l'université. Vous êtes trop nombreux pour vous citer de façon individuelle, mais j'ai une pensée particulière pour Emmanuel Blanchard, Hicham Hage et la dream-team Tunisie : Imène Jraidi, Maher Chaouachi et Lotfi Derbali pour nos belles collaborations scientifiques. Je tiens en particulier à remercier chaleureusement Édouard Auvinet et Vincent Héritier qui ont accepté de me donner de leur temps et de leur expertise à la fin de ma thèse lorsque j'en avais grandement besoin. Édouard, un merci du fond du cœur pour tes conseils sur la disposition et la structure à apporter à ma thèse. Tu es fort mec ! À mes amis intimes, Mu et Khaled, je suis choyé de vous connaître et d'avoir pu compter sur votre amitié, aide et écoute tout au long de cette thèse.

Tout bon voyage a un début et une fin. J'adresse une note très particulière à Monsieur Jean-Michel Racicot qui a accepté, au début de ce voyage, de m'ouvrir les portes du quai de l'informatique au moment où je traversais la pire tempête de ma vie et à ma mère pour avoir été, et restera, la puissante lumière du fort qui saura me guider à bon port. Merci « mom ».

Finalement, je laisse le meilleur pour la fin. J'adresse mon éternelle gratitude à l'amour de ma vie qui s'est constamment tenue à mes côtés, malgré vents et marées, non pas simplement par amour, mais par confiance. Merci.

CHAPITRE 1

CHAPITRE 1

Introduction

Sommaire

1.1. SYSTEME TUTORIEL INTELLIGENT	20
1.2. SYSTÈME TUTORIEL ÉMOTIONNEL INTELLIGENT.....	21
1.3. L'APPRENTISSAGE DANS UN SYSTÈME TUTORIEL INTELLIGENT	22
1.3.1. LES DEUX PRINCIPAUX COURANTS DE RECHERCHE POUR LES STI	22
1.3.2. LIMITE DES STRATÉGIES PÉDAGOGIQUES ACTUELLES.....	24
1.4. INCONSCIENT COGNITIF	25
1.4.1. PERCEPTION INCONSCIENTE	26
1.4.2. PERCEPTION SUBLIMINALE	28
1.4.3. AMORÇAGE COGNITIF.....	29
1.5. OBJECTIFS DES TRAVAUX DE RECHERCHE.....	33

L'apprentissage est un procédé fort complexe et aucune recette commune n'a encore été trouvée pour reproduire la manière précise dont les gens encodent leurs connaissances. Chaque personne désireuse d'apprendre, que l'on désigne par le terme apprenant, est considérée comme un cas unique en raison des nombreuses différences qui peuvent exister entre ses connaissances antérieures, ses compétences et son expertise par rapport à un autre apprenant. Les systèmes éducatifs traditionnels ont toujours été axés autour de l'apprentissage de groupe (figure 1.1). Que ce soit à l'école de Socrate, en passant par les séances d'arithmétique mentale en Russie de la fin du 19^{ième} siècle jusqu'aujourd'hui, les cours continuent à avoir lieu par groupes sans adapter l'apprentissage aux spécificités de chaque apprenant.



Figure 1.1 – Évolution des méthodes d'apprentissages au fil du temps. Source [1, 2]

Dans les écoles et universités, les systèmes éducatifs modernes commencent à de doter d'outils non pas pour personnaliser l'enseignement mais pour l'informatiser afin de le rendre plus ludique et accessible. Les systèmes tutoriels intelligents, ou STI, ont comme objectif de personnaliser l'enseignement aux spécificités de chaque individu en offrant un environnement éducatif et interactif dont la matière enseignée est adaptée à chaque apprenant. Ces environnements adaptatifs sont capables de fournir une solution de « coaching » intelligente et individualisée. Les STI peuvent évaluer les actions de chaque apprenant en donnant un « feedback » approprié pour l'acquisition d'une connaissance approfondie et de longue durée.

Cette thèse vise à améliorer le raisonnement humain lors de l'acquisition de la connaissance dans ces environnements. On considère pour cela les dimensions émotionnelles et cérébrales dans le raisonnement humain en utilisant des capteurs biométriques. Nous avons organisé cette thèse en deux parties, chacune représentant une contribution importante d'une nouvelle technique d'enseignement à l'amélioration de l'acquisition de la connaissance. La première contribution concerne l'amélioration de l'apprentissage de façon générale (chapitre 3) et la seconde contribution l'amélioration de l'induction de la connaissance de façon spécifique (chapitre 5). Chaque contribution est précédée d'une introduction (chapitres 2 et 6), suivie d'une

discussion des résultats (chapitres 4 et 7). L'avant-dernier chapitre de la thèse présente une discussion applicative de nos résultats par la mise en place d'un nouveau STI intégrant les résultats de nos travaux (chapitre 8) avant de conclure par une discussion générale (chapitre 9).

1.1. Système tutoriel intelligent

Les systèmes tutoriels intelligents ont pris leur envol au début des années 80 avec la convergence de trois disciplines importantes : l'intelligence artificielle, l'éducation et la psychologie cognitive. Le terme « Intelligent Tutoring Systems » a été cité pour la première fois en 1982 par Sleeman [3]. Il y a eu depuis plusieurs implémentations, mais essentiellement un STI est un système informatique capable d'adapter l'enseignement et de fournir un retour à l'apprenant sans intervention humaine [4]. La majorité des architectures proposées repose sur les quatre composantes principales proposées par Wenger en 1987 [5] et illustrées sur la figure 1.2.

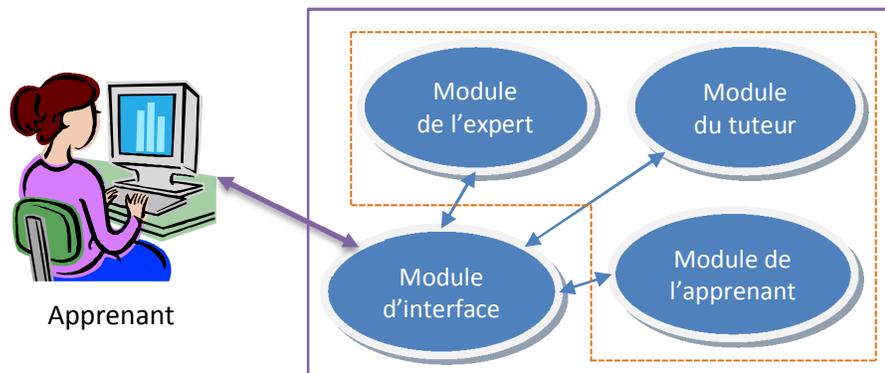


Figure 1.2 - Les composantes principales d'un système tutoriel intelligent

Chaque composant a un rôle précis : le **module de l'expert** s'occupe de la représentation informatique du domaine de connaissance. C'est le module dans un STI qui sait *quoi* enseigner. Le **module du tuteur** s'occupe quant à lui de l'application des stratégies pédagogiques en fonction du progrès de l'apprenant. C'est le module dans un STI qui sait *comment* enseigner. Le **module de l'apprenant** est celui qui modélise les connaissances de l'apprenant et enregistre son progrès. Enfin, le **module d'interface** interagit avec l'apprenant, généralement par le biais d'interfaces graphiques ergonomiques. Ainsi, le STI doit être capable d'adapter son enseignement en fonction de l'état courant des connaissances de l'étudiant et supporter la transition vers un nouvel état des connaissances meilleur que le précédent.

Cependant, l'importance des émotions pour l'apprentissage a longtemps été négligée dans le domaine de recherche des STI depuis ses débuts en 1987. Les premiers travaux à avoir

considéré la dimension émotionnelle comme partie intégrante d'un STI n'ont été publiés qu'au début des années 2000 [6-11]. Ce phénomène s'explique grandement par le fait que les théories d'apprentissage avaient, jusqu'à récemment, traité l'émotion et la cognition comme deux concepts totalement séparés et que la priorité était accordée aux processus cognitifs [12-14]. Néanmoins, des recherches en neurosciences et en psychologie cognitive ont démontré que les émotions sont étroitement liées à divers processus cognitifs, tels que l'attention, la résolution des problèmes et la prise de décision entre autre [15, 16]. De plus, il existe des recherches empiriques dans la littérature qui montrent que les émotions sont systématiquement affectées par les processus cognitifs et les buts de l'apprenant, et vice versa [17, 18]. Un STI qui considère la dimension émotionnelle pour ses interventions pédagogiques est connu sous l'acronyme STEI pour **S**ystème **T**utoriel **É**motionnel **I**ntelligent [11].

1.2. Système tutoriel émotionnel intelligent

Comme nous venons de l'expliquer, l'émotion est très importante pour la cognition, la prise de décision et l'apprentissage de façon générale. L'objectif recherché par ces tuteurs affectifs est la capacité de pouvoir reconnaître ces états émotionnels et cognitifs au travers de plusieurs manifestations physiques et d'intervenir de façon appropriée [19, 20]. Pour cette raison, une variété de travaux ont été réalisés par la communauté des STI afin de reconnaître et d'identifier les émotions et les états cognitifs des apprenants.

Une première série de travaux a tenté d'identifier plusieurs états émotionnels de façon automatique avec un succès relativement peu reproductible [21-25]. Le manque d'accord sur la définition même des émotions représentait l'obstacle majeur rencontré. Pour pallier à cette difficulté, des chercheurs se sont intéressés à multiplier les outils pour modéliser les émotions, tels que l'emploi d'une variété des capteurs physiologiques [26, 27] ou l'utilisation conjointe des questionnaires de type « self-reports » avec l'observation humaine pour l'interprétation des émotions [28, 29].

Les travaux concernant la détection et l'interprétation des états cognitifs et mentaux par des capteurs physiologiques ont mis du temps à prendre leur envol. Ceci s'explique principalement par le prix relativement élevé des capteurs cérébraux et à la complexité associée au traitement de ces données. Au début de cette thèse, la présence d'une détection automatique d'états cognitifs en lien avec l'apprentissage par la mesure de données cérébrales était inexistante dans notre domaine. Nous constatons maintenant la présence de quelques rares travaux employant les

mesures cérébrales pour détecter automatiquement ces états cognitifs pertinents à l'apprentissage ou au raisonnement dans un STI [30-32]. Le coût de plus en plus abordable des capteurs cérébraux entrainera probablement une augmentation de ces mesures permettant aux futurs chercheurs d'enrichir leurs STI par l'intégration de la capacité de mesure des dimensions affectives et cérébrales.

Malgré tous ces progrès et la richesse des données physiologiques qu'un STI peut collecter sur un apprenant, une stratégie pédagogique appropriée au contexte en cours est nécessaire dans l'objectif d'adapter l'enseignement en fonction des états affectifs et émotionnels de l'apprenant.

1.3. L'apprentissage dans un système tutoriel intelligent

Comme nous venons de voir, la détection des états cognitifs et émotionnels est une partie importante d'un STI. Dans un STI, le module du tuteur est celui qui a la responsabilité d'exécuter la stratégie pédagogique appropriée dans une situation particulière. Ainsi, le tuteur peut, par exemple, décider de communiquer interactivement avec l'apprenant en induisant des stimuli sensoriels qui agissent sur l'apprenant (telle qu'une vidéo explicative). Cette intervention est basée sur des théories d'apprentissage qui indiquent *comment* intervenir en fonction des buts et objectifs à atteindre. Les stratégies pédagogiques employées dans les STI actuels sont basées sur deux écoles de pensée sur l'apprentissage : le cognitivisme [33-36] et le constructivisme [37-40].

1.3.1. Les deux principaux courants de recherche pour les STI

Le **cognitivisme** désigne le courant de recherche scientifique endossant l'hypothèse que la pensée est un *processus* de traitement de l'information. Le rôle central de la cognition dans cette école de pensée marque son opposition à la tradition béhavioriste qui prédominait la première moitié du vingtième siècle [41-43]. Le béhaviorisme est un courant de pensée qui considère que le comportement d'un apprenant s'explique exclusivement par les renforcements positifs ou négatifs transmis par son environnement (voir Reynolds [44] pour une analyse plus détaillée). Ce courant a donc été rapidement mis de côté dans la deuxième moitié du vingtième siècle suite à la naissance des ordinateurs. Très rapidement les ingénieurs, mathématiciens, philosophes et psychologues ont établi un parallèle entre la manière dont l'ordinateur *traite* les informations et la manière dont le cerveau fonctionne. L'unification de différents domaines de recherche, notamment la linguistique, l'intelligence artificielle et les neurosciences a donné lieu à la

discipline appelée « sciences cognitives ». Pour les sciences cognitives, l'encodage de l'information dans le cerveau, par exemple, se construit de façon successive (voir figure 1.3). La plus petite perception engendre un travail de stockage et d'interprétation. L'information se dirige premièrement vers la mémoire sensorielle puis dans la mémoire à court terme et est ensuite classée dans la mémoire à long terme [45]. Le cognitivisme établit plusieurs autres concepts importants tels qu'un schéma mental qui, entre autre, peut être une représentation interne d'une connaissance. Dans un tel cas, chaque nouvelle connaissance acquise est ainsi comparée aux schémas existants de la personne. Les schémas peuvent également être combinés, étendus ou modifiés pour intégrer la nouvelle connaissance.

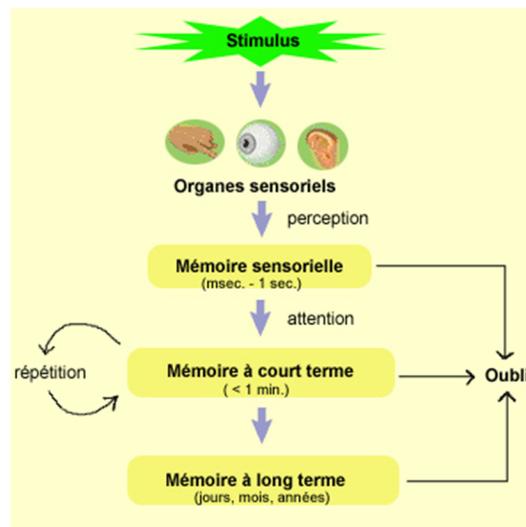


Figure 1.3 – Les trois étapes du traitement de l'information selon le cognitivisme

C'est d'ailleurs dans ce cadre que l'on peut citer la dernière mise à jour de la théorie de Gagné [34] qui s'inscrivait originalement dans un cadre plus behavioriste. Selon Gagné, toute stratégie pédagogique ou leçon enseignée devrait suivre les neuf étapes suivantes pour être traitée et comprise de façon optimale : (1) capter l'attention de l'apprenant, (2) informer l'apprenant des objectifs, (3) stimuler le rappel de connaissances antérieures, (4) présenter la leçon, (5) fournir de l'aide pédagogique, (6) Solliciter la performance, (7) Fournir un « feedback », (8) mesurer la performance et (9) accroître la rétention et le rappel. Plusieurs STI ont rapidement adopté cette école de pensée en mettant en place des agents qui interagissent avec les apprenants dans le but de maximiser l'apprentissage. Les STI de DeGelder [46] et Merino [47] sont des systèmes implémentant ces tuteurs cognitifs.

Le **constructivisme** s'attache quant à lui à étudier les mécanismes et processus permettant la construction de la connaissance chez les sujets à partir d'éléments déjà intégrés. La compréhension, constamment renouvelée, s'élabore à partir de représentations plus anciennes d'événements passés, que le sujet a d'ores et déjà emmagasinées dans son vécu. On suppose que les connaissances de chaque sujet ne sont pas une simple *copie* de la réalité, mais une reconstruction de celle-ci. En fait, le sujet « re-conceptualise », en interne, les informations reçues en regard de ses propres concepts. Bref, les constructivistes croient que « les apprenants construisent leur propre réalité, ou du moins l'interprètent, en se basant sur la perception qu'ils ont de leurs expériences. Se faisant, les connaissances d'un individu sont fonction de ses expériences antérieures, ses structures mentales et croyances lorsqu'il interprète les objets et événement de son environnement » [48]. L'apprentissage, selon le constructivisme, est influencé par des événements internes et externes. Il existe plusieurs théories constructivistes, mais les travaux de Piaget sont ceux qui ont le plus influencé cette école de pensée [38]. Des exemples d'ITS fondés sur le constructivisme sont CATS [49] et AutoTutor [25].

1.3.2. Limite des stratégies pédagogiques actuelles

L'apprentissage dans les STI a toujours été fondé, tel que nous l'avons mentionné, sur des stratégies pédagogiques basées sur le cognitivisme et/ou le constructivisme. Or, ces stratégies ont des limitations importantes :

1. Les stratégies pédagogiques conçoivent leurs interventions en fonction de l'attention portée à la matière enseignée ou à la tâche à accomplir. En effet, toute information complexe est décomposée en morceaux présentés graduellement à l'apprenant afin que celui-ci puisse se concentrer sur un petit morceau à la fois.
2. Dans le cadre d'une analyse de raisonnement de type « model tracing », ces stratégies s'intéressent presque exclusivement à l'analyse explicite (consciente) du raisonnement. Elles se fient essentiellement sur des observables externes pour expliquer et justifier leurs interventions.

En réponse à la première limitation, une série de travaux récents dans plusieurs domaines scientifiques tel que les neurosciences montrent que l'apprentissage d'informations simples ou complexes peut être fait sans que l'attention de l'apprenant soit complètement dirigée vers la tâche en question [50-53]. Cette dissociation entre performance et conscience n'est pas nouvelle

dans le domaine des neurosciences, mais nous sommes les premiers dans les STI à avoir cherché à comprendre, mesurer et intégrer ces mécanismes dans le but d'améliorer l'apprentissage.

En réponse à la seconde limitation, plusieurs travaux en neurosciences ont démontré que plusieurs décisions humaines ne font pas appel à des mécanismes de raisonnement explicables (explicites) [48, 54, 55]. Ces mécanismes sont plutôt de nature intuitives (inconsciente) et font partie du domaine de **l'inconscient cognitif** humain [56, 57].

1.4. Inconscient cognitif

Comme nous venons de voir, cette dissociation entre performance et conscience n'est pas nouvelle dans le domaine scientifique des neurosciences. Nous établissons la terminologie suivante pour la suite de nos travaux : le terme *inconscient cognitif* fait référence à l'entière variété des effets que les mécanismes inconscients du cerveau peuvent avoir sur divers processus cognitifs. Par processus cognitifs, on entend tout processus cérébral complexe tel que l'apprentissage et la prise de décision. Par mécanismes inconscients, on entend toute activité cérébrale nécessitant plus d'une région cérébrale sous le seuil de la conscience humaine (qui s'effectue sans y penser) telle que l'intuition, la reconnaissance de formes, etc.

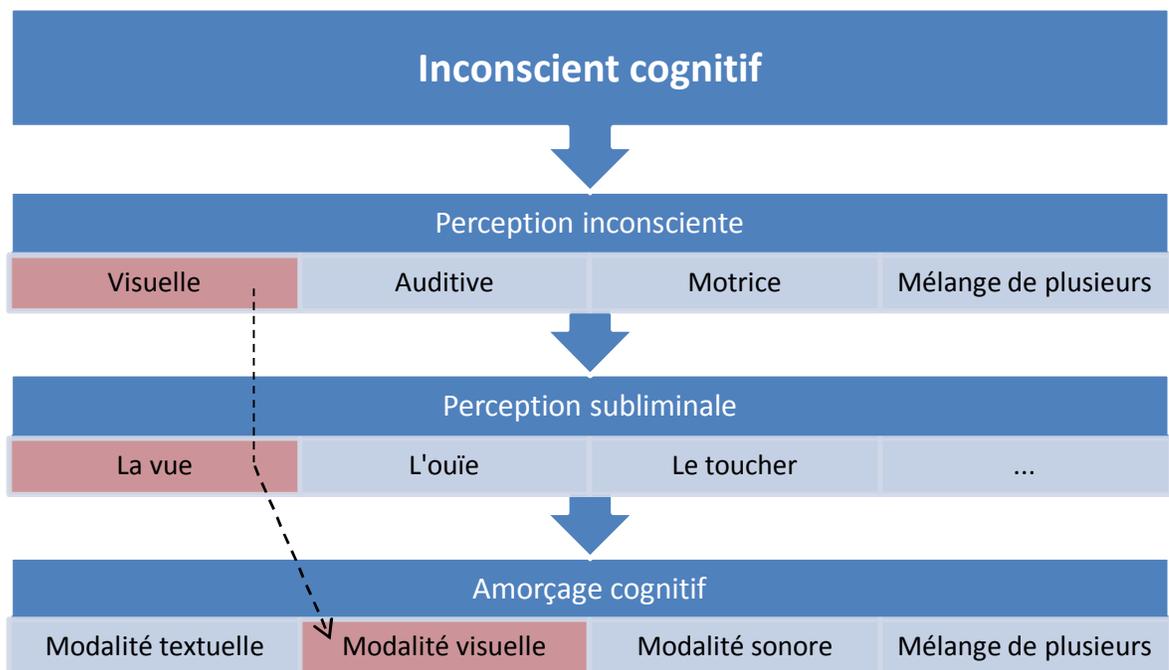


Figure 1.4 – Catégorisation de l'inconscient cognitif. Notre recherche se situe au niveau de l'amorçage cognitif par l'image (flèche en pointillé).

La figure 1.4 présentée ici résume la localisation de la technique que l'on souhaite utiliser dans notre thèse en lien avec le domaine complet de l'inconscient cognitif. Nous nous sommes ainsi intéressés à travailler avec la modalité visuelle de l'amorçage cognitif qui, lui, fait partie de la perception subliminale, qui, à son tour, est une technique artificielle qu'utilisent les chercheurs pour reproduire les phénomènes naturels de la perception inconsciente. Pour clarifier cette notion de perception subliminale, nous commençons par expliquer brièvement ce qu'est la perception inconsciente.

1.4.1. Perception inconsciente

La perception inconsciente est une sous-branche de l'inconscient cognitif qui est concernée par des stimuli visant directement les sens humains et traités de façon inconsciente. Les cas les plus connus sont les illusions optiques et la perception aveugle. La perception aveugle est un phénomène neurologique humain qui conduit le cerveau à ignorer des stimuli qui sont dans son champ visuel car il est concentré à effectuer une tâche en simultané.

Le premier cas connu de perception inconsciente remonte à plus de cent ans avec la découverte d'un syndrome neurologique appelée vision aveugle : le patient ne voit rien dans une partie de son champ visuel suite à la destruction d'une région cérébrale dans une zone du cerveau cruciale à la perception visuelle située dans le lobe occipital (situé à l'arrière du crâne). Il est à noter que les yeux de ces patients ne présentent aucune pathologie. Les premières expériences liées à l'apprentissage inconscient de ces patients à l'aide d'un ordinateur remontent au travail de Poppel et al. en 1973 [58]. Dans cette étude, les auteurs se rendent compte que des patients ne peuvent identifier une source lumineuse dans leur champ *aveugle* lorsqu'on leur demande de le faire. Par contre, lorsqu'on les invite à diriger leur regard vers cette source lumineuse qui est *invisible* pour eux, leur regard se dirige avec une grande précision vers ce point lumineux qu'ils ne pouvaient pas identifier consciemment.

Ceci dit, le système inconscient traite bien plus qu'une information simple telle qu'un point lumineux. De fait, la première expérience démontrant toute la richesse de perception des processus inconscients est menée en 1999 par DeGelder et al. [46]. Nous la résumons sur la figure 1.5. Dans cette expérience, DeGelder demande au patient G.Y. atteint de vision aveugle droite (aucune perception consciente d'informations visuelles dans la moitié droite de son champ visuel) de catégoriser le visage qui lui est présenté. À chaque essai, un visage est présenté soit

dans la partie saine de son champ visuel soit dans la partie aveugle. Ce visage est celui d'une émotion de peur ou d'une émotion neutre.

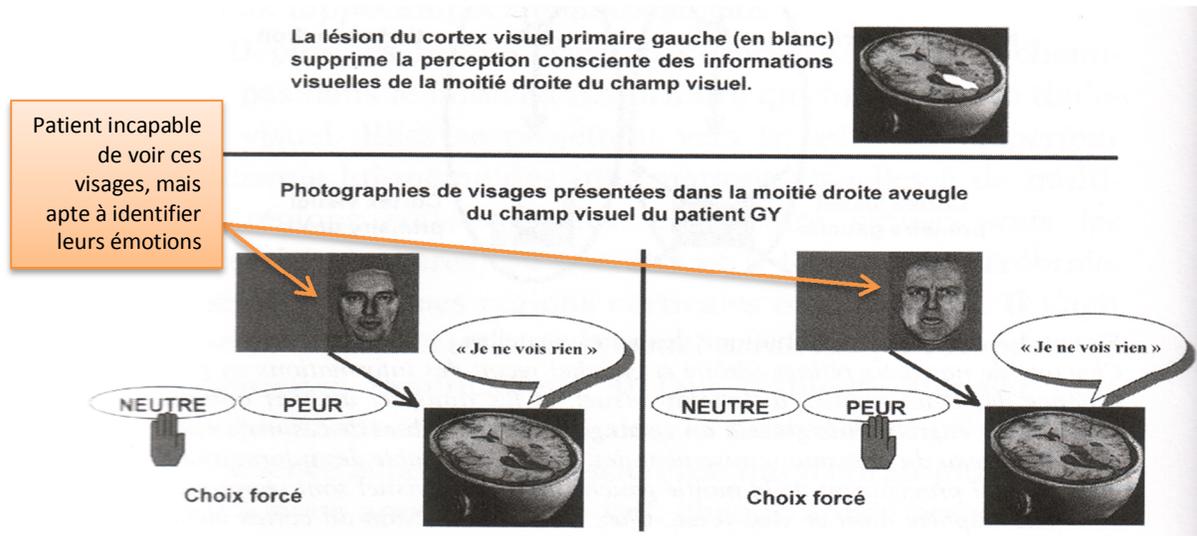


Figure 1.5 - Perception et traitement inconscient des visages émotionnels. Source [59]

Bien entendu, la performance du patient pour les visages perçus de façon consciente (projetés dans son champ de vision gauche) est parfaite. Rappelons que ce patient n'est pas capable de détecter consciemment la présence et l'identité des visages présentés dans la moitié droite, donc aveugle, de son champ visuel. Mais, résultat très surprenant, G.Y. s'avère aussi capable d'identifier les visages perçus de façon inconsciente (projetés dans son champ de vision aveugle) avec une proportion significativement élevée de réponses correctes suite à un choix forcé, c'est-à-dire que G.Y. doit faire un choix entre neutre et peur, même s'il n'a consciemment pas perçu le visage projeté.

Ce traitement riche d'information complexe par le cerveau de ces patients atteints de lésions cérébrales a mené les chercheurs à se poser la question suivante : serait-il possible que ces processus perceptifs inconscients soient à l'œuvre chez chacun d'entre nous, sans lésion cérébrale et sans que nous soyons capables d'en prendre conscience ? Prendre cette question au sérieux a conduit directement les scientifiques à envisager de présenter des informations visuelles à un individu indemne de toute lésion cérébrale à son insu, puis de vérifier si ces informations ont pu être traitées inconsciemment ou non. Ce phénomène est connu sous le nom de *perception subliminale*.

1.4.2. Perception subliminale

La perception subliminale est essentiellement une reproduction contrôlée en laboratoire de la perception inconsciente. Pour s'y faire, on utilise une technique appelée projection subliminale qui a comme but de projeter un stimulus sur un support (mur, écran d'ordinateur, hauts-parleurs, etc.) sans que ce stimulus soit identifié de façon consciente par un individu. Un tel stimulus s'appelle une amorce. Une amorce doit être d'un type spécifique (visuelle, auditive, ...) et doit être présentée à l'individu dans des conditions particulières afin qu'elle puisse échapper à la conscience mais pas au cerveau. Dans le cadre de notre recherche, on s'intéresse particulièrement aux amorces visuelles (sous la forme d'images et de symboles) puisque c'est la modalité la plus sollicitée lors des interactions avec un STI. Les conditions de projection d'une amorce visuelle sont dictées par le fonctionnement neuroscientifique de la perception visuelle humaine [60]. De fait, chaque individu possède *un seuil de tolérance visuel*, seuil en deçà duquel il n'a plus conscience du stimulus visuel qui lui est présenté car celui-ci est trop rapide pour être consciemment perçu et identifié. Malgré le fait que ce seuil peut varier en fonction de quelques paramètres tels que la prise de certains médicaments, l'âge, le degré d'attention et la luminosité, il est possible de prendre un seuil suffisamment bas, par exemple 33 millisecondes, pour afficher une information de façon inconsciente pour la grande majorité des humains [15, 61, 62].

Les travaux de Levin [15] utilisant la perception subliminale sont les premiers à démontrer l'existence de processus perceptifs inconscients chez un sujet neurologiquement sain. La figure 1.6 illustre la première expérience effectuée mesurant les réactions cérébrales des individus suite aux amorces projetées.

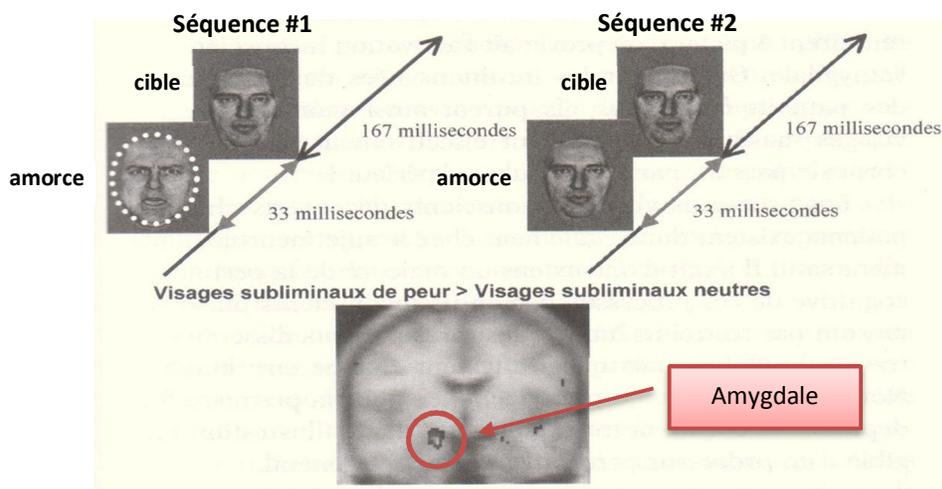


Figure 1.6 - Perception inconsciente des visages de peur versus les visages neutres. Source [59]

On présente à des sujets sains des paires de visages qui comprennent chaque fois une amorce sous la forme d'un visage présenté très brièvement (33 millisecondes) immédiatement suivie par un second visage, appelé cible, affiché à l'écran pendant une plus longue durée (167 millisecondes). Cette technique permet de supprimer la perception consciente de l'amorce (le premier visage projeté). Le sujet ne voit consciemment que la cible : un visage neutre. Certains essais contiennent une amorce sous la forme d'un visage exprimant la peur, d'autres une amorce sous la forme d'un visage neutre. L'activation cérébrale pour les amorces de peur (visages subliminaux de peur) était significativement, et statistiquement, plus grande que les amorces neutres (visages subliminaux neutres). Cette activation mesurée par IRMF (**I**mage à **R**ésonance **M**agnétique **F**onctionnelle) montre bien l'activation de l'amygdale pour les amorces sous la forme d'un visage exprimant la peur. L'amygdale est une structure cérébrale capitale au traitement des stimuli émotionnels, plus particulièrement la peur [63]. En observant l'activation de cette région uniquement pour les amorces de peur, les résultats de Levin démontrent que le cerveau humain a bel et bien perçu et interprété l'émotion de l'amorce projetée (visage de peur) alors que les participants n'ont jamais consciemment aperçu le visage.

Ainsi, plusieurs séries d'expérimentations ont eu lieu dans les années 90 avec comme but visé d'utiliser la perception subliminale pour tenter d'avoir un effet observable sur les tâches cognitives humaines. Ce type particulier d'amorçage se nomme l'amorçage cognitif.

1.4.3. Amorçage cognitif

Comme nous venons de l'expliquer, l'amorçage cognitif cherche à utiliser les amorces pour modifier ou améliorer les tâches cognitives humaines. Cette technique utilise un nouvel élément appelé masque pour permettre à l'amorce d'échapper à la conscience humaine et ainsi être « mieux comprise » par le cerveau dans le but d'améliorer une tâche cognitive visée [64]. Un masque est une image composée de symboles n'ayant aucune relation avec l'amorce ou la tâche cognitive que l'on essaie de simuler. Typiquement, dans le cadre d'une amorce visuelle en forme de flèche, un masque est une image composée d'une série de figures géométriques aléatoires (tels que des rectangles et losanges) versus un masque composé de dièses « # » dans le cadre d'une amorce textuelle.

Le premier exemple pertinent dans la littérature provient de Meyer et Schvaneveldt [65]. Cette expérience présente aux sujets plusieurs séquences composées des éléments suivants : une

amorce sous la forme d'un mot, suivie d'un masque et une cible sous la forme d'un mot (ex : LION) ou d'une chaîne de caractères quelconque (ex : OLNl). Tout comme la section précédente, on appelle une cible l'élément d'intérêt que l'on désire modifier par l'amorce. Ainsi, les sujets ont pour tâche de répondre le plus rapidement possible si la cible présentée est un mot ou non. C'est ce qui se produit sur la partie gauche de la figure 1.7. Cette expérience permet de faire cette profonde découverte: lorsque la cible est un mot et qu'elle est précédée par une amorce avec un lien sémantique (ex : l'amorce TIGRE la cible LION), les sujets identifient plus rapidement la cible comme étant un mot que lorsque la cible est précédée par une amorce sans lien sémantique (ex: l'amorce TIGRE la cible HABIT). Ce résultat démontre que notre cerveau comprend la signification d'un mot en utilisant une métrique qui tient compte des *distances* sémantiques entre nos concepts et ce de façon inconsciente. Cette expérience est fondamentale pour démontrer que l'on peut traiter la dimension sémantique d'un stimulus que nous ne percevons pas consciemment. De fait, le résultat de cette expérience a depuis été répliqué de nombreuses fois dans une multitude de variations expérimentales (voir Naccache [59] pour plus de détails).

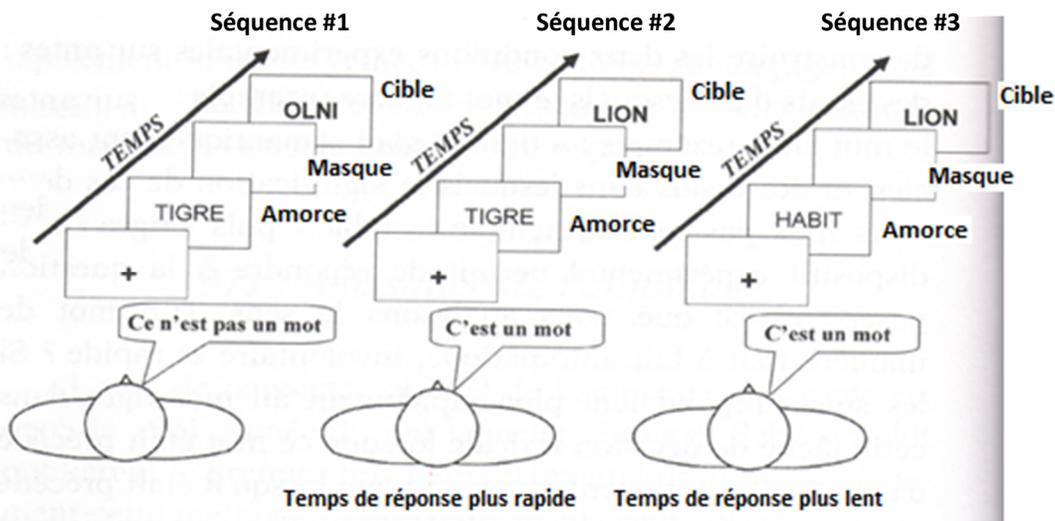


Figure 1.7 – Le traitement inconscient des représentations sémantiques des mots. Source [59]

D'importants résultats ont été rapportés au fil des années en ce qui a trait aux effets de la perception subliminale sur différents niveaux de traitements cognitifs, particulièrement sur les activations sémantiques [66-68]. Le travail des chercheurs en sciences cognitives sur l'apprentissage et la mémoire implicite a fortement contribué à la popularité de la science de la perception subliminale auprès des neuroscientifiques [69, 70]. L'impact a aussitôt été remarqué quelques années plus tard par la publication de deux articles importants dans les prestigieuses

revues « Science » et « Nature ». Ces travaux ont été les premiers à utiliser des méthodologies robustes d'amorçage cognitif dans le but de démontrer que les amorces « invisibles » (donc non perçues par l'utilisateur) pouvaient effectivement influencer les processus cognitifs à un niveau sémantique élevé [71, 72]. L'étude novatrice de Dehaene et al. [72] est la première à utiliser l'imagerie cérébrale pour démontrer que les amorces ont une influence sur le comportement tout en laissant une trace cérébrale mesurable dans le cortex moteur. La figure 1.8 illustre cette expérience. Cette étude a donné naissance à une taxonomie de la perception subliminale [73] fortement citée dans la communauté qui définit des propriétés importantes pour qu'un stimulus soit perçu et considéré par le cerveau comme étant subliminal.

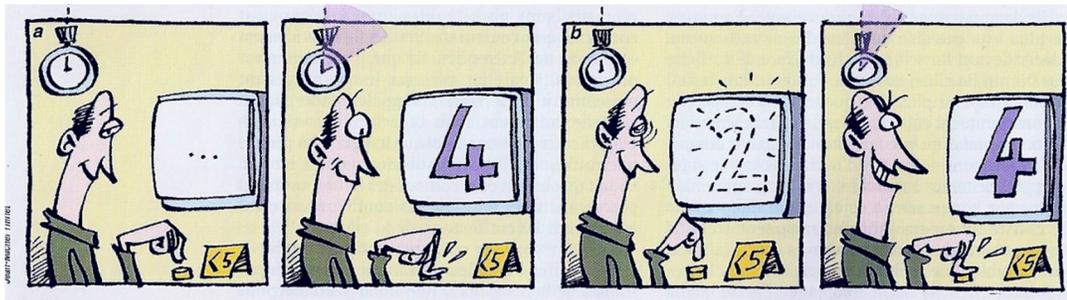


Figure 1.8 - Amorçage cognitif numérique. L'objectif est d'appuyer le plus rapidement possible sur le bouton si le numéro présenté est strictement inférieur à 5. Le participant répond plus rapidement lorsque l'amorce envoyée est dans le même sens que la réponse. Source [74]

On comprend aisément que la recherche contemporaine en neurosciences a largement profité des avancées dans les technologies d'imageries médicales, de la réduction de coût de ces matériels sophistiqués et des techniques de traitement de signal pour analyser de façon plus fine les régions cérébrales activées par les différents types d'amorces. De fait, plusieurs travaux ont utilisé différents types d'amorces pour montrer, de façon consensuelle, que l'amorçage cognitif peut améliorer les performances cognitives en ce qui a trait aux représentations orthographiques et lexicales simples [61, 75-78].

L'intérêt pour la perception subliminale a ainsi ouvert le chemin à plusieurs directions de recherche. Combinés avec l'évolution de la micro-informatique, plusieurs expériences dans le domaine des IHM (Interfaces Homme Machine) utilisant la perception subliminale ont vu le jour. Trois d'entre elles ont été les premières à l'avoir fait pour un objectif éducatif :

Le premier système est celui de Wallace et al. et utilise des indices subliminaux pour tenter de réduire la fréquence à laquelle les usagers demandent de l'aide afin d'utiliser les commandes d'un

système de traitement de texte [79]. Wallace est arrivé à la conclusion qu'il y a un effet positif causé par la présentation subliminale d'information.

Le second travail est celui de De Vault et al. et utilise des messages subliminaux pour aider l'apprenant à mieux associer des noms à des visages [50]. Lorsqu'un visage est présenté à un apprenant, les chercheurs projettent de façon subliminale le prénom associé à ce visage. Malgré le fait que ce travail se concentre sur les aspects *court terme* de la mémoire, les chercheurs avancent que sous certaines conditions, la performance des participants ayant eu recours aux stimuli pouvait être jusqu'à 1.5 fois supérieure à ceux du groupe témoin (sans stimulus).

Le troisième et dernier travail est celui de Schutte [80]. Dans son mémoire, Schutte utilise des stimuli subliminaux pour aider les apprenants à renforcer la trace mnémonique, c'est-à-dire la trace permanente dans la mémoire du cerveau, de mots à apprendre en faisant varier plusieurs paramètres des stimuli subliminaux, à savoir la durée, la pertinence, le contraste lumineux et la fréquence. Les résultats ne furent pas très significatifs sur la mémoire. Cependant, ce travail est très important car il a permis à Schutte de dégager des conditions importantes à respecter pour qu'un stimulus soit correctement perçu et interprété. De fait, il faut que le stimulus tienne compte du contexte dans lequel se situe l'apprenant et respecter les buts et objectifs de celui-ci.

Les trois systèmes cités ci-dessus diffèrent des travaux de cette thèse de trois façons. Tout d'abord, aucun de ces systèmes ne s'intéresse aux mécanismes inconscients en lien avec l'apprentissage, c'est-à-dire qu'ils n'utilisent pas les stimuli subliminaux pour améliorer l'acquisition de la connaissance. Les améliorations proposées sont en lien avec une tâche cognitive très spécifique, telle que le travail de DeVault qui tente d'améliorer la mémoire associative à court terme des utilisateurs.

Ensuite, aucun des précédents systèmes n'est construit de manière à enseigner une leçon. Ce sont tous des prototypes indépendants et les expériences menées n'ont servi qu'à établir une preuve de concept, pas souvent reproductible, d'un effet observé de la perception subliminale sur une tâche cognitive.

Enfin, les dits systèmes ne s'intéressent pas à mesurer les états affectifs et cérébraux en lien avec le raisonnement pour améliorer l'acquisition de la connaissance à l'aide de mécanismes de l'inconscient cognitif.

1.5. Objectifs des travaux de recherche

Comme nous l'avons vu, les stratégies pédagogiques actuelles dans les STI ont des limitations. Elles concentrent l'essentiel de leurs interventions sur l'analyse consciente du raisonnement d'un apprenant. Les stratégies pédagogiques en se fient essentiellement sur des observations externes pour expliquer et justifier les interventions. De plus, aucun STI actuel employant ces stratégies pédagogiques ne mesure directement les processus cognitifs et émotionnels dans le cerveau en lien avec le raisonnement en employant des capteurs biométriques.

Nous avons aussi vu dans ce chapitre que l'apprentissage est un phénomène relativement complexe faisant intervenir des mécanismes conscients et inconscients. Plusieurs études ont été citées en appui à l'effet que plusieurs décisions humaines ne font pas appel à des mécanismes de raisonnement explicables, mais bien à des raisonnements intuitifs.

Cette thèse vise à pallier aux limites des stratégies pédagogiques actuelles en cherchant à mieux comprendre, et mesurer, les mécanismes inconscients impliqués dans le raisonnement humain pour améliorer l'acquisition de la connaissance. La mesure de ces mécanismes se fera par le biais de capteurs biométriques spécialisés dans l'enregistrement des réactions cérébrales et émotionnelles des apprenants. Ainsi, nous nous concentrons sur l'amélioration du raisonnement humain dans un contexte de résolution de problème en se fixant les trois objectifs suivants :

1. Améliorer l'apprentissage de façon générale par l'amorçage cognitif
2. Améliorer l'*induction* de la connaissance de façon spécifique par l'amorçage cognitif
L'induction est un type de raisonnement qui permet de construire des règles générales à partir d'exemples spécifique ou de faits particuliers.
3. Implémenter l'amorçage cognitif dans un nouveau STI à base d'agents

Ce nouvel environnement à base d'agents a comme but d'intégrer l'amorçage cognitif aux leçons enseignées par le biais d'un agent subliminal. Ce système tutoriel doit également être en mesure de suivre le progrès de plusieurs apprenants simultanément.

Pour y arriver, nous mettons au point, dans un premier temps, une nouvelle méthode d'enseignement subliminale pour améliorer le raisonnement humain. Cette stratégie implémente une taxonomie neuroscientifique de la perception subliminale de Dehaene et al. [73] adaptée au domaine éducatif pour la résolution des problèmes. Les résultats de l'implémentation de la taxonomie et la mise en place d'amorces cognitives ont été validés par deux études empiriques, chacune représentant une contribution importante de cette thèse. Dans un deuxième temps,

nous avons procédé à la mise en place d'un nouvel STI à base d'agents intelligents intégrant notre nouvelle méthode par le biais d'un agent spécialisé dans la gestion des amorces cognitives.

Ainsi, la première contribution importante présentée au chapitre 3 sous la forme d'un article de revue répond au premier objectif fixé. Dans ce chapitre, une première étude utilisant des capteurs biométriques et des amorces cognitives a montré que notre nouvelle méthode a un effet bénéfique non seulement sur l'apprentissage dans un STI, mais également sur les états émotionnels des apprenants. Cette étude est précédée d'un chapitre introductoire sur les émotions et l'apprentissage (chapitre 2) suivie d'une discussion des résultats obtenus (chapitre 4).

La seconde contribution importante quant à elle répond au deuxième objectif fixé dans cette thèse. Elle est présentée au chapitre 6 sous la forme d'un article de revue. Dans ce chapitre, une seconde étude, utilisant des capteurs biométriques pour mesurer les états cognitifs et émotionnels des apprenants, a montré que l'amorçage cognitif améliore grandement l'induction de la connaissance. Dans cette seconde contribution, nous avons également démontré que nous pouvons mesurer par des capteurs cérébraux la manière dont un apprenant raisonne, soit par logique ou par intuition. La seconde étude est précédée d'un chapitre introductoire sur les mesures cérébrales (chapitre 5) suivie d'une discussion des résultats obtenus (chapitre 7).

Enfin, la troisième contribution originale de cette thèse présentée au chapitre 8 est en réponse au troisième objectif que nous avons fixé. La mise en place d'un nouvel STI à base d'agents en mode client-serveur permet d'avoir plusieurs apprenants connectés simultanément sur le système afin d'être suivis et gérés à distance. De plus, le paradigme des agents utilisé nous permet d'avoir l'autonomie et la flexibilité nécessaire pour implémenter un agent capable de faire la gestion des amorces pendant une leçon. Cet agent, de concert avec les autres agents, peut ainsi prendre des décisions en ce qui a trait aux amorces à projeter.

Partie I : améliorer l'apprentissage dans un STI

CHAPITRE 2

Amorçage cognitif : dimension émotionnelle

Sommaire

2.1. TERMINOLOGIE	39
2.2. ÉMOTION ET APPRENTISSAGE	40
2.3. DÉTECTION DES ÉTATS AFFECTIFS PAR LA BIOMÉTRIE.....	41
2.3.1. PHYSIOLOGIE DES ÉMOTIONS : PRINCIPES ET MÉTHODES	43
2.3.2. NORMALISATION DES MESURES PHYSIOLOGIQUES	46
2.4. PROBLÉMATIQUE	48
2.5. MÉTHODE.....	48
2.5.1. L'AMORÇAGE COGNITIF UTILISÉ	51
2.5.2. LE SYSTÈME UTILISÉ.....	52
2.5.3. LES CAPTEURS PHYSIOLOGIQUES UTILISÉS.....	53
2.6. CONCLUSION	54

Dans la première partie de cette thèse, nous présentons les résultats de notre première étude implémentant une nouvelle méthode d'enseignement basée sur une taxonomie de la perception subliminale. Cette méthode utilise l'amorçage cognitif dans un STI pour améliorer l'apprentissage dans un contexte de résolution de problème. Tout au long de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la performance des apprenants comme indicateur d'acquisition de la connaissance. De plus, nous avons mesuré tout au long de la leçon les émotions des apprenants par le biais de quatre capteurs physiologiques médicalement non intrusifs : mesure du rythme cardiaque, de la respiration, de la sudation de la peau et de la température externe du corps. Nous débutons ce chapitre par l'explication de la terminologie des émotions utilisée dans cette thèse pour ensuite préciser le rôle fondamental des émotions dans l'apprentissage. Nous poursuivons en présentant la détection émotionnelle par la biométrie et nous détaillons par la suite notre première étude exploratoire utilisant notre nouvelle méthode à base d'amorçage cognitif afin d'améliorer l'apprentissage dans un STI.

2.1. Terminologie

La littérature scientifique dans les domaines de la psychologie et de l'éducation comporte à certains moments une confusion en ce qui a trait aux termes *affect*, *sentiments* et *émotions*. Malgré le fait qu'il n'y ait aucune définition consensuelle et plusieurs écoles de pensées, nous avons choisi la distinction suivante selon Shouse [81] car elle présente plus clairement les différences de chaque terme:

Un *affect* est un phénomène général capable de provoquer ou de modifier des situations ou expériences émotionnelles ou sentimentales. Un affect est de nature inconsciente, sans contrôle individuel. Une succession d'affect vont créer plusieurs sentiments dépendamment du temps. La capacité de générer divers niveaux d'intensité d'affect selon la situation est une propriété physiologique du corps humain.

Un *sentiment* est une perception interne d'une situation (appelé aussi *sensation*) qui est instinctivement comparée à des expériences similaires. Les sentiments (ainsi que la capacité de ressentir) diffèrent d'un individu à un autre en fonction de l'intensité et de la complexité des précédents sentiments exprimés ou vécus. Un sentiment requiert qu'une évaluation (interne) soit faite d'une certaine situation.

Une *émotion* est la résultante de l'expression d'un sentiment. Les émotions sont constituées d'un ensemble d'états sentimentaux provoquant différentes réactions physiologiques (rythme

cardiaque, sudation, tension musculaire, pression sanguine, ...). Une émotion est une conséquence mesurable d'un sentiment et une réaction immédiate à celui-ci.

2.2. Émotion et apprentissage

L'acte d'apprendre implique deux processus importants : le raisonnement et la mémorisation. Le raisonnement se développe durant les tâches cognitives dans lequel l'apprenant tente de résoudre un problème. Si une nouvelle connaissance, par exemple sous la forme d'une règle ou d'un fait, est obtenue suite à un effort de raisonnement, cette connaissance est alors portée à la mémoire à court terme et transitera vers la mémoire à long terme suite à la pratique et la répétition [45]. La mémorisation¹ est également sollicitée lorsque l'apprenant tente de se rappeler d'une connaissance récemment acquise en se servant de plusieurs techniques tel que la similarité, l'imagerie mentale, l'analyse à base de cas, ... Les deux processus, raisonnement et mémorisation, travaillent de pair et ont longuement été considérés comme le fondement des fonctions cognitives.

Or plusieurs recherches dans les domaines des neurosciences, de l'éducation et de la psychologie cognitive ont montré que les émotions jouent un rôle prépondérant dans l'apprentissage [16, 82, 83] et ce malgré l'existence d'une dichotomie entre raison et émotion dans la croyance populaire. Cette séparation, longuement soutenue par la culture d'une fausse croyance, prétendait que les émotions étaient un obstacle à la prise de décision rationnelle. Aujourd'hui, les travaux novateurs de plusieurs neuroscientifiques ont clairement établis que les processus cognitifs d'un individu, plus spécifiquement ceux en lien avec la prise de décision, dépendent fortement des émotions [16, 83]. Plus important encore est que l'absence de ces même émotions peuvent fortement nuire à la prise de décision [84, 85].

De façon générale, il est convenu que les émotions négatives réduisent, ou bloquent les processus cognitifs, ralentissent le temps de décision ainsi que les capacités de récupération de la mémoire [86]. Un exemple classique est le phénomène de « Page blanche » lors d'un examen. Dans ce genre de situation, l'élève n'est pas en mesure de se souvenir d'une information clé alors qu'elle est bel et bien présente en mémoire. On pourrait penser dans ce cas-ci que le stress, la peur de l'échec et la non-confiance en soi peuvent être des facteurs affectifs contribuant fortement à ce blocage. Les émotions positives, par contre, procurent de meilleures conditions

¹ On ne traite pas ici de la mémorisation sans raisonnement, tel que la mémorisation par cœur.

pour la résolution de problème et améliorent la créativité [82]. Les étudiants exprimant de l'anxiété ou ayant montré une prépondérance à l'hyperactivité éprouvent davantage de difficultés à encoder convenablement la connaissance que leurs pairs n'ayant pas ces caractéristiques [82, 87]. Ainsi, tout processus d'apprentissage faisant intervenir la mémorisation et le raisonnement est fortement influencé par les états émotionnels de l'apprenant.

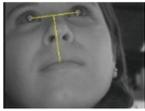
Le raisonnement quant à lui est une tâche intimement reliée à la mémoire puisqu'il permet à un apprenant d'aboutir à des conclusions en fonction de la connaissance en mémoire. Le processus de raisonnement, inductif ou déductif, permet à un apprenant d'effectuer des tâches cognitives complexes et diverses telles que la classification, l'application de connaissances antérieures à de nouvelles situations et la résolution de nouveaux problèmes, ce qui constitue le but visé dans l'apprentissage [88]. Or les émotions positives améliorent tout type de raisonnement en facilitant la création de nouvelles relations entre objets et idées [82]. De façon générale, les émotions positives mènent l'apprenant vers un processus de raisonnement plus créatif, flexible et divergent. À l'opposé, les émotions négatives ont tendance à créer un processus de raisonnement plus linéaire et convergent [89]. Ainsi, les émotions positives permettent une meilleure efficacité et une plus grande minutie dans la prise de décision et la résolution de problème [82, 90].

La détection des états affectifs a commencé à avoir une plus grande place dans les STI au cours des dernières années [21, 24, 28]. Les dernières versions des STI tentent ainsi de détecter plusieurs états affectifs afin d'enrichir les tuteurs de cette dimension cruciale à l'apprentissage. Cette détection est faite par le biais de la biométrie qui sera le sujet de la prochaine section.

2.3. Détection des états affectifs par la biométrie

Avec la venue de la biométrie sous la forme de divers capteurs, la détection des états affectifs dans les STI a pris beaucoup d'importance au cours des dernières années. Le tableau 2.1 présente un résumé de quelques capteurs ainsi qu'une brève description de chacun d'entre eux (pour une description détaillée, voir [28]). De façon générale, chaque capteur permet de mesurer un aspect particulier d'une émotion grâce à un logiciel spécialisé. Par contre, certains capteurs permettent de mesurer un ensemble d'émotions. Dans cette section, nous nous penchons sur deux exemples de capteurs, soit le siège pour l'analyse de postures et le capteur d'expression faciale.

Tableau 2.1 – Capteurs multiples pour mesurer divers états affectifs. Source [28, 91]

Capteur	Nom	Description	État affectifs mesurés
	Siège pour l'analyse de postures	Détecte si l'apprenant avance ou recule par rapport à sa position face à l'écran.	Attention, désintérêt, relaxation.
	Capteur d'expression faciale	Mesure le mouvement facial complet de l'apprenant	Intérêt, réflexion, incertitude, inattention, expression faciales de joie, surprise, ... [92].
	Souris de pression	Mesure le niveau de pression global appliqué en cours d'apprentissage.	Degrés de frustration
	Suivi oculaire par infrarouge, ou « eye tracking »	Détection des coordonnées des yeux (pupilles) et de la bouche afin de localiser des points sur le visage pour la prédiction d'expressions faciales.	Des états mentaux tels que la surcharge cognitive.

Le détecteur « Siège pour l'analyse de postures » permet, grâce à un capteur de sensibilité installé sous le coussinet du siège, de détecter le degré d'inclinaison d'un apprenant. Ce degré d'inclinaison renseigne sur l'état affectif d'intérêt versus désintérêt. Burleson [26] et D'Mello et al. [93] considèrent qu'un apprenant pourrait démontrer de l'intérêt par le non-verbal de son corps en se penchant vers l'avant pour mieux suivre la leçon. Inversement, si l'étudiant est plutôt désintéressé par la leçon, il aura une tendance à s'affaisser sur sa chaise ou opter pour une posture qui l'éloigne de l'écran.

Le détecteur « Capteur d'expression faciale » est quant à lui plus riche en détection d'états affectifs. Le logiciel spécialisé de la webcam enregistre les images d'un apprenant prises en cours de leçon afin d'en extraire une série d'états mentaux tels que l'incertitude, la compréhension (par le hochement de tête), la réflexion (par la position de la tête). Ainsi, on mesure un ensemble plus riche d'états affectifs souvent le résultat d'une combinaison de plusieurs émotions. On peut facilement imaginer plusieurs émotions négatives sous-jacentes à l'état affectif global de « l'incertitude » telle que la frustration, la colère, ...

La grande partie de l'effort dans les STI est actuellement orientée vers la détection automatique de ces états affectifs dans le but de transférer cette connaissance aux tuteurs et de leur permettre d'adapter l'enseignement [21, 28, 94-97]. Cependant, même si plusieurs de ces capteurs mesurent uniquement des manifestations affectives externes, il n'en demeure pas moins

que le niveau de granularité de la détection émotionnelle peut être amélioré en examinant de façon plus pointue la physiologie humaine.

2.3.1. Physiologie des émotions : principes et méthodes

Le système nerveux est un système biologique en réseau formé des organes des sens, des nerfs, de l'encéphale, de la moelle épinière, des méninges. Il coordonne les mouvements musculaires, contrôle le fonctionnement des organes et véhicule les informations sensorielles et motrices. Le système nerveux régule les émotions chez les animaux dotés d'un cerveau limbique et régule l'intellect chez les animaux plus évolués dotés d'un cerveau cognitif. On distingue traditionnellement le système nerveux central (cerveau et moelle épinière) du système nerveux périphérique (nerfs crâniens sensori-moteurs, nerfs spinaux et système nerveux entérique) tel qu'illustré sur la figure 2.1. Dans ce chapitre, nous allons nous concentrer davantage sur les systèmes nerveux sympathiques et parasympathiques pour la détection des émotions.

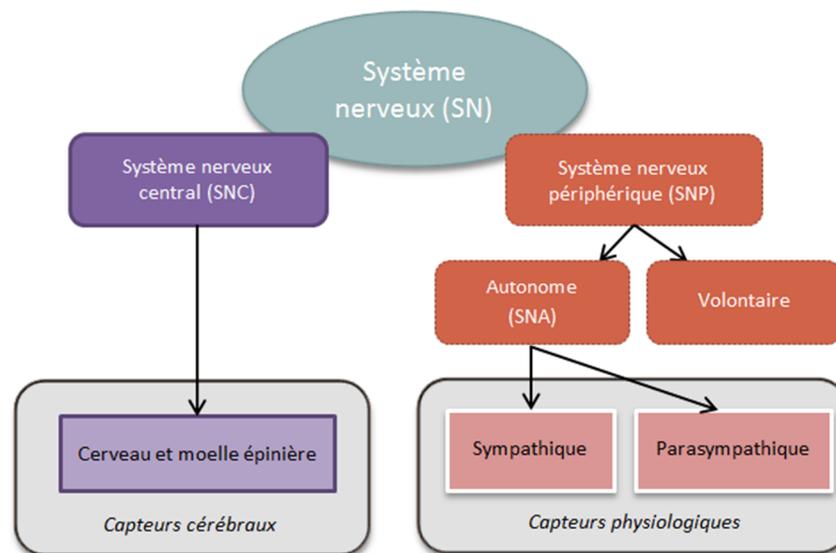


Figure 2.1 – La répartition des capteurs en fonction du système nerveux

Le système nerveux sympathique prépare l'organisme à l'activité physique ou intellectuelle. Devant un stress important, c'est lui qui orchestre la réponse de fuite ou de lutte. Il dilate les bronches, accélère l'activité cardiaque et respiratoire, dilate les pupilles, augmente la sudation de la peau et de la tension artérielle, mais diminue l'activité digestive. Ce système nous intéresse plus particulièrement pour la détection émotionnelle car il est responsable de plusieurs manifestations physiologiques en lien avec les émotions. Ces variations peuvent être observées

dans une situation d'anxiété par exemple, où le rythme cardiaque et la sudation augmente et la dilatation de la pupille est plus élevée que la normale.

Le système nerveux parasympathique amène un ralentissement général des fonctions de l'organisme afin de conserver l'énergie. Ce qui était augmenté, dilaté ou accéléré par le système sympathique est ici diminué, contracté et ralenti. Ce système a également un intérêt pour la détection des émotions car il est responsable de la diminution du rythme cardiaque. Une telle diminution est observée entre autres lorsqu'un apprenant est dans un état détendu ou triste.

Au fil des trente dernières années, les recherches ont tenté d'établir un lien entre les signaux physiologiques enregistrés (rythme cardiaque, sudation, respiration, etc.) et les émotions. Les résultats ont montré que la majorité de la variabilité des réponses verbales et physiques aux stimuli émotionnels peut être expliquée en partie par deux facteurs : (1) la valence, ou « Valence », est la nature positive ou négative de l'émotion et (2) l'activation, ou « Arousal », représente l'intensité de l'émotion mesurée [98]. D'autres études ont démontré que les réactions physiologiques du système périphérique nerveux sont significativement et différemment corrélées à ces deux facteurs [99, 100]. Ainsi, les résultats des travaux de Lang [101] ont permis de proposer une organisation bi-dimensionnelle des émotions basée sur le fonctionnement du système nerveux à l'origine des réactions émotionnelles des individus en corrélant positivement le facteur d'activation au rythme cardiaque et le facteur de valence à la réaction électrodermale de la peau (sudation) tel qu'illustré par la figure 2.2.

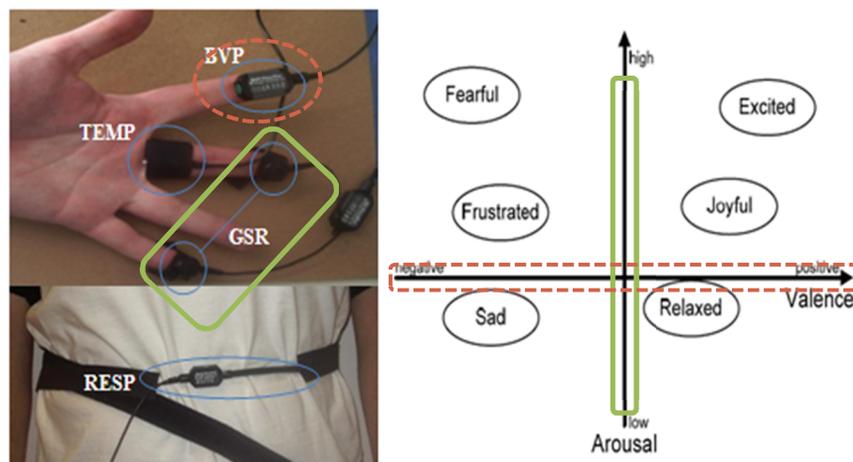


Figure 2.2 – Modèle de Lang [101] pour la classification des émotions

Ainsi, les capteurs en rouge et vert de la partie gauche de la figure 2.2 permettent de mesurer et quantifier une émotion en fonction de deux facteurs : la valence et l'activation. Par exemple, le capteur physiologique appelé GSR (« Galvanic Skin Response ») encadré en vert permet

d'enregistrer la réaction électrodermale de la peau en mesurant le degré de sudation d'un individu. Le capteur RESP (**R**espiration) permet quant à lui d'enregistrer les variations dans la respiration d'un individu. Ces deux signaux, GSR et RESP, sont corrélés avec l'activation. Le capteur physiologique appelé BVP (« **B**lood **V**olume **P**ressure ») encerclé en rouge permet d'enregistrer les variations sanguines dans le corps. On utilise ce capteur pour calculer la valeur de la fréquence cardiaque, HR (« **H**eart **R**ate »), d'un individu. Le capteur TEMP (« **S**kin **T**EMPerature ») permet d'enregistrer les changements de température en degrés Celsius. Le tableau 2.2 résume l'utilité de ces capteurs pour la détection des émotions. Leurs acronymes demeurent en anglais afin de conserver la cohérence avec la littérature médicale.

Plusieurs travaux dans la communauté des STI utilisent les capteurs physiologiques décrits ici pour détecter et adapter les interventions des tuteurs en conséquence [30, 102, 103]. Ces STI couvrent plusieurs domaines, allant des systèmes narratifs, éducatifs aux jeux sérieux. Un exemple fort connu est sans doute le « Empathic Companion » de Prendinger et al. [96]. Cet environnement en 3D est conçu comme une simulation pour préparer des utilisateurs à gérer leurs stress lors d'entrevues. Le système utilise plusieurs capteurs physiologiques pour analyser en temps réel la réaction émotionnelle des utilisateurs et affichent un agent virtuel pour intervenir en cas d'anxiété ou de stress.

Tableau 2.2 – Résumé des divers capteurs et leur rôle pour la détection émotionnelle. Source [104].

Nom	Signification	Description
ST	« Skin Temperature » ou Température externe de la peau	La température externe de la peau fluctue suite à un événement stressant. De façon non-consciente, le sang s'éloigne des extrémités du corps (mains, pieds) en direction d'organes vitaux (cœur, muscles) ce qui provoque une baisse de température externe de l'ordre des dixièmes de degrés aux extrémités [104].
RESP	Respiration	La respiration est convenue comme étant une réponse automatique du corps qui augmente soit par l'exercice physique ou par une réflexion mentale résultant en une émotion forte telle que la peur ou la tristesse [105]. L'amplitude et la fréquence de la respiration sont des indicateurs importants pour la détection de l'anxiété [106].
GSR	« Galvanic Skin Response » ou réaction électrodermale de la peau	La réaction électrodermale reflète le niveau de résistance électrique de la peau en lien avec la sudation. Une valeur élevée signifie une faible résistance à la sueur et se trouve souvent corrélée avec un état élevé de stress [107]. Le GSR est souvent utilisé comme indicateur de réactions émotionnelles et activités cognitives [104].
BVP	« Blood Volume Pressure » ou Pression sanguine	La pression sanguine représente le niveau de sang à un endroit entre deux battements cardiaques. On utilise cette information pour calculer le rythme cardiaque, que l'on corrèle avec la valence d'une émotion [101].

Certaines des approches mentionnées précédemment apparaissent relativement efficaces pour évaluer une session unique d'apprentissage. Cependant, dans le cadre d'un STI, on veut idéalement être capable de fournir une évaluation comparative pour permettre une adaptation durant la même session d'apprentissage. Pour atteindre cet objectif, il faut établir un référentiel commun pour les données récoltées. En effet, les réactions significatives liées à l'état émotionnel, motivationnel ou cognitif d'une personne peuvent changer d'un individu à l'autre et même différer chez un même individu. Pour pallier à cette difficulté, on utilise une normalisation des mesures physiologiques.

2.3.2. Normalisation des mesures physiologiques

Une normalisation de données est une technique statistique qui permet de comparer la variation de plusieurs valeurs de différents groupes par rapport à un référentiel commun. L'idée est de choisir, pour chaque groupe, un « point de référence » à partir duquel on placera les valeurs et un facteur « distance » pour mesurer la distance de chaque valeur par rapport à ce référentiel. Illustrons avec un exemple : considérons les trois groupes de points suivants : $G_1 = [1; 2; 3; 2; 2]$, $G_2 = [8; 10; 8; 10; 4]$ et $G_3 = [-3; 4; 3; 3; 3]$. La question qui se pose ici est la suivante : où se situe la valeur « 3 » en fonction de chaque groupe ? Est-ce une valeur « élevée » selon chaque groupe ? Le point de référence utilisé ici est la moyenne de chaque groupe : $G_{1_moyenne} = 2$, $G_{2_moyenne} = 8$ et $G_{3_moyenne} = 2$. Le facteur distance des groupes ici est la valeur de chaque point, à laquelle on soustrait la moyenne calculée précédemment, le tout divisé par la différence entre le maximum et minimum de chaque groupe tel qu'illustré sur l'Équation 2.1.

Équation 2.1 – Formule de normalisation d'un point

$$G'_i = \frac{G_{ix} - G_{imoyenne}}{G_{imax} - G_{imin}}$$

Ainsi, les distances de nouvelles valeurs de chaque groupe seront les suivantes : $G'_1 = [-0,5; 0,0; 0,5; 0; 0]$, $G'_2 = [0; 0,3; 0; 0,3; -0,7]$ et $G'_3 = [-0,7; 0,3; 0,1; 0,1; 0,1]$. On constate que le chiffre 3 n'a pas du tout la même distance dans G_1 (distance = 0,5 dans G'_1) que G_3 (distance = 0,1 dans G'_3), même si ces 2 groupes ont la même moyenne. La normalisation nous permet de dire que le chiffre 3 dévie cinq fois plus que la normale dans G'_1 que G'_3 .

Tableau 2.3 – Exemple de normalisation afin de faire une comparaison entre différents groupes

	G ₁	G ₂	G ₃	G' ₁	G' ₂	G' ₃
	1	8	-3	-0,5	0	-0,7
	2	10	4	0	0,3	0,3
	3	8	3	0,5	0	0,1
	2	10	3	0	0,3	0,1
	2	4	3	0	-0,7	0,1
Moyenne	2	8	2	0	0	0
Min	1	4	-3	-0,5	-0,7	-0,7
Max	3	10	4	0,5	0,3	0,3

Cette même philosophie s’applique également aux données physiologiques. Un exemple illustré est présenté à la figure 2.3. Ici, les groupes seront les apprenants et les valeurs fictives seront les unités mesurées. Nous voyons par exemple le capteur GSR qui mesure la résistance électrique de la peau, en micro-siemens, à la sudation. Une valeur élevée du GSR indique donc une activation élevée du point de vue émotionnel.

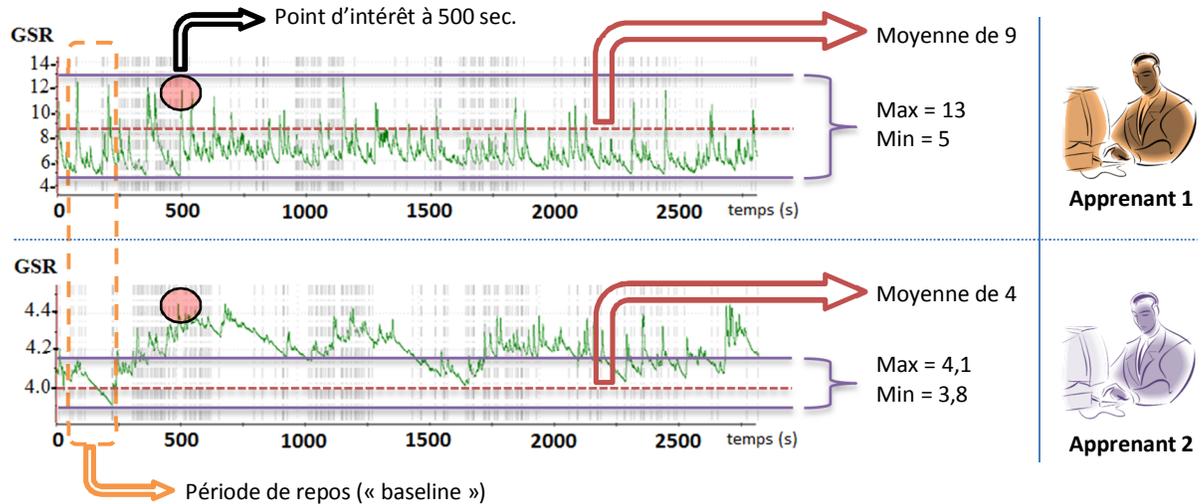


Figure 2.3 – Principe de la normalisation des données physiologiques

Le point d’intérêt encerclé à 500 secondes est une variation qu’on aimerait quantifier, mais également comparer entre les individus. On peut imaginer l’intervention d’un tuteur à ce moment, ou encore une amorce cognitive envoyée à l’apprenant. Dans ce cas, on peut calculer que la distance de cette mesure de l’apprenant 1 est de $(12 - 9)/(13 - 5) = 0,4$ comparativement à $(4,4 - 4)/(4,1 - 3,8) = 1,3$ pour l’apprenant 2. Pour déterminer la moyenne de chaque apprenant,

on utilise la moyenne du signal pendant une période de repos précédent l'expérience. Dans cet exemple, on peut voir que malgré la valeur très élevée du GSR pour l'apprenant 1, celle-ci est inférieure à celle de l'apprenant 2, dans un contexte de comparaison entre les individus.

2.4. Problématique

Il n'en demeure pas moins que malgré tous les progrès accomplis jusqu'à ce jour, les interventions des divers tuteurs demeurent de nature explicite, se concentrant principalement sur des réactions observables de l'apprenant, sur l'attention exclusive de celui-ci sur la tâche, le tout sans tenir compte des mécanismes internes impliqués dans l'acquisition de la connaissance. Elles se fient essentiellement sur des observables externes pour expliquer et justifier leurs interventions. Elles s'intéressent presque exclusivement à l'analyse explicite (consciente) du raisonnement. Les stratégies pédagogiques actuelles basent leurs interventions en fonction de l'attention à la matière enseignée ou à la tâche à accomplir. En effet, toute information complexe est décomposée en morceaux présentés graduellement à l'apprenant afin que celui-ci puisse se concentrer sur un petit morceau à la fois. Par contre, il existe une série de travaux récents dans plusieurs domaines scientifiques tels que les neurosciences qui montrent que l'apprentissage d'information simple ou complexe peut être fait sans que l'attention de l'apprenant soit complètement dirigée vers la tâche en question [50-53].

Dans cette première étude, nous nous intéressons au raisonnement humain dans un contexte de résolution de problème. Dans un tel cadre, nous cherchons à améliorer l'apprentissage par l'inconscient cognitif en utilisant notre méthode à base d'amorçage cognitif adaptée à l'éducation. Nous posons l'hypothèse de recherche suivante : l'amorçage cognitif permet d'améliorer l'apprentissage de façon générale.

2.5. Méthode

Inspirés de travaux en neurosciences de la perception cités au chapitre précédent, nous avons décidé de mettre au point une leçon commune aux deux études qui a comme but de solliciter autant les mécanismes déductifs qu'inductifs du raisonnement. De plus, cette leçon se devait d'être suffisamment complexe pour être pertinente à un contexte éducatif. Nous rappelons que nos travaux vont plus loin que ce que la littérature de la perception subliminale a montré car on implémente de l'amorçage cognitif pour des processus plus complexes que ceux présentés dans le

chapitre précédent. Ainsi, la leçon choisie consiste à enseigner la construction d'un carré magique impair² sans utiliser de calculatrice ou d'effectuer des calculs mentaux. Un carré magique d'ordre n est un carré de dimension $n \times n$ contenant une quantité de n^2 entiers disposés de façon à ce que la somme contenue dans n'importe quelle rangée, colonne ou diagonale soit la même. La figure 2.4 présente un tel carré. Nous débutons par expliquer le fonctionnement du carré et poursuivons avec le protocole choisi.

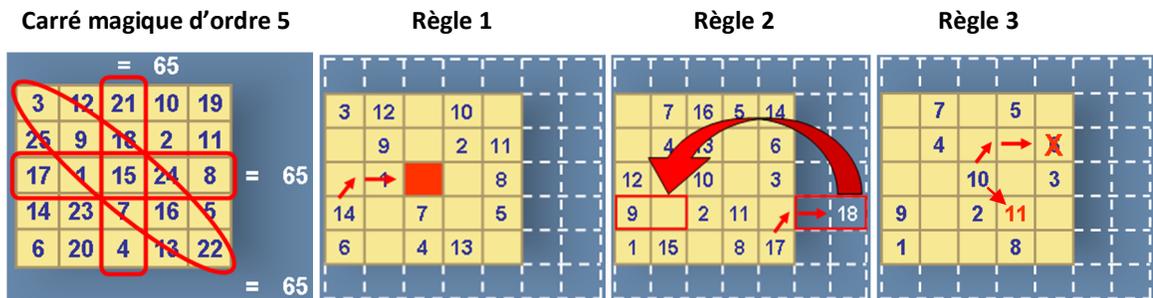


Figure 2.4 – La leçon enseignée ainsi que les trois règles que l'apprenant doit comprendre pour réussir.

Pour construire un tel carré de n'importe quel ordre impair, il suffit de suivre trois règles visuelles simples, mais cumulatives. Ainsi, la règle 3 utilise les deux premières règles et la règle 2 utilise la règle 1. La règle 1 précise que le prochain élément à placer doit être fait une case au-dessus et deux cases à droite du précédent. Par exemple, le nombre 15 est placé au-dessus du chiffre 7 dans le carré illustrant la règle 1. Cependant, il arrive qu'on se trouve en dehors du carré en utilisant la règle 1. Par exemple, lorsqu'on essaie de placer le nombre 18 dans le carré illustrant la règle 2. C'est à ce moment que la règle 2 doit être utilisée. Celle-ci stipule que tout nombre qui dépasse le carré devra être translaté dans la même direction, tel un miroir, et du même nombre de cases débordées. Ainsi, le nombre 18 devra être placé au-dessus du nombre 15, soit une translation miroir de deux cases puisqu'on a dépassé la limite du carré de deux cases. Si le dépassement est vers le haut ou vers le bas du carré, le même principe s'applique. Par exemple, lorsqu'on essaie de placer le nombre 17 dans le carré illustrant la règle 2 en utilisant la règle 1, on s'aperçoit qu'il y a dépassement : le nombre 17 se retrouve une case au-dessus du nombre 14, à l'extérieur du carré. En utilisant la règle 2, on translate le nombre en miroir à la droite du chiffre 8. Une fois que l'on utilise successivement les deux premières règles, on arrive à un point critique où la case du prochain nombre à placer est occupée par un autre nombre. Ce scénario est illustré sur le carré de la règle 3 où le nombre 11 doit être placé. La règle 3 stipule que le nombre 11 est placé

² Ces trois règles ne s'appliquent pas aux carrés pairs et nous nous sommes limités aux carrés impairs pour la démonstration.

une case en dessous et une case à droite du nombre précédent, soit le nombre 10. Dans notre exemple, la position finale du nombre 11 est au-dessus du chiffre 8.

Ces règles seules sont assez simples, mais le fait qu'elles soient cumulatives et surtout permutable rend la tâche suffisamment complexe. Prenons l'exemple du placement du nombre 16 dans le carré illustrant la règle 2. Si on utilise la règle 1, on s'aperçoit que la case où le nombre 16 doit aller est déjà occupée par le nombre 11. Dans ce cas, on se doit d'utiliser la règle 3 qui place le nombre 16 une case en dessous et une case à droite du nombre 15, donc à l'extérieur du carré. Il y a donc dépassement. Dans ce cas, la règle 2 s'applique et on translate le nombre 16 à droite du chiffre 7.

Lors du déroulement de la première expérience, nous avons décidé de ne pas dévoiler l'application de chaque règle pendant son enseignement. Notre tuteur va montrer une série de transparents « avant » « après » représentant un carré non complété sans expliquer le fonctionnement de la règle. Par exemple, pour la première règle, nous allons montrer des couples de transparents montrant en premier un carré incomplet (avant) suivi de la localisation finale du prochain chiffre à placer (après). Ainsi, nous allons montrer plusieurs couples de transparents pour chaque règle et demander à l'apprenant d'induire le fonctionnement de celle-ci. L'amorçage cognitif aura justement lieu à ce moment précis, là où le raisonnement prend place. Nous détaillons les amorçages utilisés dans la prochaine section. Pour terminer, nous ne dévoilons le fonctionnement d'une règle qu'au début de la suivante.

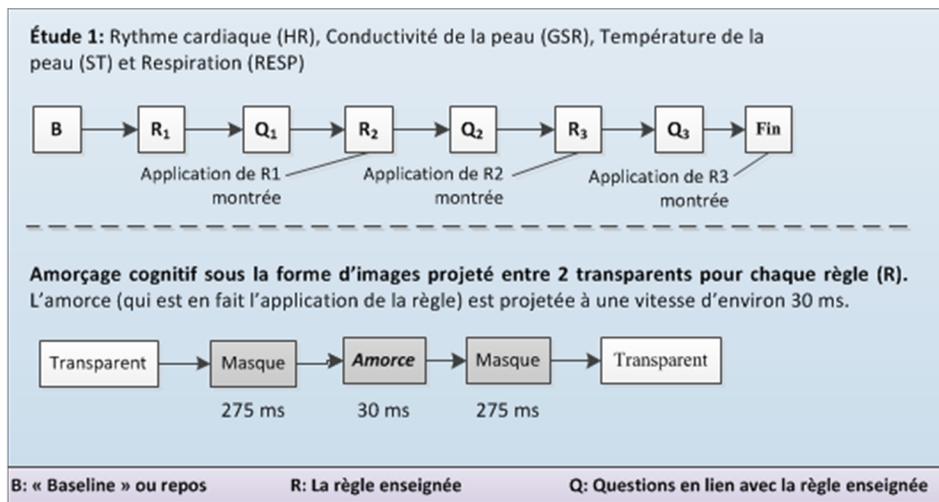


Figure 2.5 - Déroulement de l'étude

Deux groupes d'apprenants ont pris part à cette étude. Le premier groupe fera l'expérience avec les amorces (groupe expérimental) et le second sans les amorces (groupe de contrôle). La figure 2.5 résume ce déroulement.

2.5.1. L'amorçage cognitif utilisé

Tel qu'expliqué précédemment, nous allons utiliser des amorces cognitives pour stimuler et améliorer l'apprentissage des règles. Chaque règle comporte ses propres amorces adaptées au fonctionnement de celle-ci. L'amorçage que nous avons utilisé a été inspiré de plusieurs travaux dans les domaines des neurosciences et de la psychologie cognitive. Les travaux de Naccache [59] et Dehaene et al. [73] ont mis sur pied une taxonomie neuroscientifique de la perception subliminale déterminant ce qu'est un stimulus subliminal. De plus, nous avons suivi les recommandations de Del Cul et al. pour les spécificités neuroscientifiques de la projection du stimulus (vitesse, endroit, etc.) [108]. Les travaux de Schute [80] et Strahan et al. [109] quant à eux ont établi une liste de critères importants que tout stimulus doit respecter pour être proprement perçu et traité par le cerveau de façon subliminale.

Le résultat, raffiné par une multitude d'essais et erreurs dans notre laboratoire, est résumé par la figure 2.6. Pour la règle 1, nous avons conçu des amorces composées de deux flèches rouges qui sont projetées à l'endroit où le prochain chiffre devra se trouver, quelques instants avant d'afficher celui-ci. Nous couvrons chaque amorce par deux masques composés de figures géométriques sans lien avec la règle tel que dicté par les principes d'amorçage cognitif expliqués au chapitre précédent. Dans l'exemple de la prochaine figure, on affiche ces trois images de façon successive entre les deux transparents. Ce processus est répété pour tous les transparents des règles à apprendre dans la leçon avec des amorces appropriées pour chaque leçon.

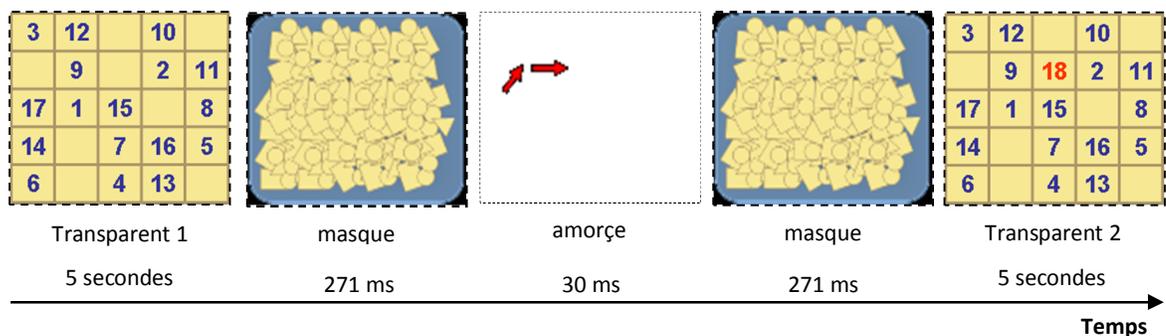


Figure 2.6 – Un exemple d'amorçage cognitif entre deux transparents

Ces amorces ont comme but de modifier les associations et schémas mentaux créés en accélérant le processus de raisonnement menant à la découverte du fonctionnement de chaque règle. En envoyant l'application à la règle de façon subliminale, on fait l'hypothèse que le raisonnement est accéléré et l'apprentissage amélioré.

2.5.2. Le système utilisé

La leçon a lieu dans un STI conçu comme un environnement de jeu sérieux appelé MOCAS [110]. Chaque règle est enseignée dans une salle virtuelle où un agent virtuel affiche les transparents pour chaque règle les uns après les autres (figure 2.8). Le système compte un total de quatre salles, une pour l'introduction et les trois autres pour les règles à enseigner (les carrés de la figure 2.7). Entre chaque salle on trouve des agents qui posent des questions à l'apprenant sur la règle apprise (la lettre Q sur la figure 2.7). L'apprenant est représenté par un avatar qui se déplace dans le labyrinthe au travers les couloirs en utilisant les flèches du clavier.

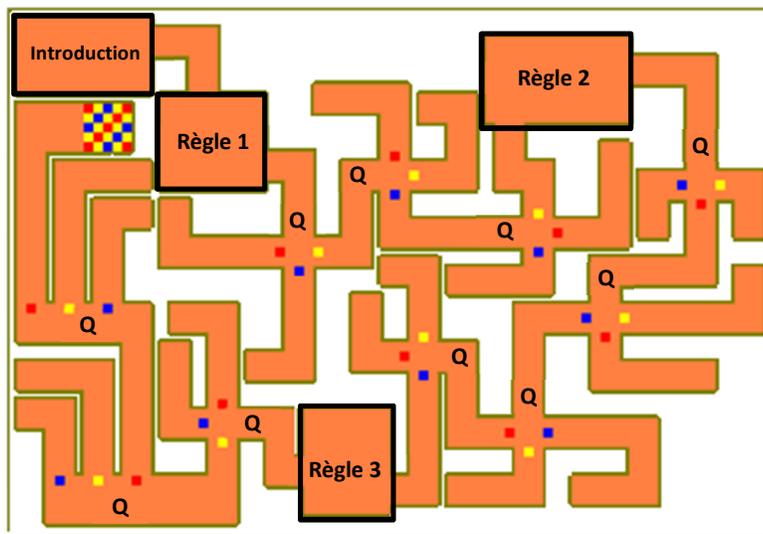


Figure 2.7 – Une vue de haut de l'environnement virtuel avec ses quatre salles

L'interaction avec les agents se fait à l'aide de la souris. L'apprenant est libre de lire et d'interrompre la leçon pour avancer dans le parcours une fois qu'il a déduit le fonctionnement de chaque règle. Il peut faire répéter la leçon à volonté en cliquant sur l'agent une fois la leçon terminée. L'apprenant répond ensuite aux questions des agents entre les salles. Les réponses aux questions se font par un choix de corridor que l'apprenant doit prendre (figure 2.8). Une mauvaise réponse est signalée par un cul de sac avec un agent annonçant la mauvaise nouvelle. Une bonne réponse est signalée par la poursuite des questions par un autre agent. Il est à préciser

qu'il n'existe aucune couleur ou patron (par exemple deux tuiles rouges de suite) qui systématiquement mènent à la bonne réponse. Ceci est évidemment pour éviter d'introduire un biais lors de l'apprentissage. Le système original MOCAS fonctionnait dans un mode fenêtré, ce qui a dû être modifié pour une exécution en mode plein écran pour permettre une plus grande immersion dans l'environnement et pour éviter les distractions à l'utilisateur.

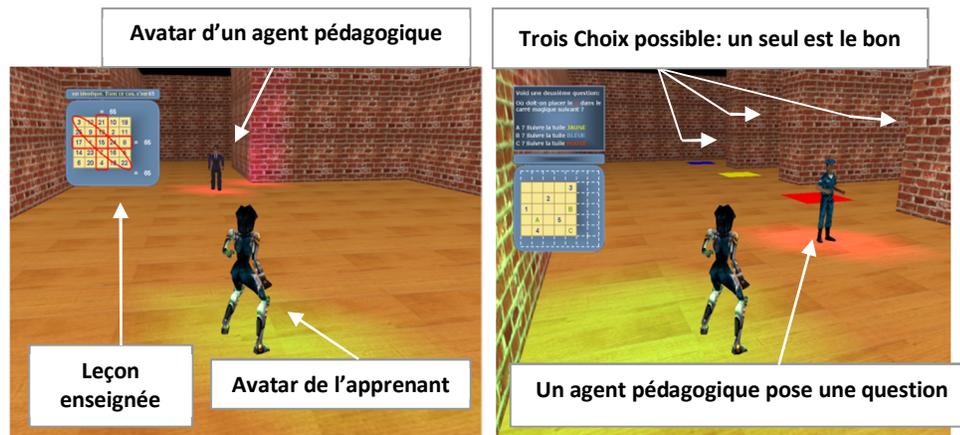


Figure 2.8 – Le STI en 3D modifié pour cette étude

En plus de la modification visuelle de l'apparence de ce STI, une autre modification plus importante a dû être apportée. Un agent subliminal a été inséré dans ce système et le module responsable de l'affichage des images, appelé « Blitting Manager », a dû être entièrement réécrit pour adapter le moteur graphique aux projections subliminales. Ainsi, une bonne partie du code source du moteur graphique supportant MOCAS a dû être réécrit pour tenir compte du taux de rafraîchissement des écrans afin que l'amorce ne soit affichée que pendant la période de temps prescrite de 30 millisecondes. L'agent subliminal a donc comme but d'indiquer au système le moment propice pour projeter les amorces ainsi que la position dans l'espace 3D de ces derniers. Une amorce projetée au mauvais endroit dans l'écran est une amorce qui n'aura aucun effet sur l'apprentissage et le raisonnement. Une fois le système testé et les vitesses ajustées à plusieurs résolutions tests que nous avons effectuées, notre étude était fin prête. Place maintenant aux mesures physiologiques que nous allons intégrer.

2.5.3. Les capteurs physiologiques utilisés

Les quatre capteurs physiologiques utilisés au cours de cette étude sont le BVP (rythme cardiaque), GSR (sudation de la peau), RESP (respiration) et TEMP (température de la peau). Ces

signaux seront enregistrés tout au long de l'étude et encodés par le boîtier de la compagnie Thought Technology [111].



Figure 2.9 – Matériel physiologique utilisé pour enregistrer les émotions. De gauche à droite : encodeur, capteur BVP, capteur GSR, capteur RESP, capteur TEMP.

Les résultats seront enregistrés dans un logiciel propriétaire. Les données peuvent ensuite être exportées dans un format compatible pour Matlab ou d'autres logiciels de traitement statistique notamment SPSS.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer l'importance des émotions pour le processus d'apprentissage. Dans ce contexte, nous avons expliqué les principes de détection des états affectifs par la biométrie. Dans ce cadre, on a présenté quelques systèmes tutoriels qui détectent ces états, mais continuent néanmoins à ne considérer que les aspects conscients impliqués dans l'apprentissage. Dans ce contexte, la mise en place d'une nouvelle méthode pour améliorer le raisonnement par l'exploration des mécanismes de l'inconscient cognitif demeure d'actualité. C'est l'objectif que nous proposons d'atteindre avec la méthode choisie de l'amorçage cognitif adaptée à l'éducation menant à un meilleur apprentissage tel expliquée dans ce chapitre et présentée au travers de l'article de revue du chapitre suivant.

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3

(Revue n° 1) L'amorçage cognitif améliore l'apprentissage dans un STI virtuel en 3D

Sommaire

3.1. ABSTRACT	60
3.2. INTRODUCTION.....	60
3.3. SUBLIMINAL PRIMING.....	61
3.4. RELATED WORK	63
3.5. EXPERIMENT	64
3.5.1. DESIGN OF THE EXPERIMENT	64
3.5.2. MOCAS AND MATERIAL USED.....	66
3.5.3. LEARNERS TESTED.....	67
3.6. RESULTS AND DISCUSSION	68
3.7. CONCLUSION	71

Article de revue

Subliminal priming enhances learning in a distant virtual 3D
Intelligent Tutoring System

Auteurs : Pierre Chalfoun et Claude Frasson

Référence :

Chalfoun, P., Frasson, C. Subliminal priming enhances learning in a distant virtual 3D Intelligent Tutoring System. *IEEE Technology and Engineering Education (ITEE): Special Issue on Intelligent Tutoring Systems*, Vol. 3, No. 4, pp 125-130. 2008.

3.1. Abstract

In this paper we discuss the use of subliminal priming in a novel way in the context of a 3D virtual tutoring system. Subliminal priming is a technique used to project information to a learner outside of his perceptual field. Subliminal projections have been used in various fields but never in the domain of 3D Intelligent Tutoring Systems. We also monitored the physiological reactions of the user while they learn. We will present the virtual environment and the subliminal module used. The results of this study show that learners do feel motivated to learn in a 3D environment and enjoy the experience even if they hardly have any video gaming experience at all. Furthermore, subliminal priming, even though not consciously perceived by a learner, seems to elicit strong physiological reactions as well as positively impacts performance.

3.2. Introduction

For more than twenty years now, the aim of intelligent Tutoring Systems (ITS) has been to properly adapt learning sessions and material to the learner. The systems evolved from Intelligent Computer-Aided Instruction to intelligent tutoring. Nowadays, ITS comprise of multiple goal-specific modules to aid the learner. One of these modules, the tutor, can possess and make use of one or more pedagogical strategies during a learning session depending on the learner's needs and evolution. However these strategies were mainly based on classical learning and teaching theories where emotions did not, at first, have an important role to play. Nevertheless, the importance of incorporating emotions into those strategies has been getting a lot of attention in recent years. Indeed, a growing body of work has proven that emotions, especially motivation and engagement, and cognition are widely related in various cognitive tasks [16]. Moreover, the importance of measuring emotions as well as consider them has become the focus of much growing research. The availability, ease of use and affordability of physiological devices helped in their integration into the tutoring systems. This interesting collaboration between ITS and physiological devices supplied the student model with affective data. That data is then used to model the learner's emotional and physiological profile and thus adapt learning accordingly. Another step forward was taken when emotions and physiological signals were combined with virtual reality. Indeed, this new partnership is very important to consider for recent evidence has shown the relevance of using such virtual ITS for affective feedback and adaptation [30].

Nevertheless, the current learning strategies have a limitation when it comes to processing complex information. Indeed, classical learning theories base their intervention on attention to the specified task at hand. Complex information is presented in pieces to gradually enable the learner to concentrate on one small piece of the puzzle at a time. However, a large body of work in neuroscience led us to believe that learning simple to complex information can be done without perception or complete awareness at the task at hand [50-52, 112]. The idea that any information projected too fast to be consciously perceived by a learner (called subliminal projection), has been the focus of much research in neuroscience but hardly any attention has been directed to it in the ITS community. Indeed, the existence of perceptual learning without perception has been proven and we believe that a subliminal stimulus, that is stimulus below the threshold of conscious perception, can help and increase learning in various situations if carefully constructed and projected.

The approach of combining emotion detection and subliminal projections aiming at faster and better learning in a virtual learning ITS is unique in our field and has, to our knowledge, never been put forward before. We intend to investigate in this paper the impact of such a novel learning strategy in a 3D virtual system on learning by stating three research questions. First, is solving a problem in a 3D virtual system has a positive emotional impact on learning? Second, is it possible to enhance the transmission of classic information using a subliminal technique? And third, what pertinent correlations can we establish between the physiological signals, thus the emotional state of the learner, and the successive suggestions that we will project subliminally?.

The organization of this paper is as follow: in the first section, we explain the grounds upon which this novel research is grounded since this work is the first of its genre in the ITS community. The second section will present and discuss the previous work related to various aspects of our research. The third section describes the experiment setup and depicts the various aspects related to subliminal stimulus in a virtual 3D tutoring system. Section four will present the obtained results which will be discussed in section five leading to the last section where we conclude and present future work.

3.3. Subliminal priming

As mentioned before, this research focuses on subliminal stimulus in a 3D virtual system to enhance learning. Before going further, we need to clearly establish the terminology that will be used in this paper. Indeed, the simple mention of the word subliminal can lead to discord and

confusion. We establish a stimulus as being subliminal when it is sent too fast for a user to consciously report its existence. Conscious perception is well established in neuroscience and its properties are well known. One of those properties is the existence of a threshold for conscious access. It is precisely this threshold that we accept as being the “line” between conscious and subconscious perception (a term also referred to as unconscious perception). The technique used to send a given stimulus below this threshold of awareness is what’s known as a subliminal stimulus as opposed to a paralingual stimulus that can be consciously perceived above the threshold [60].

Moreover, subliminal information must therefore be presented for a very short time and can vary in intensity, duration and frequency. It has however been established that subliminally sent information can bias behavior and even yield better results under specific experimental situations [52, 57, 113]. Indeed, simply sending subliminal messages without caring for context nor desired goals and emotions can prove to be inefficient or simply useless [80, 109, 114]. The cognitive process that takes place when the stimulus, either vocal or visual, is either unattended or subliminally projected is a stage we call subconscious processing. Contrary to popular belief, high-level semantic and even emotional processing has been observed during this stage [115, 116]. Another fascinating experiment placed forward the long-term effect of subliminal priming on the visual system [52]. In this experiment, subjects learned a task without actually realizing it. Participants were asked to focus their attention on random letters appearing on a computer screen while at the same time imperceptible moving dots in different directions were appearing just outside of their visual field. After a month’s training, the participants subconsciously learned to recognize and better identify the dots movements even if their attention was concentrated on the letters appearing in their visual field on the screen.

However, sending subliminal primes in a virtual environment is no easy task. Indeed, one of the main techniques used to subliminally project information is called masked priming. In this method, the system displays, for a very specific time (ex: 200ms), a figure that has nothing to do with any of the information we want to learner to process. It usually takes the form of a random series of cubes, rectangles and squares. Immediately after projecting this mask, the information we wish to subliminally project is sent. It is called the prime. This prime can only be sent during a very short time to elude the conscious perception of the learner (ex: 30 ms). Following the prime, a second mask, identical to the first, is projected at the same speed as the first mask. Since a virtual environment is basically a never ending loop where different processes take place, such as

drawing the elements, moving the avatars, processing mouse commands and so forth, we carefully implanted a subliminal module to assure that the stimulus be displayed for the specific task without delaying the system.

Thus, we believe possible, with our carefully designed subliminal stimulus, to enhance learning without consciously alerting the learner. We also believe that this new form of learning can elicit a set of positive emotional conditions, such as motivation and engagement, in the learner and thus enhance learning, problem solving and even decision making.

3.4. Related work

Sub-conscious learning in a virtual 3D tutoring system is a novel approach. Thus, to the best of our knowledge, no existent work related to this specific research has been found neither in the ITS community nor Human Computer Interaction (HCI) community. However, a handful of papers in various fields have claimed the use of subliminal priming as a support for memory in the HCI community.

One of the early works regarding the implementation of subliminal cues for task-supported operation within a software was the text editor program of [79]. In this experiment, Wallace and colleagues investigated the response of subjects when requiring help from a text editor. They found that the frequency at which subjects demanded help was much lower when the required information was presented in subliminal matter. Another very important finding is the fact that all previous studies did not have the intended results because the projected stimulus did not take into account the specifications of the computer such as screen resolution and refresh rate. The Memory Glasses by [50] used wearable glasses that projects subliminal cues as a strategy for just-in time memory support. The objective was to investigate the effect of various subliminal cues (correct and misleading) on retention in a word-face learning paradigm and compare recall performance. Another use of priming for memory support can be found in the thesis of [80] where the author assesses the effects of brief subliminal primes on memory retention during an interference task. The thesis examined in detail multiple parameters of subliminal projections such as duration, relevance and contract. Although the results of these priming seemed very encouraging, the author cautions HCI designers that misusing subliminal priming that can lead to critical disruptions of ongoing tasks. Further work from [117] have hypothesized that recognition performance in a standard item-based forgetting paradigm may be altered by subliminal cues. These authors believe that these cues can automatically activate different mnemonic strategies

thus enhancing memory retention and recall. The results have shown that item-based words primed with the word “remember” seem to be better retained than “forgot” by a very slim difference however. Besides seeming to impact memory, subliminal priming can also have an emotional consequence on learners. Very recent work from [113] put forward an interesting effect that subliminal priming can have on the self-attribution of authorship of events. Subjects were asked to compete against a computer in removing non-words such as “gewxs” from a computer screen in the fastest time possible. After a determined amount of time, the computer would remove the word. Subliminal primes of self-associated words like “I” and “me” before an action increased the personal feeling that it was the participant that eliminated the non-word and not the computer, thus increasing the feeling of self-authorship of events.

Since we also use physiological sensors to monitor the emotional reactions of the learner, it would be relevant to sum some of the work related to using physiological sensors either to record and analyze emotions that can occur in either a virtual 3D environment or not. Physiological signals are generally correlated with emotions by associating specific signals, such as skin conductance and heart rate, to valence and/or arousal [101]. Indeed, the Empathic Companion is a good example where multiple physiological sensors, namely galvanic skin response, heart rate and respiration were taken in real-time to analyze and adapt the tutor to the emotional reactions of the learner in a virtual 3D ITS [96]. Further research has analyzed a more detailed and relevant emotional significance of physiological signals, either in complex learning or gaming [23, 103, 118].

3.5. Experiment

Our research incorporated and combines all of the many different aspects of the presented related work. It uses subliminal priming in a 3D intelligent tutoring system while monitoring the physiological reactions on the learner. Moreover, we constructed the subliminal cues in such a way that would accelerate the learning process by triggering and enhancing an already possessed knowledge.

3.5.1. Design of the experiment

Indeed, the focus of the experiment is to visually teach, in a virtual 3D environment, the construction of an odd magic square of any order with the use of neither a calculator nor one

mental arithmetic operation. A magic square of order n is a square containing n^2 distinct integers disposed in a way such as all the n numbers contained in all rows, columns or diagonals sum to the same constant. Figure 3.1 depicts such a square.

To construct the following square, one must successively apply three very simple tricks. We decided to show the learners the end result of each trick without explaining how. As an example, the first trick to construction any magic square is to place the next number one square above and two squares to the right of the last one (exactly like a knight's move in chess). If we look at figure 3.1, we see that the number 10 is placed one square above and two squares to the right of number 9. Same logic applies to numbers 1 and 2, 23 and 24 and so forth. Instead of giving away the answer to the first trick, we ask the subjects to deduce this rule by themselves. This is where the subliminal stimulus comes in play. We will have two groups, one group will take part of the experiment without subliminal stimulus (control group) and the tutor will subliminally send the answer to the other group. We will then compare performances, time to complete and physiological signals. The teaching material is separated into parts, or PowerPoint-like slides, and displayed at a slow rate giving every learner an equal chance at fully reading the "slide". If the learner wished to restart a lesson, he or she simply has to click on the virtual agent.

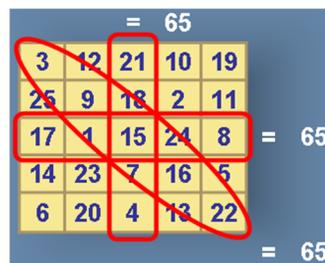


Figure 3.1 – Magic square of order 5 that sums to 65.

The subliminal stimulus and threshold were carefully chosen following the neural bases of subliminal priming [60]. Each stimulus was preceded by a 271 ms pre-mask of random geometrical figures, a 29 ms prime and a 271 post-mask of other random geometrical figures. The subliminal stimulus that will be presented to one of the two groups will be placed at significant places before and after specific slides. The experiment intends to "boost" learning by priming the answer before showing the corresponding slide. Figure 3.2 shows a diagram of the way subliminal priming will take place between slide 1 and slide 2 for example when learning to deduce the way the first trick operates.

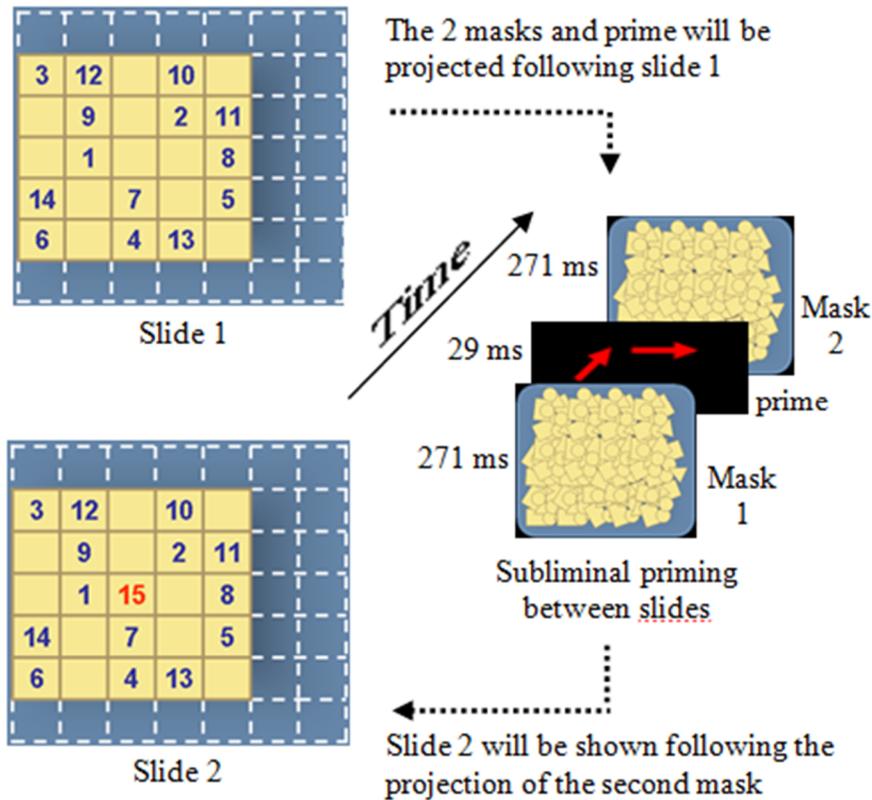


Figure 3.2 – Subliminal priming of the solution between 2 slides

The learners are instructed to answer questions following each deduced trick to test their knowledge. The learners were instructed to finish the experiment as quickly and efficiently as they could. No time limit was imposed. A base line for the physiological signals preceded all monitored activities. A questionnaire was administered before the start of the experiment aiming at collecting demographical data as well as the gaming experience of the subjects. Another series of questions were asked at the end of the experiment to evaluate the learner's appreciation and more importantly their awareness to the subliminal stimulus.

3.5.2. MOCAS and material used

Learning takes place in a game-like environment called MOCAS [110] as show in figure 3.3. The experiment has 3 rooms like the one illustrated on the left part of the figure. Each room teaches one trick. The lessons and examples are presented in the virtual world. MOCAS takes place in full screen for a more complete immersion and less window distracting events. Furthermore, the system clock is hidden to users don't get stressed by continuously monitoring the time they have

spent on each lesson. The interactions between the avatar's learner and the pedagogical are done via a mouse click. One click on the pedagogical avatar starts the lesson.

The learners are instructed to continue once they are convinced they have discovered the workings of each trick. They are then asked to answer a series of questions by another set of visually different pedagogical avatar. Each question is related to the trick previously learned. The agent asks the user to correctly place a number in a magic square. The learner responds by choosing the path that correctly answers the question. In the presented screen shot of figure 3.3, the learner can choose to follow either the yellow, blue or red path. Two of these paths will be dead-ends where he will be instructed to turn back and try again.

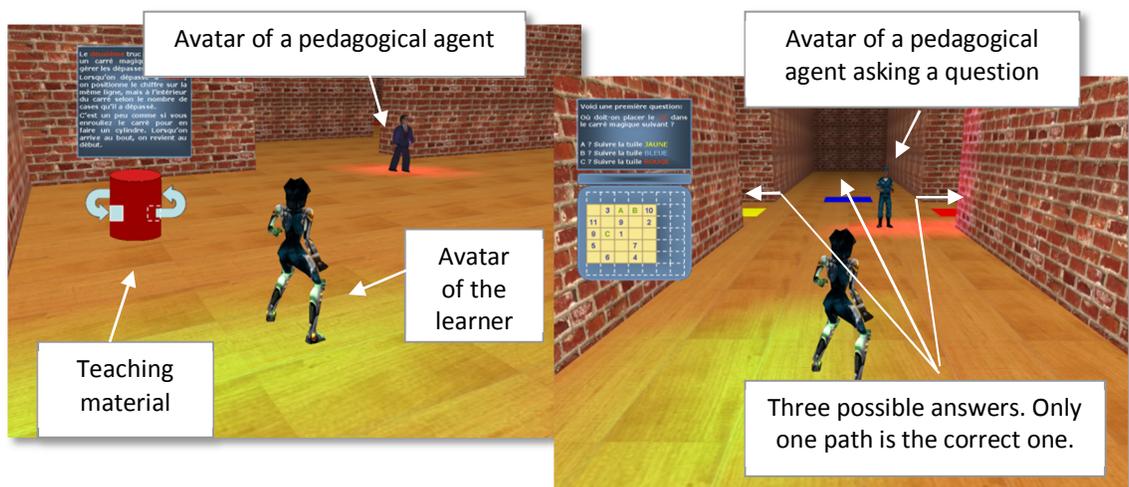


Figure 3.3 – The 3D virtual learning environment

Physiological signals of the learners were also monitored in real-time and saved for further analysis. The used signals were heart rate, galvanic skin response, respiration rate and skin temperature. The signals are managed by the ProComp Infinity Encoder [111].

3.5.3. Learners tested

A total of 31 healthy volunteers, 16 men and 15 women, took part of the experiment. The sample's mean age was 28 (SD = 4.81). Only two volunteers had extensive video gaming experience. All the others gaming experience ranged anywhere from weak to average high. A repartition of the learners can be found in table 3.1.

Table 3.1 – Participant’s distribution

	Men	Women
Group A : primed with subliminal stimulus	8	7
Group B : no subliminal stimulus	8	8
Total	16	15
		31

3.6. Results and discussion

The first aspect we wanted to investigate in this experiment was the presence, if any, of a positive emotional impact of problem solving in a 3D virtual system. Table 3.2 highlights some very interesting results regarding the degree of motivation when using our system. It seems that the learners having the least video game experience are the ones that were actually the most motivated to learn with it.

Table 3.2 - Motivational Level Of Learners

Video gaming experience	How motivating was it for you to learn in this 3D environment?	
	<i>Highly</i>	<i>Moderately</i>
Low	18	0
Moderate	6	0
Moderate to High	4	0
High	2	1
Total	30	1

Measuring the degree of enjoyment was also important because positive emotions are exactly where we want the learner to be for optimal learning. Table 3.3 shows that even though the same group of learners who have shown a great deal of motivation seem to have enjoyed the system the most, the 5 learners who showed moderate enjoyment are important to consider. When later asked why they responded with an average score, all five answers converged to the same result: the system was not flexible enough to their needs. They would have loved to be able to manipulate the material taught, to rotate it or spin it in a different direction/angle. The score they gave had nothing to do with the material learned. It had to do with the fact that they expected the environment to be very much like a game, extremely flexible and all components moveable and playable.

The second research question was to wonder if it would be possible to enhance the transmission of classic information using a subliminal technique. The results we obtained are surprising to that regard. Indeed, figure 3.4 clearly shows that overall performance with the

presence of the subliminal module was 2.6 times more efficient than without the module (44% less mistakes overall with the presence of the subliminal module).

Table 3.3 – Engagement Level Of Learners

Video gaming experience	How much was it enjoyable to learn in this 3D environment?	
	Highly	Moderately
Low	16	2
Moderate	6	0
Moderate to high	4	0
High	0	3
Total	26	5

Furthermore, the number of re-clicks is also an important indicator as to the efficiency of the subliminal module. This number represents the number of times learners asked to restart the lesson. A number of 5 re-clicks for the first trick means that this specific lesson was repeated 5 times. We can clearly see on those results that there is a significant difference ($p = 0.03$, $\alpha = 0.05$) in the amount of re-clicks when using the subliminal module, except for the last lesson.

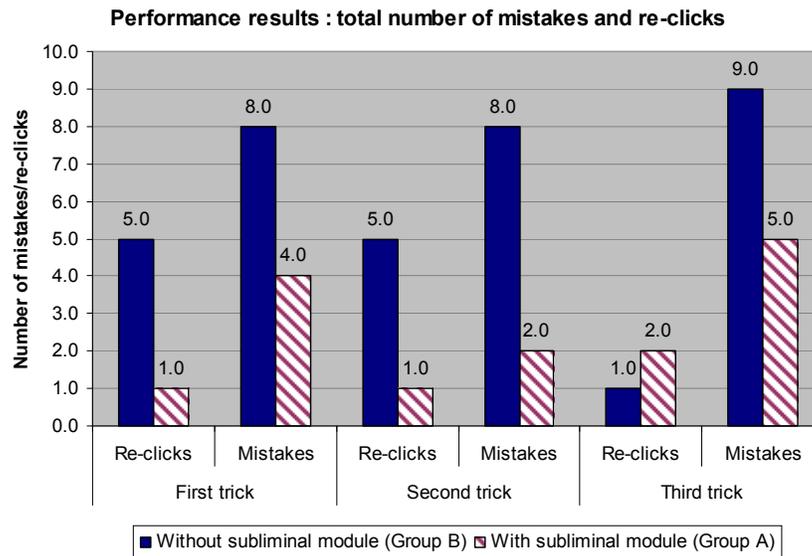


Figure 3.4 – The overall number of mistakes made for every trick

That tends to show that users tend to repeat every lesson three times less on average. This result is surprising but very encouraging. In our efforts to better understand the reasons behind these results, we decided to analyze the time subliminally primed learners took before answering each question and compare it with the time it took to our control group. Figure 3.5 presents the obtained results.

The results tend to confirm what we have been observing all along. Subliminal priming at specific and well-timed intervals seem to significantly reduce the time spend on each question. Not only does the performance of primed learners is enhanced but the time they spent on each question is reduced as well by an overall factor of 1.3 (Single factor ANOVA $p = 0.023$, $r = 0.858$, $r\text{-square} = 0.736$, $\alpha = 0.05$). It is important to note that NO subliminal priming is done during the questions.

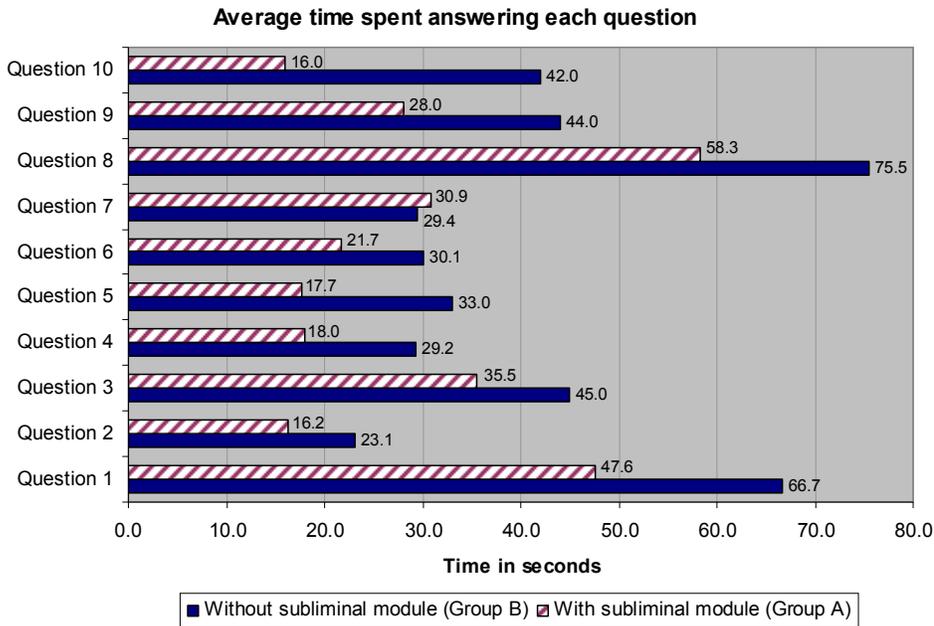


Figure 3.5 – Average time spent on each question

All the priming is done during the lessons taught. The answer to the questions is not projected subliminally when the question is asked. Two factors in our opinion explain those results. First and foremost, the subliminal priming seems to act as an accelerator on learning because some of the primed learners did not read the entire lessons. Four of them skipped right in the middle and clearly stated that they understood the lesson before its end. None of the learners in the control group interrupted the lessons. Second, the fact that the subliminal priming is goal-relevant to the cognitive task at hand might accelerate already present knowledge to quickly converse to a solution as stated by three previous studies presented here [109].

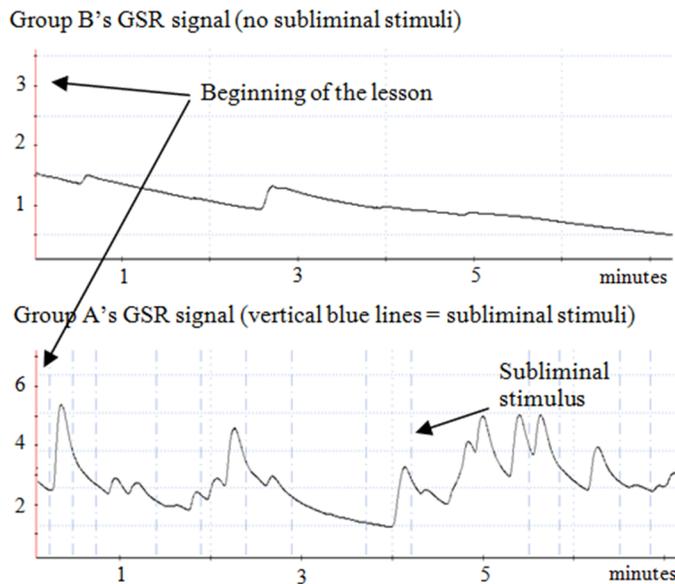


Figure 3.6 – Mean GSR signals for the subjects while learning the second trick

The last aspect we wanted to investigate was the relevant links between the physiological signals and subliminal primes. We used Matlab to smooth and average the galvanic skin response. Figure 3.6 above presents the levels of arousal when learning the second lesson, thus trying to deduce the second trick. The vertical blue dotted lines represent the moment in time when priming is projected on the screen. The GSR signal value is presented in black. The red line denotes the beginning of the lesson.

As we can clearly see, a learner's emotional reaction significantly differs when viewing a lesson without the subliminal primes. The difference seen here represents an increase ranging from 10% to 150% from the averaged baseline. Since there is a positive linear correlation of GSR with arousal [101], we can state with confidence that not only subliminal stimulus is subconsciously perceived but seems to produce significantly high arousal states in the learners.

3.7. Conclusion

We presented in this paper the use of subliminal priming in a novel way in the context of a 3D virtual tutoring system. In contrast to the previous work regarding the use of subliminal priming, our work differs in three ways. First, the subliminal priming was used to elicit an already possessed knowledge to get a better and quicker understanding of the problem at hand from the group subjected to subliminal stimulus. We showed that not only the overall performance was enhanced for that group but the time learners took to answering questions was shortened by the

presence of the subliminal priming module. Second, the integration of 3D gaming-like environment, physiological sensors and subliminal stimulus is novel in itself and as the results have shown seem to yield very promising results by showing high levels of motivation and enjoyment. Third, we presented physiological evidence supporting the emotional response in terms of valence of subliminal priming in the context of learning in a virtual environment. In the light of the encouraging results, we plan as future work to determine and validate in more details the various links between the subliminal primes and the other physiological signals and try to link them to performance if possible in the hopes of establishing solid correlations. We also would like to examine the pertinence of projecting a more complex series of stimulus in a more elaborate situation where the solution is equal or more important than the problem. We would like to see and test the different kinds of priming that we could use in those specific situations. Finally we would also like to study the various aspects of real-time adaptation and subliminal priming with regards to the emotional state of the learner. Although the preliminary results clearly show that this innovative technique helps learners better answer questions, we believe further research will demonstrate the positive impacts and effectiveness of this novel work on the full learning process.

CHAPITRE 4

CHAPITRE 4

Discussion des résultats

Sommaire

4.1. DISCUSSION SUR L'AMORÇAGE COGNITIF	75
4.1.1. EFFET CUMULATIF POSITIF OBSERVÉ	75
4.1.2. GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE D'AMORÇAGE UTILISÉE	77
4.2. DISCUSSION SUR LA DIMENSION ÉMOTIONNELLE	77
4.2.1. VARIATIONS AFFECTIVES OBSERVÉES PENDANT LA RÉOLUTION DE PROBLÈME	77
4.2.2. PERTINENCE DE LA PÉRIODE DE REPOS ("BASELINE")	80
4.2.3. DURÉE DE VIE D'UNE ÉMOTION	81
4.2.4. DEGRÉ D'INTENSITÉ D'UNE ÉMOTION	81
4.2.5. UTILISATION DE CAPTEURS COMPLÉMENTAIRES	81
4.3. DISCUSSION SUR L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL UTILISÉ	82
4.3.1. AMÉLIORATIONS GÉNÉRALES DU MONDE VIRTUEL	82
4.3.2. OPTIMISER LA NAVIGATION	82
4.3.3. PERSONNALISATION DES AGENTS VIRTUELS	83
4.3.4. HOMOGÉNÉITÉ DE L'ÉCHANTILLON	84
4.4. CONCLUSION	84

Le précédent travail a présenté une étude exploratoire montrant l'efficacité d'une nouvelle méthode d'enseignement subliminale sur l'apprentissage. Cette méthode, fondée sur les principes neuroscientifiques de la perception subliminale et implémentée dans MOCAS, a également démontré des résultats forts intéressants du point de vue émotionnel. Nous discutons maintenant de trois aspects reliés au chapitre précédent, soit l'amorçage cognitif, la dimension émotionnelle et l'environnement utilisé. Nous terminons ce chapitre avec nos conclusions et la suite de la recherche.

4.1. Discussion sur l'amorçage cognitif

Dans cette section, nous présentons des résultats complémentaires concernant l'impact positif des amorces sur la performance. Ces résultats ont été publiés à une conférence internationale en interfaces-homme machine appelée HCII [119]. Nous terminons cette section sur une discussion concernant la généralisation de l'amorçage cognitif utilisé.

4.1.1. Effet cumulatif positif observé

Nous avons étudié l'impact des amorces cognitives sur trois variables psychométriques importantes pour la résolution de problème tout au long de la leçon. Ainsi, nous avons comparé, pour l'ensemble des apprenants des deux groupes expérimentaux, le nombre de répétitions qu'un apprenant fait d'une question³ (variable « Reclick »), le nombre total d'erreurs commises pour chaque règle⁴ (variable « Errors ») et le temps moyen de découverte pour une règle (variable « Time »). La figure 4.1 présente ces résultats.

Les barres de couleur pleine représentent les trois variables (« Reclick », « Errors » et « Time ») pour le groupe de contrôle (sans amorces cognitives). Les barres avec motifs juxtaposées représentent les trois mêmes métriques, mais pour le groupe expérimental (avec amorces cognitives). Regardons à titre d'exemple les deux premières colonnes de cette figure représentant les résultats de la métrique « Reclick » pour les questions de la règle 1 (« 1st Trick questions »). On voit ici que les amorces subliminales reçues pendant l'apprentissage de la règle 1 ne semblent pas avoir un effet statistiquement significatif sur le nombre de fois qu'un apprenant

³ Chaque question demeure affichée à l'écran pour un temps fixe de 45 secondes. Ce seuil a été choisi expérimentalement en fonction d'un temps de lecture normal pour un étudiant universitaire.

⁴ Le chiffre d'erreurs présenté dans cette section représente le nombre total d'erreurs commises pour chaque règle. Les chiffres présentés sur la figure 3.4 représentent le « fait de commettre une ou plusieurs fautes ». Ainsi, lorsqu'un apprenant commet 3 fautes pour une même question, on verra le chiffre 3 ici versus 1 dans la figure 3.4

demande à relire la question (34 « Reclick » pour le groupe de contrôle versus 35 pour le groupe expérimental). Ceci n'a rien d'inattendu car cette règle est la plus facile et nous ne nous attendions pas à observer des différences remarquées sur celle-ci. Notre intuition initiale était que les amorces cognitives auraient un effet bénéfique sur l'apprentissage des règles plus complexes sur le long terme. C'est en effet ce que l'on observe sur la partie droite de la figure. De fait, la troisième et dernière règle est la plus complexe car elle requiert une combinaison des deux précédentes pour être réussie. On observe une diminution autant pour le nombre d'erreurs (« Errors ») que pour le temps de complétude moyen de chaque question (« Time ») de façon très significative au fur et à mesure que l'apprenant progresse dans la leçon ($p < 0.001$, $\alpha = 0.05$). Ainsi, arrivé à la troisième et dernière règle, la performance des apprenants du groupe expérimental était environ 40% supérieure à celle des apprenants du groupe de contrôle.

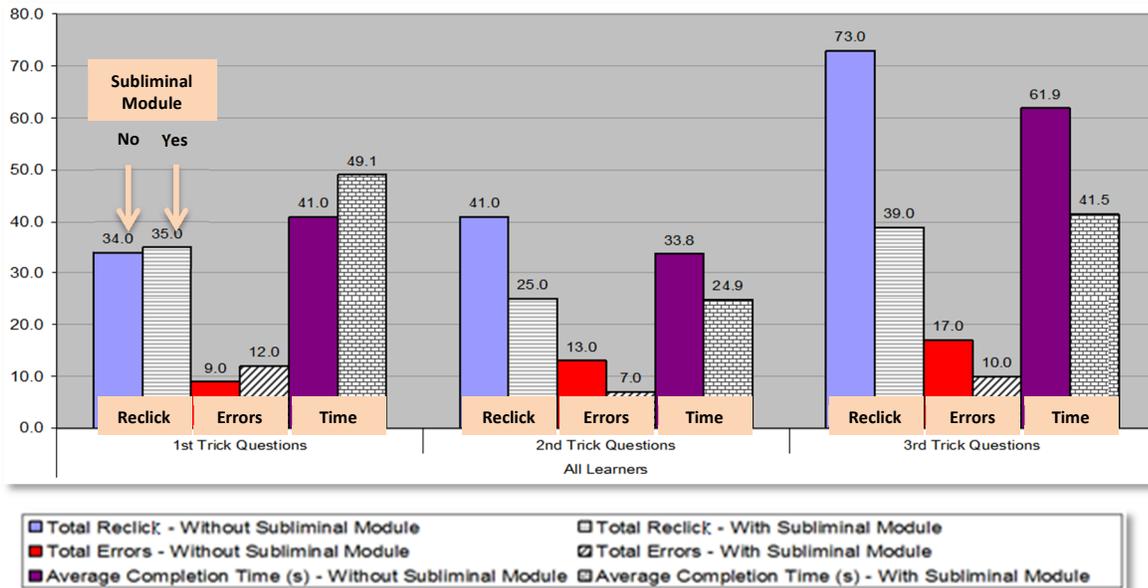


Figure 4.1 – Impact des variations émotionnelles sur les résultats par règle. Source [119]

Nous observons également une réduction graduelle du nombre d'erreurs et du temps de complétude moyen du groupe expérimental tout au long de la leçon. Ces résultats semblent nous indiquer que l'effet des amorces cognitives est non seulement cumulatif, mais qu'il est *positivement* cumulatif : on voit potentiellement dans ces résultats une progression croissante des capacités de raisonnement des apprenants par l'entremise de l'amorçage cognitif.

4.1.2. Généralisation de la méthode d’amorçage utilisée

L’étude présentée a utilisé une méthode d’amorçage visuelle pour améliorer l’apprentissage dans la construction d’un carré magique. Nous savons par les études neuroscientifiques qu’une méthode d’amorçage cognitive basée sur des images se généralise difficilement dans le cadre d’un exercice de type non visuel. On pourrait donc se poser la question suivante : cette méthode se généralise-t-elle pour tout exercice impliquant des tâches visuelles ? Il aurait en effet été intéressant de savoir si cette méthode d’amorçage aurait le même effet pour un exercice de résolution de problème visuel similaire.

Il aurait été encore plus intéressant dans notre cas de se demander si les apprenants ayant raisonnés avec le module subliminal conservent cet avantage sur le long terme. Que ce serait-il passé si on avait rappelé le groupe ayant appris avec le module subliminal pour comparer ses résultats avec ceux d’un groupe témoin pour une tâche de résolution de problème similaire à la construction d’un carré magique? Ces deux questions fortes intéressantes pourraient d’ailleurs faire partie de nos travaux futurs.

4.2. Discussion sur la dimension émotionnelle

Dans cette section, nous présentons des résultats complémentaires concernant l’impact positif des amorces sur les émotions des apprenants. Ces résultats sont extraits du même article publié à la conférence HCII mentionné dans la section précédente [119]. Nous terminons cette section par une discussion plus étendue concernant divers problèmes « ouverts » mais non résolus en ce qui a trait à la notion de mesure des émotions.

4.2.1. Variations affectives observées pendant la résolution de problème

Les résultats dans le précédent chapitre ont démontré un effet intéressant des amorces sur la dimension de l’activation émotionnelle (figure 3.6 à la page 71). Nous avons décidé d’investiguer cela davantage et de comparer les variations affectives entre les meilleures et les plus faibles performances calculées en termes de nombre moyen d’erreurs commises pour l’ensemble des trois règles. Ainsi, nous avons divisé les apprenants en trois catégories : (1) les cinq meilleures performances, (2) les cinq plus faibles performances et (3) les performances de l’ensemble des participants. La figure 4.2 présente les variations affectives observées en fonction des deux dimensions émotionnelles discutées préalablement, soit la valence et l’activation. On rappelle que

les capteurs physiologiques sont corrélés avec ces deux dimensions tel qu'expliqué à la page 44. Pour chaque catégorie, les données affectives présentées sont groupées en fonction de la présence ou non du module subliminal. De plus, les résultats ont été normalisés en utilisant l'équation 2.1 présentée à la page 46. En guise de rappel, le chiffre trois normalisé représente une augmentation de 50% par rapport au chiffre deux normalisé. Ceci nous permet de comparer les réactions émotionnelles entre les apprenants.

Les données de la figure 4.2 représentent la moyenne des variations affectives pour une période de quatre secondes suivant chaque amorce. On rappelle que plusieurs amorces sont projetées pour chaque règle tel qu'expliqué à la page 50. Ainsi, les barres de couleur pleine représentent la moyenne du signal physiologique au moment où l'amorce est projeté à l'écran ($t=0s$, $s =$ secondes). Les barres hachurées, juxtaposées aux barres pleines, représentent la moyenne pour le même signal physiologique sur une période de quatre secondes suivant la projection de l'amorce ($T = t+4s$, $s =$ secondes). Nous précisons que le groupe « A » a suivi la leçon sans le module subliminal et n'a conséquemment reçu aucune amorce, contrairement au groupe « B ». Afin de pouvoir comparer les variations affectives des deux groupes, nous avons manuellement placé des marqueurs dans l'enregistrement de l'expérience pour chaque apprenant du groupe « A » au moment précis où des amorces ont été projetées dans le groupe « B ». Appelons ces amorces « amorces manuelles ». Ce long processus est possible car l'écran servant à présenter la leçon est enregistré par une caméra.

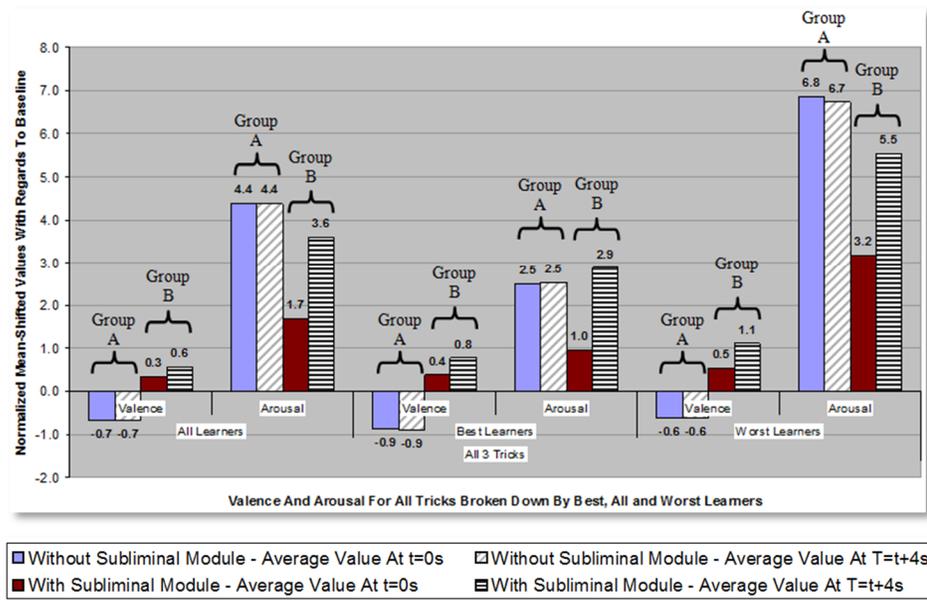


Figure 4.2 – Variations émotionnelles observées suite aux amorces lors de l'apprentissage. Source [119]

Prenons les huit premiers chiffres de cette figure pour mieux comprendre. Les deux premiers chiffres de la catégorie « All learners », -0.7 et -0.7 pour le groupe « A », indiquent que la moyenne de variation affective pour la dimension valence au cours des quatre secondes suivant la projection d'une « amorce manuelle » est nulle (-0.7 moins -0.7 = 0). Inversement, les deux prochains chiffres (0.3 et 0.6) pour le groupe « B » nous indiquent que la moyenne pour la même dimension émotionnelle (valence) a augmenté pour ce groupe expérimental. Ainsi, de façon générale, les amorces ont provoqué en moyenne une augmentation de 50% de la valence pour l'ensemble de la leçon (donc les trois règles apprises). On poursuit ce raisonnement pour les quatre prochains chiffres. Les deux prochains chiffres de la catégorie « All learners », 4.4 et 4.4 pour le groupe « A », indiquent que la moyenne de variation affective pour la dimension activation au cours des quatre secondes suivant la projection d'une « amorce manuelle » est nulle (4.4 moins 4.4 = 0). Inversement, les deux prochains chiffres (1.7 et 3.6) pour le groupe « B » nous indiquent que la moyenne pour la même dimension émotionnelle (activation) a augmentée pour ce groupe expérimental. Ainsi, de façon générale, les amorces ont provoquées en moyenne une augmentation de 47% de la dimension de l'activation émotionnelle pour les trois règles apprises.

Ces différences sont non seulement statistiquement très significatives ($p < 0.001$, $\alpha = 0.05$) pour tous les groupes, mais présentent deux apports supplémentaires à notre recherche : (1) elles nous permettent de faire la distinction entre les meilleures performances et les performances les plus faibles en termes d'activation et de valence émotionnelles et (2) nous permettent d'observer l'impact positif des amorces cognitives sur les émotions des trois catégories d'apprenants pour un contexte de résolution de problème. On observe par exemple que les apprenants de la catégorie « Worst learners » appartenant au groupe expérimental « B » ont des niveaux d'activation relativement semblables à ceux du groupe « A » (5.5 pour le groupe B versus 6.7 pour le groupe « A ») mais ont une valeur de valence opposée (1.1 pour le groupe « B » versus -0.6 pour le groupe « A »). Ceci se traduit par des émotions plus négatives pour le groupe de contrôle « A » lorsqu'on transpose ces deux valeurs sur le modèle de classification des émotions présenté au chapitre 2 (figure 2.2 à la page 44). Ces apprenants de la catégorie « Worst Learners » se trouvent dans le quadrant supérieur **gauche** du modèle, là où des émotions telles que la *frustration* sont présentes, contrairement aux apprenants du groupe expérimental « B » qui se retrouvent dans le quadrant supérieur **droit**, là où on retrouve des émotions positives.

Une autre observation très intéressante au niveau de l'impact des amorces sur les émotions est faite en comparant les meilleurs apprenants du groupe « A » avec la moyenne de tous les apprenants du groupe « B ». On constate qu'au niveau émotionnel, les meilleurs apprenants du groupe « A » ont quand même une valence légèrement négative alors que la moyenne de l'ensemble des apprenants du groupe « B » affiche une valence plutôt positive. Ceci nous amène à dire que les amorces produisent un impact positif émotionnel plus important chez l'ensemble des apprenants du groupe « B » versus les meilleures performances des apprenants du groupe « A » (sans amorce). Ces résultats pourraient servir de baromètre pour le nombre d'amorces projetées dans un STI capable de calculer ces variations en temps réel.

Nous passons maintenant à une discussion portant sur quelques problèmes encore non-résolus concernant la mesure des émotions. Les domaines de la psychologie cognitive et celui de la psychophysologie notent plusieurs points critiques concernant les mesures, en temps réel ou hors-ligne, des réactions physiologiques d'un individu [120]. Ces points sont les suivants : la pertinence de la période de repos, la durée de vie d'une émotion, le degré d'intensité d'une émotion et l'homogénéité d'un échantillon.

4.2.2. Pertinence de la période de repos (“baseline”)

Levenson [120] définit le problème de trouver une « Baseline » comme étant le défi constant à trouver une condition à laquelle tout changement physiologique futur pourrait y être comparé. Cette condition est communément appelée « Baseline », ou période neutre. La majorité des études en biométrie s'entendent pour utiliser comme « Baseline » un moment dans lequel l'individu est au repos et n'effectue aucune tâche en particulier. Cette convention est basée sur la croyance qu'un individu n'a pas « d'émotion particulière » pendant le repos. Cependant, Levenson nous prévient qu'une émotion n'est pas un phénomène spontané qui se superpose sur un état de repos « neutre », mais risque au contraire d'avoir lieu lorsque le système nerveux autonome est dans un état d'activation modéré.

C'est pour cette raison que nous avons utilisé une période de repos où l'apprenant se trouve dans un état de relaxation tout en ayant les yeux ouverts, en train de fixer un point à l'écran. Le système étant éveillé, on évite d'établir une « Baseline » trop basse qui risquerait de fausser nos résultats quand viendra le temps de normaliser. De plus, une « Baseline » avec les yeux ouverts permet également au système nerveux de tenir compte d'autres facteurs environnementaux tel

que la température de la pièce, l'éclairage ambiant, etc. On établit ainsi une condition de comparaison la plus indépendante possible des conditions expérimentales à tester.

4.2.3. Durée de vie d'une émotion

La durée de vie d'une émotion est calculée en partant du moment où l'émotion apparaît jusqu'au moment où elle cesse de perdurer. La littérature psychophysique suggère que cette durée de vie pourrait approximativement varier de 0.5 à 4 secondes [120]. Cette période semble ainsi placer une émotion entre un réflexe et une humeur selon Levenson. Nous avons mené notre expérience avec ce seuil dans le chapitre précédent et, tout comme le démontrent les résultats complémentaires présentés dans ce chapitre, on confirme effectivement qu'une durée de quatre secondes semble être un moment pertinent pour la détection d'un état émotionnel.

4.2.4. Degré d'intensité d'une émotion

De façon complémentaire à la durée de vie d'une émotion, il y a également le degré d'intensité d'une émotion qui est inévitablement présente dans les données physiologiques mesurées. L'utilisation de différents capteurs physiologiques est une technique utilisée pour mesurer les différents degrés d'intensité d'une émotion. Par exemple, le capteur GSR permet d'enregistrer diverses réactions émotionnelles provoquant une forte activation chez l'apprenant, contrairement au capteur BVP (calculant le rythme cardiaque) qui est incapable d'enregistrer la même variation affective. Ce phénomène bien connu est expliqué par le fait que les manifestations émotionnelles sont intimement reliées au système nerveux autonome qui ne semble pas manifester le même degré « d'énergie » pour des émotions à intensités variables. Dans notre étude, nous utilisons la normalisation pour comparer les individus entre eux, et la mesure maximale est plutôt déduite en fonction de la variation maximale du groupe d'individus.

4.2.5. Utilisation de capteurs complémentaires

Une des améliorations possibles au niveau de la mesure concerne définitivement l'ajout d'autres capteurs physiologiques. Cependant, la majorité des capteurs utilisés aujourd'hui (en 2012) étaient très coûteux au moment où notre recherche a débuté (en 2007). De fait, nous n'avions malheureusement pas accès à des capteurs de type suivi oculaire, et les capteurs cérébraux (appelés EEG) étaient également limités. Nous avions un capteur cérébral à l'époque, ce qui n'est

pas suffisant pour mesurer l'impact de notre nouvelle méthode à base d'amorçage cognitif. Par contre, nous avons eu la chance d'obtenir de tels équipements l'année suivante et nous les avons utilisés dans la deuxième partie de cette thèse.

4.3. Discussion sur l'environnement virtuel utilisé

L'étude présentée au chapitre précédent a été réalisée dans un STI existant utilisant un moteur en trois dimensions pour la navigation ainsi que des agents virtuels pour présenter la matière à l'utilisateur. Nous discutons ici de trois améliorations possibles à apporter à cette étude.

4.3.1. Améliorations générales du monde virtuel

Les premières améliorations générales à apporter concernent le monde virtuel en soi. Avoir eu plus de temps et de ressources, il aurait en effet été intéressant d'optimiser la navigation et de personnaliser les agents virtuels.

4.3.2. Optimiser la navigation

La navigation dans le monde virtuel aurait pu introduire un biais pour cette étude. En effet, le monde virtuel est conçu comme un labyrinthe dans lequel les apprenants pouvaient librement naviguer. La figure 4.3 présente le monde virtuel complet avec une vue de haut. Prenons l'exemple de la règle 2 pour illustrer nos propos. Sur la partie droite de la figure, on aperçoit la salle dans laquelle l'apprentissage a lieu. Une fois terminé, le participant prend le corridor qui mène vers « Q », un agent virtuel qui lui pose une question à laquelle trois réponses sont possibles. Pour choisir une réponse, l'apprenant doit suivre la tuile au sol représentant la réponse de son choix. Si l'apprenant choisi d'aller à gauche ou à droite, il se retrouvera dans un cul de sac avec un agent virtuel qui lui indique son erreur. C'est à ce moment que l'apprenant doit faire demi-tour et retourner à l'agent « Q » pour revoir la question et choisir une autre réponse. La navigation se faisant exclusivement avec les flèches du clavier, la caméra dans l'environnement virtuel pivote à droite lorsqu'on appuie sur flèche à droite, pivote à gauche lorsqu'on appuie sur la flèche de à gauche et avance lorsqu'on appuie sur la flèche du haut. Or, nous savons que ces mouvements sont assez familiers pour les apprenants ayant une bonne expertise dans les jeux vidéo mais nous n'étions pas certains de l'effet que ce mode de navigation pourrait avoir sur les participants n'ayant jamais joué à des jeux vidéo.

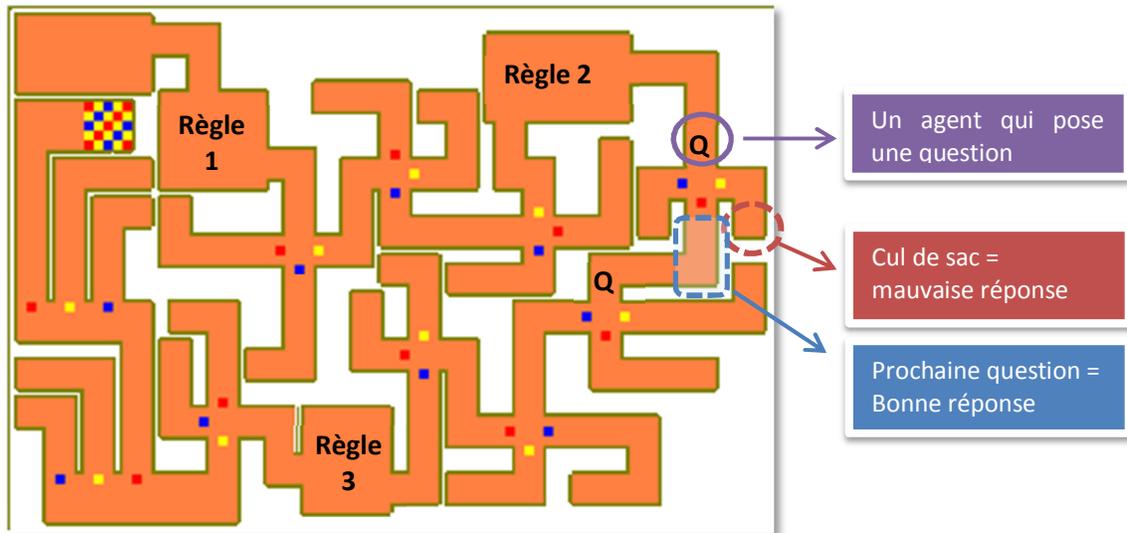


Figure 4.3 – Vue de haut de la configuration du monde virtuel utilisé

Nous avons eu un seul participant qui a connu des difficultés de navigation, mais celles-ci ont eu lieu au début de l'expérience, avant même de se rendre à la règle 1. En effet, nous avons prévu dans notre protocole expérimental une période de deux minutes pour justement familiariser les apprenants à l'environnement et à la navigation. Une fois cette période terminée, tous les participants étaient prêts à naviguer sans difficulté.

4.3.3. Personnalisation des agents virtuels

En ce qui a trait aux agents virtuels eux-mêmes, il aurait été intéressant d'analyser l'apparence visuelle de l'agent sur la navigation et la motivation globale des apprenants. En effet, les agents utilisés sont des modèles graphiques 3D libres sur Internet et conséquemment peu développés ou réalistes. Les agents que nous avons utilisés sont des personnages avec un costume militaire et une casquette. Malgré le fait que nous pensions que ce genre de personnage n'est pas ce qu'il y a de plus engageant, les résultats du questionnaire posé après l'étude nous ont surpris. Nous pensions au début offrir des agents plus humains et mieux modelés afin de correspondre à la réalité d'un humain, mais les participants nous ont au contraire indiqué qu'ils auraient préférés avoir des agents d'apparence moins humaine et plus virtuelle, tels que des animaux ou même des clowns (suggestion d'un participant). Une participante nous a même indiqué que « tant qu'à être dans un environnement amusant, autant avoir des personnages le plus loin possible de ma réalité quotidienne ».

Quelques études dans notre domaine ont cependant précisé l'importance de l'apparence graphique d'un personnage 3D sur les apprenants dans le contexte des jeux sérieux [121, 122]. Nous pensons que ces études s'appliqueraient plutôt à un contexte d'apprentissage profond dans lequel les connaissances acquises se font sur le long terme, c'est-à-dire sur plusieurs semaines, ce qui n'est pas le cas dans notre étude. En effet, dans notre cas, l'apprentissage se faisait sur une durée relativement courte et nous pensons que dans notre étude l'élément « fun » avait une prédominance sur l'élément « sérieux ».

4.3.4. Homogénéité de l'échantillon

Outre les trois précédents points à considérer lors de la mesure des émotions, il est crucial de considérer ce dernier point : l'homogénéité. Le fait de prendre des mesures sur un même ensemble d'individus peut créer un biais important dans les données. Les personnes recrutées pour notre étude provenaient de différentes facultés de notre université, avec un contact relativement important avec les technologies de l'information. En soi, ceci n'est pas un problème car notre recherche se focalise sur les mécanismes d'amorçage cognitif et non sur la maîtrise d'un ordinateur. Cependant, nous avons fait bien attention d'équilibrer les groupes en fonction du sexe, de la provenance et de l'âge. Malgré cela, il aurait été intéressant de constater si les amorces cognitives utilisées auraient provoqué les mêmes réactions sur un échantillon semblable d'étudiants provenant d'un autre campus universitaire.

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des résultats complémentaires à ceux décrits dans l'étude du chapitre précédent. Nous avons démontré que la méthode d'amorçage cognitive présentée permettait d'améliorer l'apprentissage dans un environnement de résolution de problème. Les résultats très encourageants obtenus nous ont permis de nous interroger sur les raisons pouvant expliquer le succès de notre méthode d'amorçage. Nous sommes arrivés à la conclusion que les amorces cognitives orientées à présenter la solution d'un problème sont celles principalement responsables de ce succès. Ce type d'amorce est appelé amorce *Réponse*. Également, le fait de synchroniser les vitesses de projections avec le taux de rafraichissement de l'écran ont permis une harmonie entre ce que nous voulions projeter et ce que l'inconscient cognitif humain a traité.

Il n'en demeure pas moins qu'un travail central du MIT (« Massachusetts Institute of Technology ») a soulevé la pertinence d'utiliser des amorces *Erreur* (« miscue » en anglais) [50] pour améliorer la capacité de rappel de la mémoire humaine. Ces amorces sont des amorces projetées ne donnant pas une réponse à la question demandée. Nous trouvons effectivement ce chemin fort intéressant et nous avons décidé d'intégrer ce type d'amorce dans notre prochaine étude pour étudier son impact, le cas échéant sur le raisonnement pour l'induction de la connaissance.

Partie II : améliorer l'induction de la connaissance

CHAPITRE 5

CHAPITRE 5

Amorçage cognitif : dimension cérébrale

Sommaire

5.1. ENCÉPHALOGRAPHIE : PRINCIPES ET MÉTHODES	89
5.1.1. MÉTHODE N° 1 : ONDES CÉRÉBRALES	94
5.1.2. MÉTHODE N° 2 : POTENTIELS ÉVOQUÉS	95
5.1.3. JUSTIFICATION DU CHOIX DE LA MÉTHODE D'ANALYSE	97
5.1.4. FONCTIONS COGNITIVES MESURABLES PAR LA MÉTHODE ONDES CÉRÉBRALE.....	97
5.2. PROBLÉMATIQUE	100
5.3. MÉTHODE.....	101
5.3.1. DÉROULEMENT GÉNÉRAL DE L'EXPÉRIENCE.....	101
5.3.2. AMORÇAGE COGNITIF ENRICHIS	102
5.3.3. LE SYSTÈME UTILISÉ.....	103
5.3.4. LES CAPTEURS UTILISÉS	105
5.4. CONCLUSION	106

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous présentons les résultats de notre deuxième étude implémentant une version modifiée de la méthode d'enseignement à base d'amorçage cognitif, toujours en s'appuyant sur des études en neurosciences. Notre méthode a été modifiée par l'ajout d'un nouveau type d'amorce dans le but d'améliorer l'induction de la connaissance dans un contexte de résolution de problème. Cette deuxième étude utilise la même leçon que la première, soit la construction d'un carré magique impair, mais contrairement à la première étude, nous ne fournissons pas les réponses des trois règles aux apprenants. Ceci force les apprenants à établir leurs propres schémas mentaux pour le fonctionnement des règles menant à la construction du carré magique. L'amorçage cognitif dans cette deuxième étude a comme but d'améliorer le raisonnement des apprenants lorsqu'ils sont en train d'induire le fonctionnement des trois règles du carré magique. Nous nous sommes particulièrement intéressés dans cette étude à mesurer la manière dont les apprenants bâtissent leurs schémas mentaux, soit par logique ou intuition. À cet effet, nous avons introduit un nouveau capteur cérébral médicalement non intrusif appelé l'ÉlectroEncéphaloGramme, ou EEG. Ce capteur mesure l'activité cognitive humaine par le biais de l'encéphalographie permettant d'enregistrer l'activité électrique neuronale du cerveau. En plus de l'EEG, nous avons également utilisé deux capteurs physiologiques, BVP et GSR, pour mesurer la réaction émotionnelle des apprenants. Nous débutons ce chapitre par présenter les principes et méthode de l'encéphalographie et indiquer le rôle fondamental de cette méthode pour la mesure de l'activité cognitive chez l'humain. Nous détaillons ensuite la seconde étude utilisant notre méthode d'amorçage cognitif afin d'améliorer l'induction de la connaissance dans un STI.

5.1. Encéphalographie : principes et méthodes

Le cerveau humain fait partie du système nerveux central qui est en constante activité (« CNS » pour « Central Nervous System », partie gauche de la figure 2.1). L'unité de base pour la transmission d'information dans ce système nerveux s'appelle un neurone. Cette information est électrochimique et son amplitude est mesurée en microvolts (10^{-6} volts) et sa fréquence en cycles par secondes. L'électroencéphalographie est la technique d'enregistrement utilisée pour représenter l'activité neuronale dans le cerveau, appelée activité cérébrale. Une méthode populaire pour observer le comportement d'une colonie de neurones est l'utilisation d'un ElectroEncéphaloGramme ou EEG. Les premiers enregistrements d'activités électriques d'un cerveau sont attribuables à Richard Caton en 1875 lorsqu'il utilisa des capteurs primitifs sur les

animaux. Depuis, le psychiatre Australien Hans Berger a été le premier à décrire en 1929 l'utilisation d'un EEG sur des humains. Un EEG révèle plusieurs caractéristiques intéressantes de l'activité électrique du cerveau :

- L'activité électrique n'est jamais absente même lorsqu'une personne est endormie ou silencieuse.
- Un EEG réalisé au niveau du cortex présente une variété de profils d'activités.
- Le profil d'un EEG se modifie lorsque le comportement change.

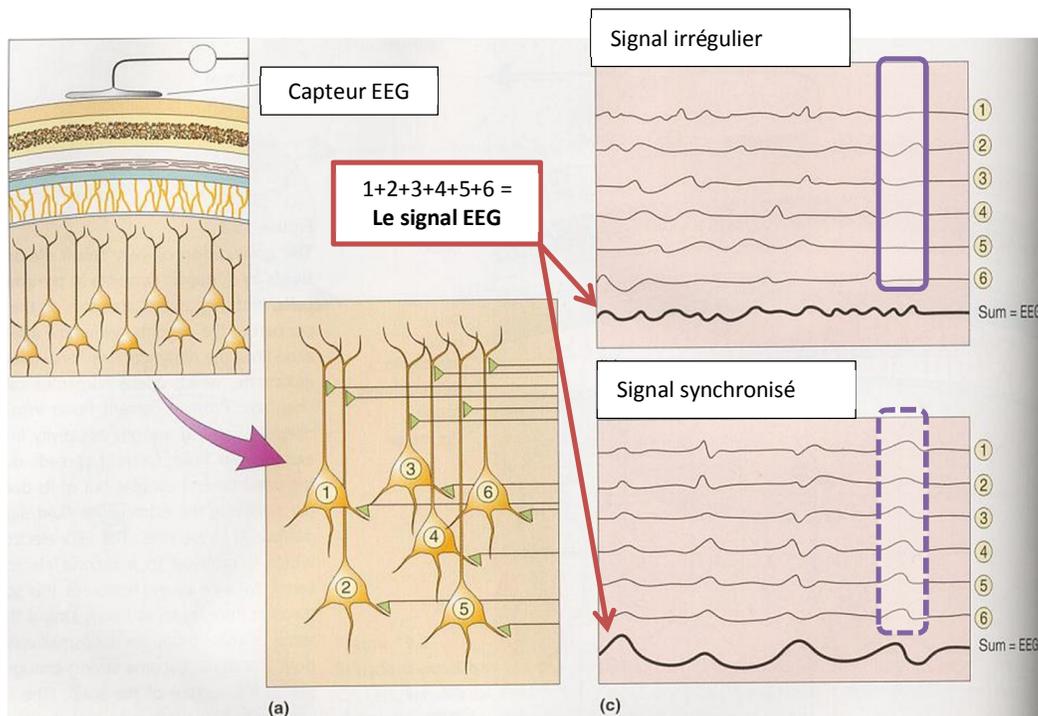


Figure 5.1 – Origines d'un tracé EEG

La figure 5.1 illustre le principe d'acquisition d'un EEG. On s'aperçoit qu'un signal de l'EEG est en fait la **sommation** de toutes les activités des neurones sondés dans cette région. Compte tenu du fait qu'un neurone produit une très faible charge électrique presque indétectable à elle seule, il faut avoir des milliers de neurones activés afin que leur somme soit suffisamment élevée pour être détectable. Ceci dit, on distingue deux **types** de signaux :

1. Irrégulier : chaque neurone est excité sans lien avec les autres (rectangle solide).
2. Synchronisé : les neurones sont excités simultanément (rectangle en pointillé).

Afin d'analyser les données obtenues par ce capteur EEG, celui-ci doit amplifier les signaux électriques émanant de la surface du crâne et les transformer en ondes cérébrales (Hertz, Hz et microvolt, μv) résultant en un signal brut. Il est important de noter que le terme « ondes cérébrales » est un abus de langage. Le terme a pris naissance dans le début du 19^{ème} siècle alors que les enregistrements s'effectuaient sur un morceau de papier. L'encéphalographie requiert l'utilisation d'un point de référence qui en principe est une région « non active en termes électrique » telle que le lobe de l'oreille. Ainsi, le signal EEG enregistré à un endroit précis était soit « positif » ou « négatif » par rapport à la référence choisie selon si celui-ci était irrégulier ou synchronisé. Ces variations de haut en bas étaient enregistrées sur un papier couissant de droite à gauche et ce faisant donnait l'illusion du tracé d'une onde continue. On peut en voir une illustration sur la figure 5.2.

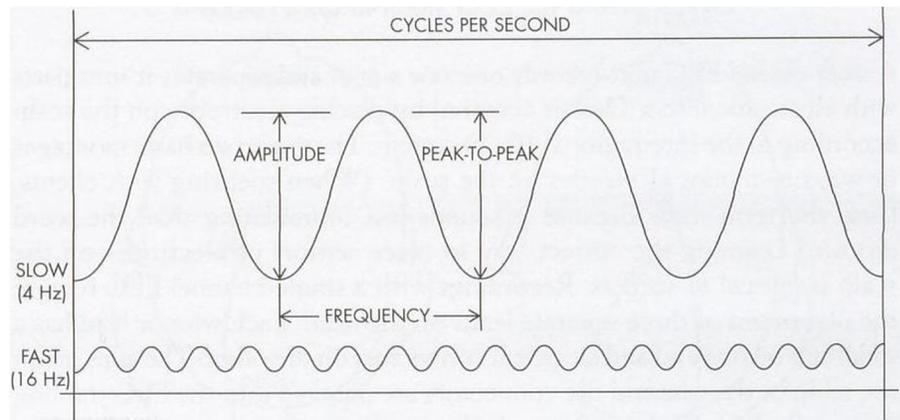


Figure 5.2 – Ondes cérébrales enregistrées pendant une seconde

La correspondance des signaux EEG aux fonctions neurocognitives a déjà été démontrée en 1929 par Hans Berger qui a énoncé qu'il est possible de mettre à l'évidence la présence de processus intellectuels par le biais du EEG [123]. Depuis, la venue de plusieurs méthodes d'imageries médicales ont permis au domaine de fleurir et nous décrivons le lien entre les signaux EEG et les processus cognitifs plus tard dans ce chapitre. La figure 5.3 présente un matériel d'acquisition avec un EEG.



Figure 5.3 – Matériel physiologique utilisé pour enregistrer les ondes cérébrales

Une fois le principe d'enregistrement d'un signal EEG compris, il faut localiser la région cérébrale d'intérêt à mesurer. De fait, le cerveau est organisé en deux régions spécialisées dans un ensemble de traitements. Ces zones sont appelées des hémisphères cérébraux (droite et gauche) et sont à leur tour subdivisées en plusieurs régions (postérieure, latérale, antérieure, supérieure, dorsale, ventrale, inférieure) correspondant à des processus cognitifs distincts [104]. La figure 5.4 présente un résumé simplifié de ces processus. Par exemple, la région postérieure de l'hémisphère gauche voit sa spécialisation dans le traitement de problèmes liés aux mathématiques et à la logique, alors que la région postérieure de l'hémisphère droite traite plutôt les problèmes liés à l'orientation spatiale et à la reconnaissance des visages. Le principe général en neurosciences est de « tout mesurer » et d'analyser par la suite. C'est l'objectif du casque rouge illustré sur la figure 5.3 qui permet d'enregistrer un signal EEG sur plus de 20 régions différentes du cerveau. Ces régions, tracées selon les fonctions cérébrales humaines, suivent une norme appelée 10/20 [124] illustrée sur la partie gauche de la figure 5.4. Elles sont nommées en fonction du nom des hémisphères et chiffrées en fonction de leur localisation. C'est-à-dire que les chiffres pairs sont associés à l'hémisphère droit alors que les chiffres impairs sont associés à l'hémisphère gauche. Par exemple, F3 fait référence à la partie frontale gauche, connue comme étant responsable de l'élocution verbale. C'est évidemment l'encodeur qui permet de déterminer le nombre de régions qu'il est possible d'enregistrer car il convertit tout signal analogique en signal numérique. Un encodeur avec huit entrées disponibles, appelées aussi canaux, ne peut enregistrer que huit régions cérébrales différentes. C'est le cas de l'encodeur de la figure 5.3 que nous utilisons dans nos travaux.

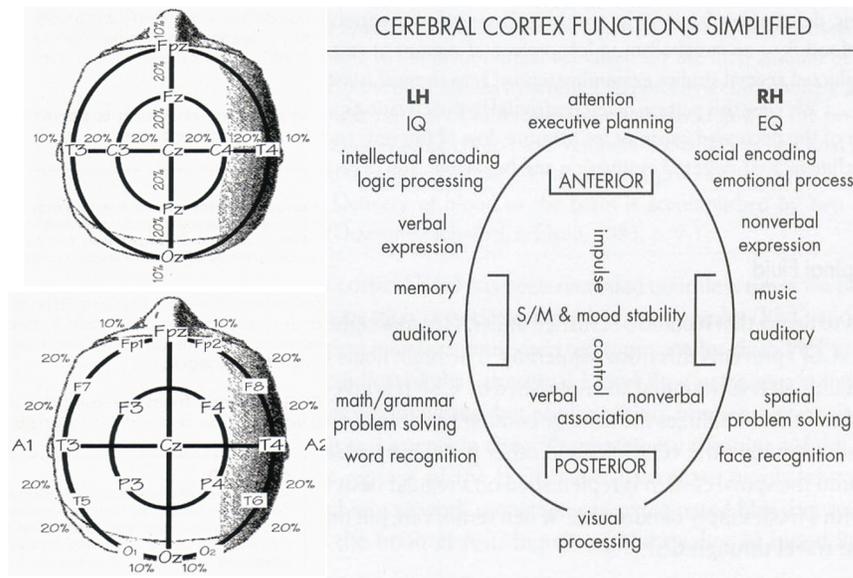


Figure 5.4 – Les fonctions cognitives en fonction des hémisphères

La prochaine étape, suite à la compréhension de l'origine d'un signal EEG et de la localisation de la/les régions d'intérêt à mesurer, consiste à interpréter ces signaux. Il existe deux méthodes d'analyse couramment utilisées pour étudier le comportement du signal EEG au fil du temps : la méthode « Ondes cérébrales » et la méthode « Potentiels évoqués », illustrées sur la figure 5.5.

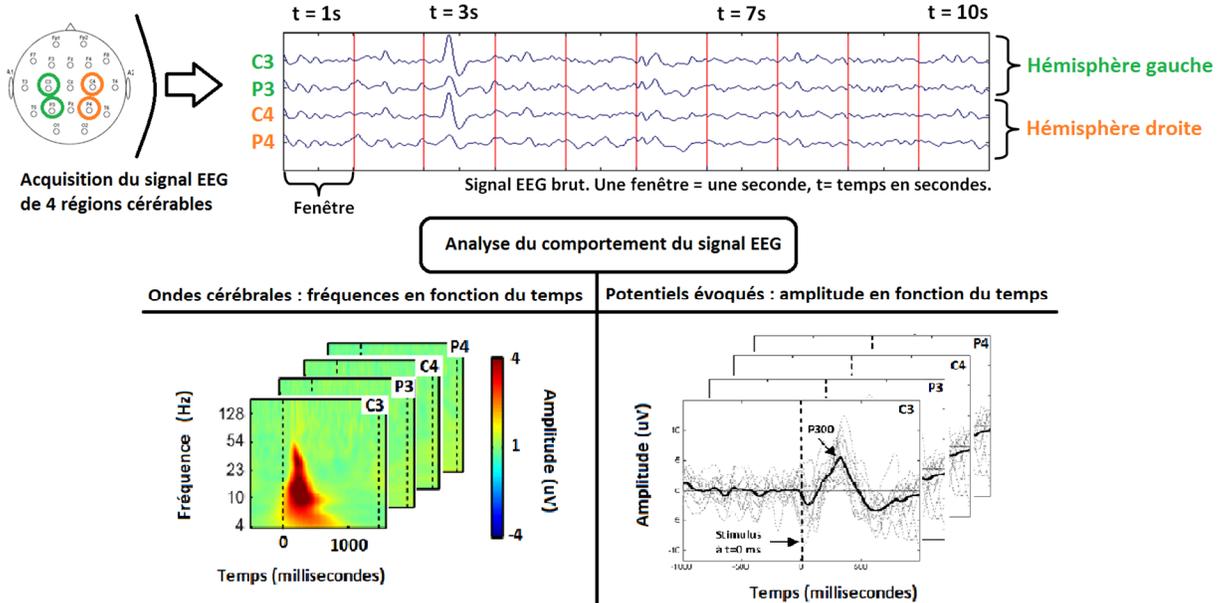


Figure 5.5 – Aperçu des deux méthodes d'analyse EEG sur 10 secondes de données.

La première méthode, « Ondes cérébrales », analyse le signal EEG dans le domaine fréquentiel en étudiant le comportement des fréquences les unes par rapport aux autres pour

chaque région. La seconde méthode, « Potentiels évoqués », analyse le signal EEG dans le domaine temporel en s'intéressant plus particulièrement au comportement moyen de la forme du signal brut suite à une répétition de stimuli communs. Nous décrivons brièvement le fonctionnement de chacune de ces méthodes et présentons ensuite les divers processus cognitifs mesurables avec ces deux méthodes. Nous débutons par la première méthode.

5.1.1. Méthode n° 1 : ondes cérébrales

La première méthode distribue le signal brut enregistré en fréquences par une combinaison de filtres électroniques et logiciels. On se sert notamment de la transformée rapide de Fourier (FFT) pour diviser le signal en plusieurs plages de fréquences. On qualifie une fréquence de basse lorsqu'elle se situe sous la barre des 10 Hz. Une fréquence est quant à elle dite rapide si elle dépasse les 13 Hz. Ainsi, l'activité cérébrale est intimement liée à ces fréquences. En effet, la prédominance de fréquences lentes est un signe que le cerveau est en réflexion ou dans un état d'attente ou de transition vers un événement, contrairement au cas où les fréquences rapides domineraient [104]. Les fréquences obtenues par le filtrage sur le signal EEG ont été regroupées selon les caractéristiques que chacune représentait dans le tableau 5.1. Par exemple, l'intervalle Gamma, allant de 38 à 42 Hz, reflète un traitement cognitif et se manifeste par exemple lors de l'apprentissage. Les fréquences les plus couramment utilisées dans la littérature sont Delta (1 à 4 Hz), Theta (4 à 8 Hz), Alpha (8 à 12 Hz), Beta (13 à 21 Hz), SMR (12 à 15 Hz), Beta Élevé (28 à 32 Hz) et Gamma (38 à 42 Hz) [104].

Tableau 5.1 – Plages de fréquences EEG les plus fréquemment utilisées. Source [104]

Nom	Plage	États mentaux
Delta	1-4 Hz	Sommeil (léger et profond), résolution de problèmes complexes
Theta	4-8 Hz	Créativité, intuition, états profonds de méditation, état d'alerte chez les enfants.
Alpha	8-12 Hz	État d'alerte chez les adultes, relaxation et certains états de méditation
Beta	13-21 Hz	Réflexion, concentration, attention soutenue sur une tâche
SMR (« Sensorimotor Rythm »)	12-15 Hz	État d'alerte mental, relaxation physique
High Beta	28-32 Hz	État d'anxiété, hyper activité, état d'intensité trop élevée (par rapport à la normale)
Gamma	38-42 Hz	Apprentissage, traitement cognitif

Cette méthode a historiquement été utilisée comme outil médical et thérapeutique par les cliniciens pour diagnostiquer et aider à guérir plusieurs désordres cérébraux tel que l'épilepsie, les problèmes de sommeil, les divers type de déficits de l'attention autant chez les adultes que les enfants [104]. Cette méthode d'analyse cérébrale permet de fournir une information relativement précise quant à l'état mental global d'un individu en fonction des régions cérébrales mesurées. L'interprétation du comportement des plages de fréquences cérébrales pour une région donnée se fait soit par rapport à des plages de la même région soit par rapport à des plages situées dans une autre région. Par exemple, dans le domaine médical, la plage de fréquences Alpha (8 à 12Hz) sur les régions C3 et C4, fréquemment présente chez les adultes neurologiquement sains, est généralement associée à un état normal de réveil [104]. On ne peut, en aucun moment, affirmer que tout va bien si on détecte la présence de la plage Alpha sur C3 seulement. Pourquoi ? Simplement parce que la présence de Alpha sur C3 seule ne nous renseigne en rien sur une possible pathologie chez un individu. En effet, un des patrons les plus communs de la dépression est le comportement anormal des plages Alpha sur C3 et C4. Ainsi, on compare pour un patient la différence d'activation de la plage Alpha sur C3 versus l'activation de cette même plage sur C4 lorsqu'il a les yeux fermés. Si on détecte un niveau de Alpha sur C3 supérieur à celui de Alpha sur C4, le diagnostic sera celui d'un patient dépressif car celui-ci souffre d'un déséquilibre chimique cérébral suffisamment important pour être détectable et conséquemment identifié.

Il est donc important de mesurer plusieurs régions en parallèle et comparer le comportement des fréquences les unes par rapport aux autres sur la même région ou comparer les régions entre elles si on souhaite interpréter convenablement un signal EEG à long-terme avec cette méthode.

5.1.2. Méthode n° 2 : potentiels évoqués

La deuxième méthode traite le signal brut dans le domaine spatial, c'est-à-dire en considérant l'amplitude et la latence⁵ du signal brut en fonction du temps, pour mieux comprendre la modification du potentiel électrique produite par le système nerveux dans une région cérébrale en réponse à deux types d'événements : les événements externes tels que la projection d'une image ou d'un son et les événements internes tels que des processus cognitifs, notamment l'attention ou l'activation motrice (bouger un bras, une jambe, etc.). Ainsi, cette méthode ne

⁵ La latence d'un signal représente le temps écoulé entre le début et la fin d'une portion d'intérêt du signal. Sur la figure 5.6 par exemple, la composante P300 a une latence de 500 millisecondes.

divise pas le signal en fréquences, mais synchronise le signal EEG pour une région particulière avec un événement répété à plusieurs reprises. L'activité résultante moyenne de ces répétitions, appelée ERP pour « **E**vent-**R**elated **P**otential », peut ainsi être distinguée d'un signal brut par sa morphologie très particulière dans laquelle on retrouve plusieurs *composantes*. Une composante est un comportement reproductible d'un groupe de neurones suite à un événement déclencheur, généralement associé à une tâche cognitive, donnant lieu à une forme différente de façon statistiquement significative du signal brut. À titre illustratif, prenons la composante la plus reproductible chez les humains : la P300. Cette composante est la plus utilisée dans la conception des interfaces cerveau-machine [125-128] car elle représente la réaction des zones attentionnelles du cerveau à des stimuli qu'il traite et interprète comme étant *pertinents*. De fait, la ligne en gras dans le coin inférieur droit de la figure 5.5 présente une *composante* P300, P pour amplitude positive et 300 pour la latence observée suite à un stimulus. Cette composante nous indique la présence d'une activité cérébrale 300 millisecondes suite au stimulus envoyé au temps $t=0$ secondes. On peut donc apercevoir la composante P300 prendre forme suite à la moyenne de l'ensemble des dix fenêtres enregistrées. On observe que chaque fenêtre est illustrée en pointillés et la composante résultante moyenne en ligne continue. Le temps « négatif » précédent le stimulus est utilisé comme un point de référence pour calculer le degré de significativité de la composante, c'est-à-dire si l'amplitude et la latence de l'ensemble des dix fenêtres diffère de façon statistiquement significative à ce point de référence.

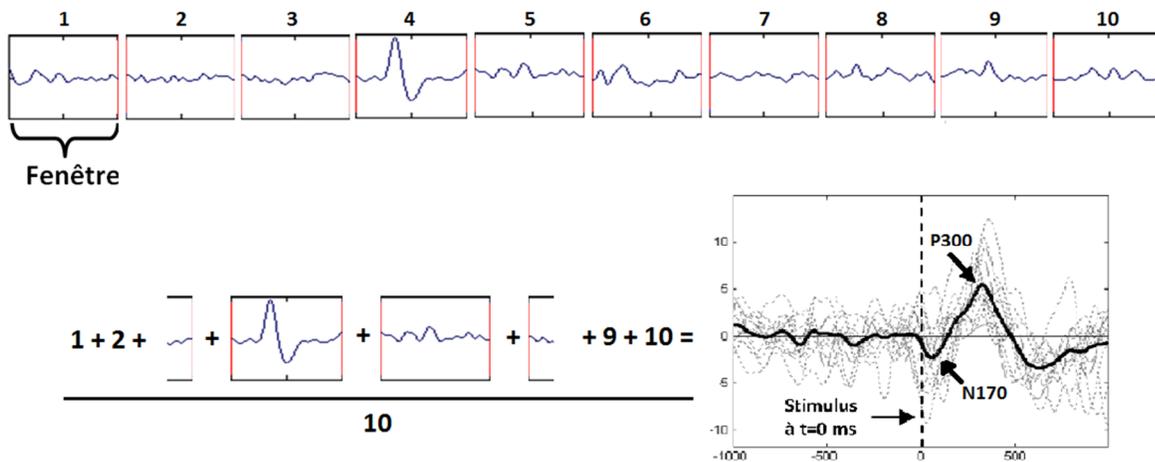


Figure 5.6 - Principe général de la méthode potentiels évoqués. Source [129].

Par contre, il est difficile d'observer une composante immédiatement après la première projection d'un stimulus à cause de la faiblesse du potentiel électrique enregistré dans le cerveau

et de la grande quantité de bruit dans le signal EEG. C'est la raison pour laquelle il est souvent nécessaire de répéter l'enregistrement un certain nombre de fois de façon à faire la moyenne de toutes ces mesures et découvrir cette composante. Cette façon de faire à l'avantage de réduire l'effet des activités indésirables, conservant ainsi la présence des réactions cérébrales pertinentes tout en augmentant le rapport signal sur bruit. Ainsi, chaque composante obtenue est associée à une tâche cognitive particulière et s'y trouve attribuée d'une lettre et d'un chiffre. La lettre P et N représente la polarité de la composant (P pour « Positive » et N pour « Négative ») et le chiffre est fonction de la latence, c'est-à-dire l'amplitude maximale atteinte après un stimulus.

Les chercheurs en sciences cognitives se sont particulièrement intéressés aux composantes à latence longue, telle que les N400 et P300, car elles ont souvent été associées à des processus cognitifs de haut niveau tels que l'attention sélective, l'allocation de ressources mentales, le langage, la détection d'une erreur sémantique, etc. [128, 129]. Cette méthode, en résumé, s'intéresse à étudier des comportements cognitifs spécifiques, à court terme, ou des réactions humaines immédiates suite à des stimuli externes.

5.1.3. Justification du choix de la méthode d'analyse

Nous nous intéressons dans notre recherche à analyser le comportement cérébral à long terme d'un apprenant. Pour cette raison, nous avons choisi d'utiliser la première méthode d'analyse du signal EEG, soit la méthode « ondes cérébrales » car elle est adaptée aux phénomènes cognitifs que nous souhaitons étudier, contrairement à la seconde méthode qui se focalise davantage sur les processus cognitifs de courte durée. Nous décrivons dans la prochaine section un sous-ensemble des fonctions cognitives mesurées par cette méthode pertinentes pour le domaine de l'apprentissage, et plus particulièrement pour le raisonnement humain.

5.1.4. Fonctions cognitives mesurables par la méthode ondes cérébrale

Les recherches neurocognitives par l'analyse de l'EEG ont débuté dans les années 20 suite aux observations de Hans Berger concernant les variations de la plage de fréquences Alpha (8 à 12 Hz) lorsqu'un individu effectuait de l'arithmétique mentale. C'était en quelque sorte le point de départ pour l'analyse des EEG en lien avec les fonctions cognitives et l'effort mental. L'introduction de la transformée de Fourier rapide (FFT) dans le milieu des années 60 a facilité l'analyse des données et a popularisé l'étude des ondes cérébrales dans la recherche psychophysologique. Cependant, les résultats jusqu'à la fin des années 70 étaient fort décevants

et difficilement reproductibles compte tenu de la complexité des méthodes de traitement de signal et du temps de traitement limité par le matériel disponible [130, 131]. Compte tenu de ces difficultés, la majorité des chercheurs se sont dirigés vers l'étude de l'EEG avec la méthode des « Potentiels évoqués » pour mesurer des tâches cognitives très précises et localisées.

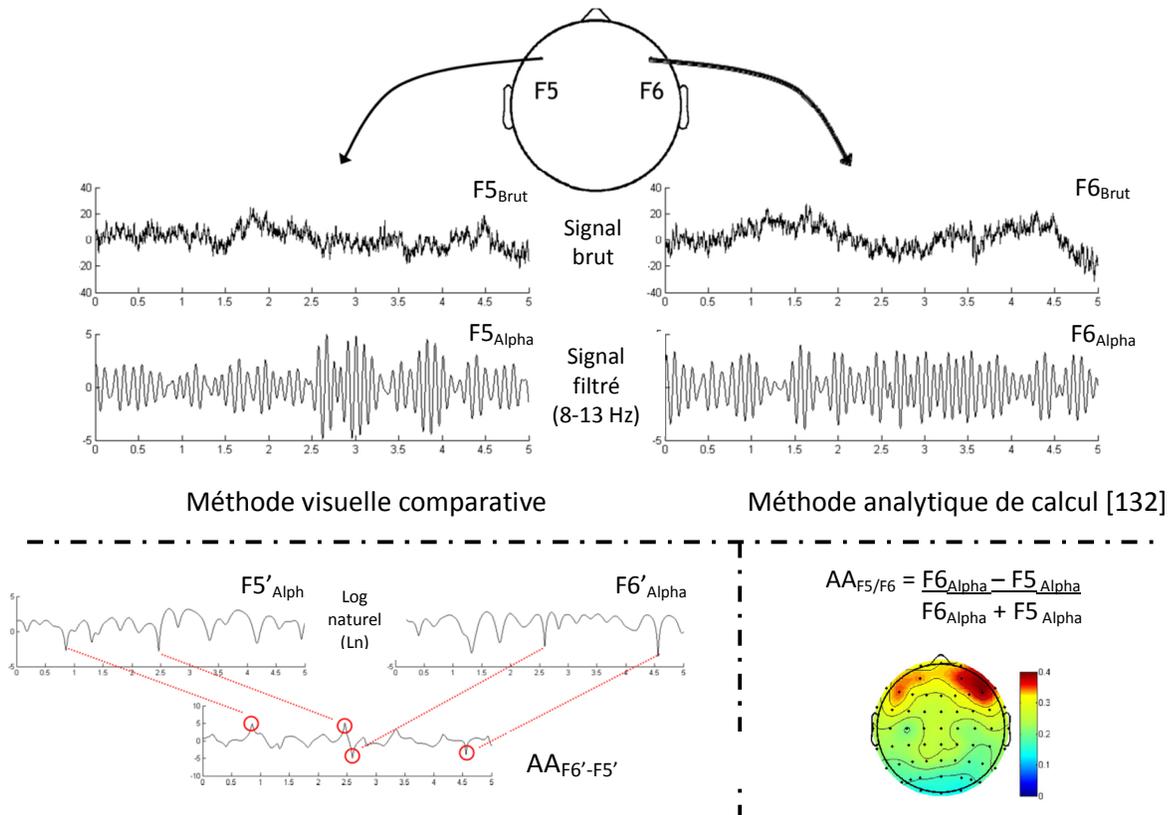


Figure 5.7 – Deux méthodes pour calculer une asymétrie cérébrale

Ce n'est que depuis les années 90 qu'on assiste à un retour en force de la méthode « ondes cérébrales ». Ce retour est principalement dû à deux facteurs technologiques : (1) le nombre croissant des fabricants offrant des produits commerciaux capables d'enregistrer simultanément plusieurs régions cérébrales et (2) le développement d'algorithmes de traitement du signal brut sur de puissantes plateformes intégrées avec les encodeurs vendus et disponibles à un prix beaucoup plus abordable qu'avant. C'est ainsi que la recherche a approfondi de plus en plus l'analyse de l'EEG. Plusieurs chercheurs se sont ainsi intéressés à étudier les différences cérébrales produites pour des tâches cognitives sollicitant un hémisphère cérébral versus l'autre. Ce phénomène se nomme l'asymétrie cérébrale et s'étudie sur plusieurs plages de fréquences [132, 133]. L'étude des manifestations cérébrales par l'asymétrie cérébrale est une technique utilisée depuis plusieurs années permettant de relier la tâche cognitive effectuée à un hémisphère

cérébrale dominant. L'asymétrie cérébrale consiste à produire un ratio qui compare la différence d'amplitude pour une fréquence entre deux hémisphères. Ce procédé est illustré sur la figure 5.7. De façon générale, on filtre le signal brut pour extraire la plage de fréquences d'intérêt et on observe les différences d'amplitudes de cette plage pour chaque hémisphère.

Les deux méthodes sont équivalentes en termes de résultat. Dans les deux cas, on cherche à trouver l'asymétrie Alpha (AA) entre deux régions parallèles F5 et F6 pour une tâche précise, disons ici des exercices où on fait des rotations à des objets de façon mentale avec les yeux fermés (par exemple imaginer un cube effectuant une rotation continue de 90 degrés sur lui-même dans le sens des aiguilles d'une montre). On enregistre le signal brut et on le filtre pour ne conserver que la plage Alpha (8-13 Hz). On peut ensuite utiliser la première méthode et employer le logarithme naturel (Ln) sur les données filtrées pour découvrir les différences de sommets positifs et négatifs en fonction de la difficulté de l'exercice par exemple. Une autre option serait d'utiliser la méthode analytique pour produire un indice d'activation de la tâche en fonction d'un hémisphère. Dans l'exemple de la figure 5.7, on compare l'activité de F5 par rapport à F6, donc l'hémisphère droit par rapport à l'hémisphère gauche. Ainsi, un indice positif signifie une plus grande « participation » ou « implication » de l'hémisphère droit selon la tâche à accomplir. On sait par exemple que ce genre d'indice serait fortement positif pour une activité de rotation mentale dans la région pariétale droite du cerveau [134].

Cependant, la seconde méthode est plus fréquemment utilisée aujourd'hui en raison de sa facilité de calcul et son intégration aux puissantes capacités de calcul des machines personnelles à octuples cœurs. Hyungkuy et al. [135] ont montré la présence d'une forte asymétrie gauche de la plage de fréquences Beta (13 à 21 Hz) dans un contexte de résolution de problèmes arithmétiques complexes versus une asymétrie droite pour la résolution de problèmes arithmétique simples. On peut voir en ces résultats une façon d'évaluer *le type de raisonnement* utilisé, dans ce cas-ci un raisonnement logique par des apprenants dans un contexte de résolution de problème.

D'autres résultats importants pour notre recherche concernent les plages de fréquences plus élevées, notamment les plages Gamma (38 à 42Hz) et la fréquence 40 Hz. En effet, ces deux plages particulières ont souvent été étudiées dans le cadre de tâches cognitives complexes impliquées dans la résolution de problème. Les premiers travaux de Engel et Singer [136] ont soulevé l'importance de la présence de la plage Gamma parallèlement dans diverses régions cérébrales comme étant un indicateur d'une collaboration globale entre diverses régions cérébrales. Cette collaboration entre les différentes régions cérébrales est cruciale pour la

résolution de problèmes complexes tel que démontré par Varela et al. [137]. Ces derniers ont également démontrés que cette collaboration globale, reflétée par la présence de la plage Gamma, est requise pour accomplir une quelconque tâche cognitive complexe. D'autres travaux ont suivi sur ces deux plages (Gamma et 40Hz) menant à établir leur importance dans un contexte de raisonnement intuitif pour la résolution de problème. Dans un premier temps, les travaux de Jung-Beeman et al. [138] et Sandkühler et al. [139] ont démontré que lorsque les personnes résolvent des problèmes en ayant recours à un raisonnement intuitif, les solutions trouvées sont accompagnées d'une augmentation importante de l'activité cérébrale dans l'hémisphère droit dans les plages Gamma et 40Hz. Ainsi, selon les deux auteurs, les mécanismes cérébraux engagés dans la résolution d'un problème diffèrent en fonction du type de raisonnement utilisé (intuitif versus classique). Ces travaux ont ainsi conclus que l'hémisphère droit facilite l'intégration de plusieurs parties d'informations requises pour résoudre le problème en renforçant les liens sémantiques entre ces parties, permettant ainsi à la personne de « voir » la solution au problème.

Ce sont les travaux mesurant la faisabilité de mesurer différents types de raisonnement qui nous intéressent plus particulièrement. Nous décrivons maintenant la problématique que nous voulons résoudre dans cette seconde étude en se servant de l'analyse de l'EEG.

5.2. Problématique

Dans cette deuxième partie de la thèse, nous cherchons toujours à améliorer le raisonnement humain par l'inconscient cognitif, mais contrairement à la première partie, on vise à améliorer l'induction de la connaissance par l'amorçage cognitif et mesurer cela par EEG. Nous cherchons à mesurer par l'EEG *comment* les apprenants raisonnent, soit par logique ou par intuition, pour construire un espace de problème sans se faire offrir les réponses.

Dans cette seconde étude, nous nous focalisons sur le raisonnement inductif humain dans un contexte de résolution de problème. On entend par induction la faculté humaine à construire un schéma mental représentant la solution au problème qu'on demande à un apprenant de résoudre sans lui fournir d'indices supplémentaires ou la réponse au problème. Dans un tel cadre, nous cherchons à améliorer le raisonnement et conséquemment l'induction de la connaissance par l'inconscient cognitif en utilisant une version modifiée de notre méthode par amorçage cognitif. Nous posons l'hypothèse de recherche suivante : l'amorçage cognitif permet d'améliorer *l'induction* de la connaissance.

5.3. Méthode

Nous avons décidé d'utiliser la même leçon enseignée dans notre deuxième étude, mais de modifier la façon dont l'enseignement des règles est effectué. Nous rappelons que la leçon enseignée est la construction d'un carré magique impair de quelconque dimension. Nous avons donc utilisé le même principe de transparents et de règles visuelles tel qu'expliqué dans le chapitre 2, mais avec quatre changements importants : le déroulement général de l'expérience, le type d'amorçage utilisé, l'environnement virtuel et les capteurs biométriques utilisés.

5.3.1. Déroulement général de l'expérience

Dans cette étude, nous avons décidé de ne présenter aucune solution aux trois règles que les apprenants devaient trouver par eux-mêmes. Ainsi, contrairement à notre première étude, les solutions aux trois règles doivent être induites par les apprenants en visionnant chaque règle. On s'attend donc à une superposition de schémas mentaux représentant chaque règle ainsi que la combinaison des règles dans la mémoire visuelle de chaque apprenant. Les questions pour chaque règle seront posées à la fin du visionnement des trois règles. Nous avons également ajouté un quatrième bloc de questions oui/non représentant un carré magique partiel que l'apprenant doit indiquer comme étant valide ou non. Le seul moment où l'apprenant a accès à une sorte de validation survient après la réponse à une question.

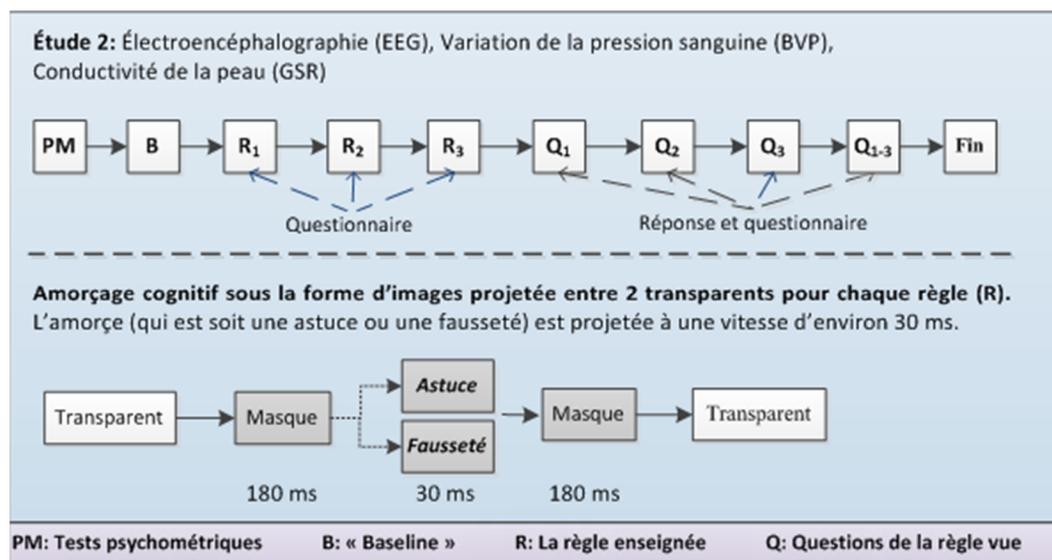


Figure 5.8 - Déroulement de la deuxième étude

Avant de débiter l'expérience, nous avons mené une série de tests psychométriques, notamment le test multiple d'intelligence du Dr. Gardner [140] et deux tests médicaux standardisés pour la reconnaissance de forme et pour l'identification de patrons dans l'espace. Deux périodes de repos, l'une les yeux ouverts et l'autre les yeux fermés, précèdent le début de l'étude. Naturellement, une série de question de nature qualitative pour évaluer notre système ainsi que les amorces utilisées closent cette étude. Ce déroulement est illustré sur la figure 5.8.

À la fin de chaque règle, on demande à l'apprenant de nous indiquer *comment* il pense avoir compris la règle. Les choix sont : par intuition, par logique, un peu des deux, principalement par intuition, principalement par logique. À la fin de chaque question répondue, on demande également à l'apprenant de nous indiquer *comment* il a répondu à la question. Les choix sont : par hasard, par intuition, par déduction logique, principalement par intuition ou principalement par déduction logique.

Dans cette étude, nous avons également décidé de demander aux apprenants de compléter la leçon le plus rapidement possible mais en faisant le moins d'erreurs possible. Dans notre protocole expérimental, chaque participant reçoit 10\$ à titre de compensation pour avoir pris le temps de faire l'étude. Par contre, nous avons également indiqué aux apprenants que les cinq meilleures performances en termes de nombre d'erreurs en fonction du temps total recevraient une compensation supplémentaire de 20\$. Ce phénomène de « performance maximale » joue un rôle important dans la volonté de l'apprenant de bien faire, mais plus particulièrement dans l'effet observé de l'amorçage cognitif dans la littérature. Nous avons également obtenu dans un précédent travail [30] des résultats montrant une manifestation cérébrale différente lorsqu'un apprenant tentait de comprendre un document à l'écran sous pression versus sans pression. Les apprenants pouvaient donc répéter plusieurs fois une même leçon mais ne pouvaient plus y retourner une fois passés à la prochaine. Pour ce qui est des questions, un temps limite est imposé variant en fonction de la difficulté de chaque règle. Cette limite passe de 45 secondes pour les questions des trois règles à une minute et trente secondes pour les questions oui/non concernant l'ensemble des trois règles. Les questions posées à la fin de l'étude servent à déterminer si les participants ont aperçu les amorces cognitives et à évaluer le système utilisé.

5.3.2. Amorçage cognitif enrichi

Les fondements de l'amorçage cognitif utilisé dans cette étude demeurent les mêmes que ceux présenté dans le premier paragraphe de la section 2.5.1 à la page 51. Nous avons par contre

enrichi la méthode d’amorçage en ajoutant une amorce que nous appelons *Erreur* (ou « miscue » en anglais) conçue pour désinformer, ou tromper, le raisonnement d’un individu. En guide de comparaison, nous rappelons que nous avons utilisé uniquement des amorces *Réponse* dans notre première étude. Une comparaison entre ces deux amorces est illustrée sur la figure 5.9. La justification derrière l’utilisation de deux amorces opposées est double.

Premièrement, nous voulions être certains que c’est bel et bien l’amorçage *Réponse*, donc la réponse à une règle, qui pouvait être tenu responsable, en grande partie, de l’amélioration du raisonnement de l’apprenant.

Deuxièmement, nous voulions étudier la validité pour nos travaux d’un phénomène contre-intuitif en neurosciences soulevé par les travaux de DeVaul et al. [50] en lien avec ce type d’amorce. Les auteurs semblent indiquer que les amorces *Erreur* pouvaient avoir un effet bénéfique sur la mémoire et éventuellement sur l’apprentissage. Dans leurs cas, les auteurs traitent de la mémorisation d’un nom à un visage.

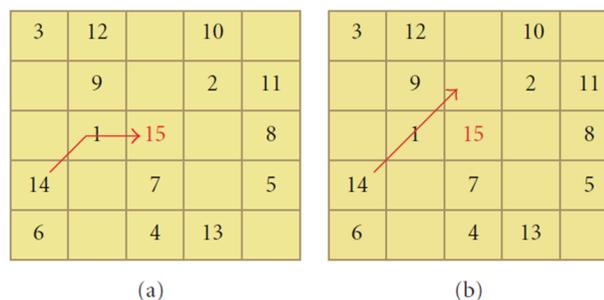


Figure 5.9 – Amorçage cognitif d’une astuce *Réponse* en (a) versus une amorce *Erreur* en (b)

Ainsi, nous allons répartir nos apprenants de façon aléatoire en trois groupes dans cette étude. Un premier groupe de contrôle ne recevra aucune amorce pour toute la durée de l’étude. Un second groupe, nommé « Answer » dans l’étude, reçoit des amorces *Réponse* et le troisième groupe, nommé « Miscue » dans l’étude, reçoit des amorces *Erreur*.

5.3.3. Le système utilisé

Nous avons décidé pour cette étude d’utiliser un système en deux dimensions (2D) relativement simple, très semblable à un environnement classique d’apprentissage tel qu’illustré sur la figure 5.10. Les principales raisons pour avoir utilisé un environnement en 2D sont la sensibilité de l’enregistrement d’un signal EEG et le nombre limités de régions mesurées.

En effet, nous avons expliqué précédemment que le signal EEG se doit d’être amplifié et conséquemment se trouve sensible au bruit et aux multiples stimuli qui entourent l’apprenant.

Un des objectifs fondamentaux de cette étude étant d'étudier les manifestations cérébrales ayant lieu lors du raisonnement, un environnement minimaliste est le meilleur moyen pour éviter de brouter le signal par des données superflues. Par données superflues, on entend l'amalgame de manifestations visuelles et motrices associées à un environnement virtuel en 3D riche de couleurs, formes et rotations (les rotations dans l'espace de la caméra pour suivre le mouvement de l'avatar lorsqu'on tourne un coin par exemple). De plus, le phénomène de présence dans un environnement virtuel peut également produire des données EEG superflues dû à l'activation de plusieurs régions cérébrales simultanément. Ceci pourrait couvrir les manifestations recherchées par les processus associées au raisonnement. Ceci dit, après avoir identifié et isolé les manifestations et patrons associés au raisonnement recherché dans cet environnement, nous pourrions facilement localiser et identifier ces patrons dans un système plus riche visuellement.

La deuxième raison pour avoir eu recours à un système en 2D concerne le nombre de régions cérébrales enregistrées. En effet, dans le domaine de l'analyse EEG, plus on enregistre de régions cérébrales, plus on obtient une précision élevée du comportement cérébral associé à la tâche que l'on désire mesurer. Le résultat de l'ensemble de nos régions se nomme une carte topographique du cerveau. Compte tenu des limitations de notre matériel, nous ne pouvons enregistrer que quatre régions cérébrales, deux du côté gauche du cerveau et deux du côté droit, ce qui est une autre raison derrière le besoin de simplifier l'environnement utilisé.

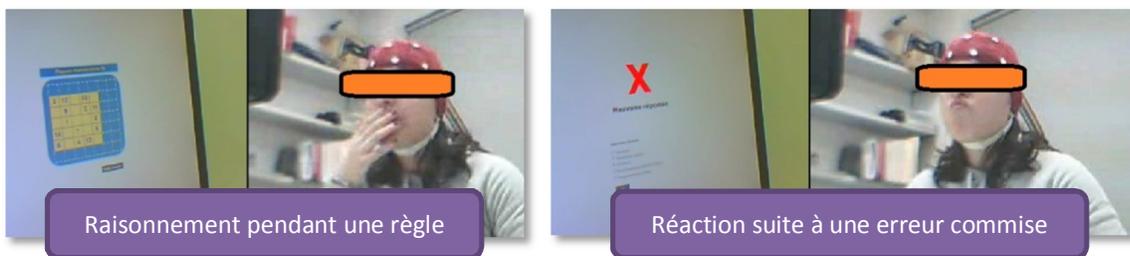


Figure 5.10 - Saisie d'écran du système utilisé et réaction de l'apprenante suite à une erreur commise

Le système fournit également des indicateurs visuels pour les erreurs et bonnes réponses en forme d'un X rouge et un crochet vert respectivement. On peut d'ailleurs apercevoir sur la partie droite de la figure 5.10 la réaction de déception d'une apprenante lorsqu'elle se rend compte qu'elle a commis une erreur. Une fois le système testé et les vitesses ajustées à plusieurs résolutions tests que nous avons effectués, notre étude était prête. Place maintenant aux capteurs utilisés.

5.3.4. Les capteurs utilisés

Les six capteurs cérébraux et deux capteurs physiologiques utilisés au cours de cette étude sont les suivants : six capteurs EEG (un capteur par région plus deux capteurs pour les deux oreilles afin d'équilibrer le signal obtenu tel que suggéré par Luck [129]), le GSR (sudation de la peau) et le BVP (rythme cardiaque). La figure 2.9 présente ce matériel. Nous avons également utilisé deux caméras vidéo, l'une pour enregistrer ce qui se passe à l'écran et l'autre pour enregistrer les réactions faciales des apprenants. Le fait d'enregistrer les réactions faciales des apprenants est essentiel au traitement hors ligne du signal EEG (nettoyage, élimination de certains segments trop bruités, etc.).

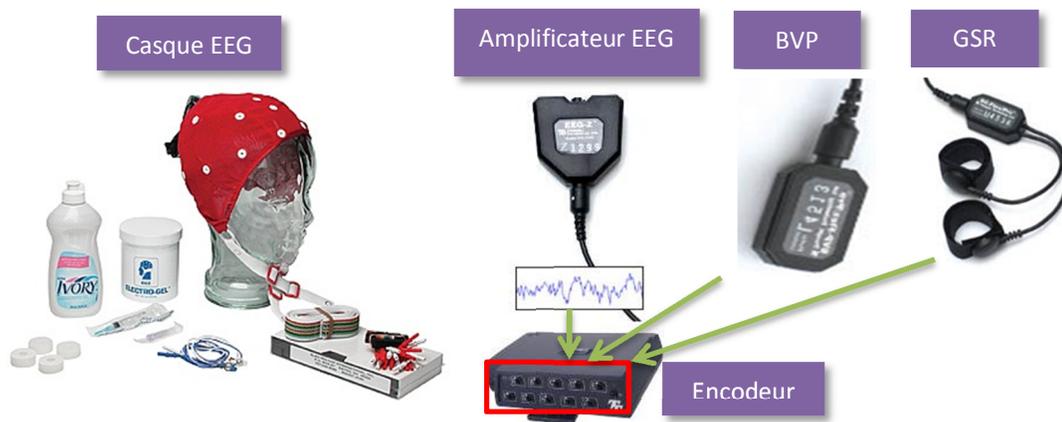


Figure 5.11 – Matériel physiologique utilisé pour enregistrer les émotions. De gauche à droite : le casque EEG et équipement requis, les amplificateurs EEG (un par région), un capteur BVP, un capteur GSR et l'encodeur.

Cependant, quelques précisions sont de mises pour l'enregistrement EEG. Nous avons enregistré deux périodes de repos de deux minutes, l'une les yeux fermés et l'autre les yeux ouverts. Les régions enregistrées sont C3, C4, P3 et P4 et sont référencées à Cz tel que défini par le système international 10-20 [124]. Les quatre régions, deux pour chaque hémisphère, ont été choisies en fonction des processus cognitifs que l'on désire mesurer. Plus précisément, l'hémisphère gauche pour mesurer le niveau de raisonnement logique utilisé et les manifestations émotionnelles, et l'hémisphère droite pour le niveau de raisonnement intuitif utilisé et l'effort mental déployé pour les processus impliquant des opérations mentales de rotations et de translations dans l'espace [104]. Les deux autres capteurs, placés respectivement sur l'oreille gauche et l'oreille droite, permettent d'équilibrer le signal à *posteriori* en appliquant une formule d'harmonisation précisée par Luke [129]. En résumé, cette formule permet de *recentrer* les quatre

régions cérébrales mesurées par rapport à la moyenne du signal des capteurs situés aux oreilles. Par la suite, nous utilisons des filtres passe-bandes pour isoler six plages de fréquences pertinentes pour cette étude : Theta (4 à 8 Hz), Alpha (8 à 12 Hz), Beta1 (12 à 32 Hz), Beta2 (28 à 32 Hz), Gamma (38 à 42 Hz) et la plage du 40Hz. Les mouvements oculaires et les clignements des yeux sont éliminés par l'utilisation d'un filtre passe-bande entre 0,1 et 3,5 Hz.

Ces huit signaux sont enregistrés tout au long de l'étude et encodés par le boîtier de la compagnie Thought Technology [111]. Les données sont d'abord enregistrées dans un logiciel propriétaire et ensuite exportées dans un format compatible pour Matlab 64 bits pour le traitement statistique hors ligne.

5.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer l'importance de la dimension cérébrale pour mesurer les tâches cognitives, particulièrement le raisonnement, lors d'une session d'apprentissage. Dans ce contexte, nous avons expliqué les principes de détection des tâches cognitives par la biométrie. Dans ce cadre, nous poursuivons notre investigation des mécanismes inconscients impliqués dans l'apprentissage en présentant une méthode d'amorçage cognitive enrichie pour améliorer l'induction de la connaissance. Nous proposons de démontrer le bienfondé de notre méthode d'amorçage enrichie au travers de l'article de revue présenté dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 6

(Revue n° 2) Amorçage cognitif pour le raisonnement: nouvelle technique pour améliorer l'enseignement

Sommaire

6.1. ABSTRACT	112
6.2. INTRODUCTION.....	112
6.3. RELATED WORK	115
6.4. SUBLIMINAL PRIMING IN HCI	117
6.5. BACKGROUND ON EEG AND AFFECTIVE DATA	119
6.5.1. BACKGROUND ON EEG.....	119
6.5.2. BACKGROUND ON AFFECTIVE DATA	122
6.6. EXPERIMENT	123
6.6.1. METHODOLOGY.....	124
6.6.2. CUE CONSTRUCTION.....	126
6.6.3. PHYSIOLOGICAL RECORDINGS	126
6.7. RESULTS AND DISCUSSION	127
6.7.1. PRE-TEST RESULTS	127
6.7.2. DESCRIPTIVE ANALYSIS.....	128
6.7.3. AFFECTIVE DATA ANALYSIS	133
6.7.4. EEG DATA ANALYSIS	135
6.8. CONCLUSION AND FUTURE WORK	136
6.9. ACKNOWLEDGEMENTS	137

Article de revue

SUBLIMINAL CUES WHILE TEACHING : HCI TECHNIQUE FOR ENHANCED LEARNING

Auteurs :

Pierre Chalfoun et Claude Frasson

Référence :

Chalfoun, P., Frasson, C. Subliminal cues while teaching: HCI technique for enhanced learning. *Advances in Human Computer Interaction : Special Issue on Subliminal Communication in Human-Computer Interaction*. vol. 2011, Article ID 968753, 15 pages, pp. 21-25.

6.1. Abstract

This paper presents results from an empirical study conducted with a subliminal teaching technique aimed at enhancing learner's performance in Intelligent Systems through the use of physiological sensors. This technique uses carefully designed subliminal cues (positive) and miscues (negative) and projects them under the learner's perceptual visual threshold. A positive cue, called answer cue, is a hint aiming to enhance the learner's inductive reasoning abilities and projected in a way to help him/her figure out the solution faster but more importantly better. A negative cue, called miscue, is also used and aims at obviously at the opposite (distract the learner or lead him to the wrong conclusion). We replicated previous findings by using the same subliminal teaching technique but in a different environment. The environment went from a very engaging and fun 3D serious game setup to a more stringent and simple 2D exam environment mirroring what one might find in an online test. The latest obtained results showed that only subliminal cues, not miscues, could significantly increase learner performance and intuition in a logic-based problem solving task. Non-intrusive physiological sensors (EEG for recording brainwaves, heart rate and skin response to record skin conductivity) were used to record affective and cerebral responses throughout the experiment. The descriptive analysis, combined with the physiological data, provides compelling evidence for the positive impact of answer cues on learning and intuitive decision making in a logic-based problem solving paradigm.

6.2. Introduction

The use of technology to build Intelligent User Interfaces (IUI) has revolutionized the way computers interact with human beings. Examples of these IUI's can be found in virtually every aspect of our lives, such as mobile media sharing [141, 142], intelligent vehicular assistance [143] and mental spelling machines [125]. One growing area of research within the HCI community recently has been focusing towards the design of smart interfaces for learning. Indeed, a smart interface should be able, in a learning context, to detect the user's emotional and cognitive states in order to adjust and adapt the teaching material accordingly. Such adaptive systems relying on efficient IUIs are known as Intelligent Tutoring Systems and are comprised of multiple goal-specific modules to aid the learner. One of these modules, called the tutor, makes use of cognitive pedagogical strategies and affective states to properly model human cognition according to the

learner's constant needs and evolution. The tutor takes advantage of recent development in IUI to efficiently communicate with the learner. This multidisciplinary field of research tries to accomplish this daunting goal of user-modeling and adaptation by implementing the most recent evolutions and advances in various research areas such as artificial intelligence, neuroscience and cognitive science. One of those recent advances this past decade has been the shift in emphasis for cognitive science from learner's *performance* to learner's *experience* during learning. Indeed, affective states, motivation and knowledge construction have been extensively measured and explored [25, 30, 144, 145] and have shown that emotions are an important component in skill acquisition and play a pivotal role in learning. Indeed, researches in neurosciences and cognitive psychology have shown that emotions are widely related to diverse cognitive processes, such as attention, problem solving and decision-making [16, 82]. Emotions influence our behavior and play an important role in our every-day decision making processes [146]. Cognitive activity is also fundamentally related to emotions [147]. Cognitive process such as problem solving and decision making not only depend but are greatly intertwined with the individual's emotional state [148]. Moreover, emotions are essential actors for creative thinking, inspiration as well as concentration and motivation [82, 149]. It then becomes vital for a HCI system to *detect and recognize* these emotional and cognitive states, via physiological sensors or otherwise, and relay them to the pertinent ITS modules. Hence, learning systems would be able to intelligently adapt their communication and interaction with learners through adaptive HCI systems.

Nevertheless, a major component of learning and decision making when solving problems has been mostly neglected in this research field: human unconscious cognition. Indeed, the cognitive unconscious is a major player in the integration and *interpretation* of complex material with regards to decision making and possibly learning. To that end, a large body of work in neuroscience and other fields has put forth compelling evidence that learning simple to complex information can be done without perception or complete awareness to the task at hand [55, 108, 109, 150]. The idea that any information projected too fast to be consciously perceived by a learner (called subliminal projection) has been the focus of much research in neuroscience and cognitive psychology. A variety of IUIs have been designed for such a purpose, ranging from simple two dimensional interfaces (2D) to complex 3D immersive ones [50, 79, 151-153]. Furthermore, the recording of the neural electrical activity, called EEG activity, present in the brain during the occurrence of these mental processes is also an active research area in HCI. Indeed, an IUI that detects brain activity can recognize and quantify the user's engagement level

in specific activities [154]. However, in the HCI community, EEG activity is mainly used to construct brain computer interfaces mainly aimed at character spelling or item recognition [125-128, 150].

Unfortunately, very scarce research in the HCI community has employed affect, subliminal priming and EEG for educational purposes. Indeed, the existence of perceptual learning without perception has not only been proven, but replicated in one study we did two years ago [151]. In this study, we presented a novel subliminal priming technique built into an adaptive IUI aimed at boosting performance by enhancing the learner's deductive reasoning capabilities. Our findings concur with the literature: subliminal stimulus, which is stimuli projected below the threshold of conscious perception, can enhance learning and increase the deductive reasoning of learners only if carefully and intelligently constructed before being integrated into a IUI. However, this initial study suffered from a major limitation: the exclusive use of *positive* subliminal priming (cues designed to help learning, not hinder or interfere with it). Thus, we did not know what effect might negative cues, or miscues, have on learning and performance when integrated into our IUI system.

In the present paper, we intend to follow-up on our recent study by designing an evolved version of our adaptive IUI with our novel subliminal learning technique aimed at enhancing learner's inductive learning capabilities. This new IUI implemented in our Tutoring System will marry positive and negative primes as well as affective sensors in the stringent 2D environment resembling online tests. Affective sensors will serve as important indicator of the learner's emotional and cerebral state when faced with the decision of correctly answering a question. When facing a question, a learner can either (A) guess the answer or (B) correctly infer the solution (since this is an exam and the solution is not presented to him). We believe that IUIs would be able to detect both outcomes (A and B) by recording and analyzing emotional and cerebral data. We also believe, based on the extensive literature to that effect, that subliminal priming should influence both outcomes. We thus intend to investigate the relevance of augmenting our IUI with cerebral sensors and using our subliminal teaching technique by stating two HCI-research questions. First, does integrating different subliminal cuing *types* (positive, control and miscue) into this newly designed IUI enhance or hamper learner's inductive reasoning capabilities and performance? Second, what significant physiological impacts can this newly designed interface with our subliminal teaching technique have on learner's performance during question answering as well as on the entire learning process?

The organization of this paper is as follows: in the first section, we present previous work related to various aspects of our research. The second section will discuss priming in HCI, more specifically from an educational standpoint. The third section will lay the bases of physiological recordings and importance to education and learning in general. The fourth section describes the experiment setup and depicts the various aspects related to subliminal cues and miscues. The fifth section presents the obtained results which are discussed in section six leading to the last section where we conclude and present future work.

6.3. Related work

The present work employs subliminal priming, affect and EEG to investigate the possible contribution of priming to enhance learning, and more specifically inductive reasoning. To the best of our knowledge, there are only two similar papers in the ITS/AIED(Artificial intelligence in education)/HCI community that employ subliminal priming and EEG in an educational context [155, 156]. The first is our own work where we presented cerebral evidence, namely a P300 component (see background on EEG and affective data below), to confirm that both cues *and* miscues were interpreted in the brain, but with slightly different levels and amplitudes. The second however greatly differs from ours in two ways: (1) the priming used is of a personal and not of a cognitive nature (self-words were projected on the screen instead of cognitive cues and miscues) and (2) the authors' main objective was to use priming to enhance learner's self-esteem first and foremost. Thus, any observed performance increase could be considered as a probable *side-effect* of the higher level of self-esteem reported. In the present work, cues and miscues were constructed *precisely* to enhance performance by augmenting learner's inductive reasoning abilities. However, we will briefly describe in this section the work done in other related fields that have been the driving force behind the inspirations and motivations for this work.

An existing dissociation between performance and consciousness has been known to neurologists for over 100 years with a disorder called *blindsight*. Patients in this condition are unable to identify anything presented in one side of their visual field even though their eyes (retinas) are perfectly healthy. Nevertheless, Poppel showed that patients with *blindsight* can unconsciously identify and process simple visual information presented to their 'blind' side [58]. Furthermore, DeGardner demonstrated that blindsight patients can recognize and identify complex visual stimuli (emotional faces) when such stimuli is presented subliminally [46]. These results, and many others, have been reproduced successfully on healthy patients and have contributed to

clarify, and more importantly, to justify the anatomical separation that exists between conscious and unconscious cognition [157]. Unfortunately, no work in the HCI community, besides ours [119, 151], has attempted to use affective and cerebral data in order to assess the impact of subliminal cues and miscues on learner's performance, deductive and inductive reasoning as well as decision making in a problem solving context. However, a handful of papers in various fields have claimed the use of subliminal priming as a support for memory in the HCI community.

One of the early works regarding the implementation of subliminal cues for task-supported operation within a software was the text editor program of Wallace [79]. In this experiment, Wallace and colleagues investigated the response of subjects when requiring help from a text editor. They found that the frequency at which subjects demanded help was much lower when the required information was presented in subliminal matter. Another very important finding is the fact that all previous studies did not have the intended results because the projected stimulus did not take into account the specifications of the computer such as screen resolution and refresh rate. The Memory Glasses by DeVaul and colleagues [50] used wearable glasses that projects subliminal cues as a strategy for just-in time memory support. The objective was to investigate the effect of various subliminal cues (correct and misleading) on retention in a word-face learning paradigm and compare recall performance. Another use of priming for memory support can be found in the thesis of Shutte [80] where the author assessed the effects of brief subliminal primes on memory retention during an interference task. The thesis examined in detail multiple parameters of subliminal projections such as duration, relevance and contract. Although the results of these priming seemed very encouraging, the author cautions HCI designers that misusing subliminal priming that can lead to critical disruptions of ongoing tasks. Further work from Mitchell and colleagues [117] have hypothesized that recognition performance in a standard item-based forgetting paradigm may be altered by subliminal cues. These authors believe that these cues can automatically activate different mnemonic strategies thus enhancing memory retention and recall. The results have shown that item-based words primed with the word "remember" seem to be better retained than "forgot" by a very slim difference however. Besides seeming to impact memory, subliminal priming can also have an emotional consequence on learners. Very recent work from [152] put forward an interesting effect that subliminal priming can have on the self-attribution of authorship of events. Subjects were asked to compete against a computer in removing non-words such as "gewxs" from a computer screen in the fastest time possible. After a determined amount of time, the computer would remove the word. Subliminal

primes of self-associated words like “I” and “me” before an action increased the personal feeling that it was the participant that eliminated the non-word and not the computer, thus increasing the feeling of self-authorship of events.

Furthermore, monitoring the emotional reactions of the learner using physiological sensors in a learning environment using IUI is quite explored as well. Indeed, the Empathic Companion is a good example where multiple physiological sensors, namely galvanic skin response, heart rate and respiration were taken in real-time to analyze and adapt the tutor to the emotional reactions of the learner in a virtual 3D ITS [96]. Bosma and André [158] have merged two techniques in order to resolve ambiguities in dialogue acts. They used a Bayesian network approach to determine an emotional state and a finite state machine method to study the meaning of dialogue acts according to physiological data. Further research has analyzed a more detailed and relevant emotional significance of physiological signals, either in complex learning or gaming [20, 94, 97, 159]. There is unfortunately very scarce work to our knowledge in the HCI field where EEG and emotional data is used to enhance or adapt learning according to user’s demands besides two notable exceptions: (1) Stevens and colleagues employed a light-weight EEG monitoring system to evaluate changes in cognitive workload, engagement and distraction as students acquire problem solving skills [160] and (2) Chaouachi and colleagues have started to investigate the important link that may exist between affect and mental workload as measured by a well-known EEG mental engagement index [154].

The current study is presented through a newly designed IUI aimed at enhancing learner’s inductive reasoning. The new IUI is interplay between subliminal priming, EEG and affective data. Thus, a primer on subliminal priming in HCI will first be presented, followed by a background survey of EEG and affective data since these sensors play an important, and active, part in our study.

6.4. Subliminal priming in HCI

As mentioned before, this research focuses on subliminal stimulus to enhance learning in a tutoring system. Before going further, we need to clearly establish the terminology that will be used in this paper. Indeed, the simple mention of the word subliminal can lead to confusion. We first state that a learner is consciously perceiving a stimulus if he or she is fully aware and able to identify the given stimulus. In the example of a computer screen saver where one would see a flying white box over a black computer screen, the fact of identifying the white box is sufficient to

state that the learner consciously perceives it. However, if we project very quickly, 10 ms for example, the letter “A” in Times New Roman 10 points in light gray in the bottom left corner of the screen, then we can state that he has consciously perceived the box but not the letter. This is due to the neurological properties of conscious perception: the existence of a threshold for conscious access [108]. It is precisely this threshold that we accept as being the line between conscious and subconscious perception (that some can call unconscious as well). The technique used to project a given stimulus *below* this threshold of awareness is called subliminal priming as opposed to a paroliminal priming where the stimulus can be consciously perceived *above* the threshold.

Moreover, subliminal stimuli must therefore be presented for a very short time and can vary in intensity, duration, frequency and shape. It has however been established that subliminal stimuli can bias behavior and even yield better results than no subliminal stimuli under specific experimental conditions [52, 152]. Indeed, simply sending subliminal messages without caring for context nor desired goals and emotions can prove to be inefficient or simply useless [80, 109]. The cognitive process that takes place when the stimulus (vocal or visual) is either unattended or subliminally projected is a stage that we call subliminal processing. Contrary to popular belief, high-level semantic processing has been observed during this stage [161]. One interesting example is an early study by [115] where subjects were given unattended stimulus in the form of words and were capable of discriminating between their alternative meanings. Another fascinating experiment placed forward the long-term effect of subliminal priming on the visual system [52]. In this experiment, subjects learned a task without actually realizing it. Participants were asked to focus their attention on random letters appearing on a computer screen while at the same time imperceptible moving dots in different directions were appearing just outside of their visual field. After a month’s training, the participants subconsciously learned to recognize and better identify the dots movements even if their attention was concentrated on the letters appearing in their visual field on the screen.

Furthermore, the impact of subliminal stimuli on behavior has been proven to be reliable only if the stimuli is goal-relevant and people are motivated (either intrinsically or otherwise) to pursue the goal [109, 162]. Indeed, a few stunning examples of such impact on behavior is presented by Karremans and colleagues [114] where they argue that for such subliminal primes to be processed (say verbal), the prime have to consist of one or two short words and not of whole sentences. The

notion of goal-relevance as well as proper cue construction is thus crucial for the success of the hoped effect.

The most relevant work however regarding our research has been done by Lowery and colleagues who demonstrated that subliminal primes can increase performance on midterm exams compared to neutral primes and that subliminal priming may have long-term effects on real-world behavior [163]. Thus, we believe possible, with carefully designed subliminal stimuli, to enhance learning without conscious perception by the learner. We also believe that this new form of learning can trigger a set of positive emotional conditions in the learner, such as motivation and engagement. In turn, these positive emotions can enhance learning, inductive problem solving and possibly decision making. To that end, we designed our cues to be projected at strategic spatial positions on the screen by following the directions given in a theoretical taxonomy that differentiates between conscious, preconscious and subliminal processing proposed by Dehane and colleagues [157]. This taxonomy is based on the global neural workspace hypothesis [48] that distinguishes prime accessibility in the brain based on stimulus strength and top-down attention. Furthermore, this taxonomy has been quite recently empirically validated by Van den Buss [164].

6.5. Background on EEG and affective data

This section will present background information on the importance of measuring physiological data both in terms of EEG in the brain as affective data in terms of valence and arousal, two important emotional dimensions used in this research.

6.5.1. Background on EEG

It has been known, as early as 1929, that the on-going electrical firing activity of groups of neurons can be monitored with probes, referred to as electrodes, placed on the scalp, outside the brain [123]. The recording of such small activity (in micro-volts, 10^{-6} volts) is called **ElectroEncephaloGraphy** or EEG and is typically done with a polygraph displaying the continuous changes in voltage over time. There are roughly two main paradigms when working with EEG raw data (see figure 6.1).

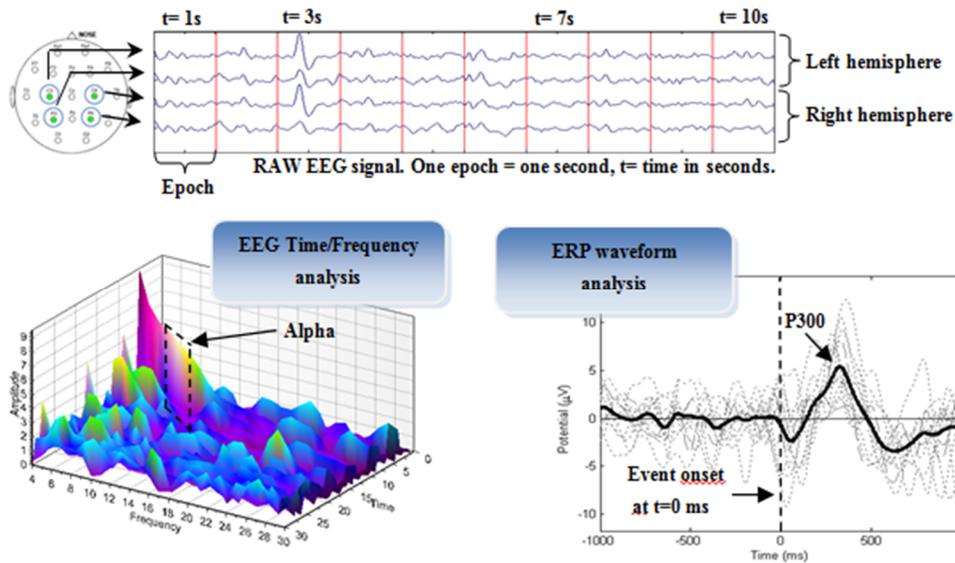


Figure 6.1 – Snapshot of a 10 sec EEG raw data analyzed using two main paradigms.

The first paradigm, time/frequency analysis (typically using a fast Fourier transformation or FFT), is an overall look at specific frequencies over a period of time. This technique is mainly used to clinically help diagnose multiple disorders such as epilepsy, sleep disturbances and attention disorders by employing neuro-feedback protocols [104]. This type of analysis gives relatively fair information about the overall mental state of an individual based on *brain locations* being surveyed. For example, alpha waves, or bands, are 8 to 12 Hz relatively large amplitude EEG waves that are usually associated with a relaxed but awake state [104]. However, alpha asymmetry patterns between left hemisphere (LH) and right hemisphere (RH) recordings while *adult* subjects are closing their eyes (called eyes-closed) are common patterns in depression (C3 LH alpha > C4 RH alpha). Thus, specific mental changes can be assessed by comparing recordings from multiple scalp sites using a 3D spectrogram such as the one depicted in Fig. 1. Although no consensus is presently available regarding band distribution, the following ranges are the most commonly agreed upon by therapists: Delta (1-4 Hz), Theta (4-8 Hz), Alpha (8-12 Hz), Beta (12-32 Hz) and Gamma (38-42 Hz) [104].

Indeed, in an educational setting, attention and semantic memory performance can both be ascertained from variation of Alpha and Theta bands [104, 165]. Changes in the Alpha band has also been known to correlate to arithmetic strategy used in addition and subtraction which is very close to what we are trying to improve in our study [166]. Regarding decision making, Alpha, Beta and Delta have been shown to be valuable markers for the balance between reward and punishment [167]. Indeed, slow Delta and Theta waves have been linked to subcortical brain

regions involved in affective processes [168, 169], whereas fast Beta activity has been associated with cognitive control processes [170]. Also, specific bands, such as the Gamma and 40Hz bands, have been quite extensively studied when it comes to insightful problem solving [138, 139]. Another exploration made in the 80's was the exploration of asymmetries between brain regions regarding specific cognitive functions [132, 133]. These findings yielded some interesting metrics, called ratios, to measure and express mental operations. Thus, recent work in asymmetry analysis relevant to our research has revealed higher Beta asymmetries from the left brain during complex arithmetic processes compared to simple computations [135]. This area of research can potentially be quite invaluable in assessing whether the learner is engaged in far too much mental arithmetic than required for a specific lesson.

The second paradigm however, called ERP waveform analysis, takes advantage of neurological properties of the raw EEG signal to gain better insight into the cognitive processing mechanisms in the brain. It does so by *synchronizing* (also called locking) the recording of the raw EEG to an *event*. By event we mean an action such as viewing a picture from the internet or displaying emotional versus non emotional words on a computer screen (e.g., love, murder versus chair, table). The resulting EEG activity is called an 'Event-Related Potential' (ERP) which can be easily distinguished from the raw EEG (top part of Fig. 1) by its consistent morphological shape (e.g., the P300 bold line of Fig. 1 appearing approximately 300 ms following an event). While the raw EEG is made up of all brain activity at a particular point in time, specifically left and right hemisphere in this example, the ERP is only *part* of that raw activity associated with the processing of a specific event. ERPs are defined by their amplitude and latency (the time taken to attain peak amplitude). To visualize ERPs, one must use signal processing techniques to eliminate non-event activity by using specific band-pass filters and averaging multiple epochs together [129]. The averaging process tends to decrease the influence of random activity (e.g., the gray dotted lines in Fig. 1) while maintaining the consistent event-related activity (e.g., the solid line in Fig. 1). By convention ERP researchers separate ERP waveforms into several basic parts called *components* [129]. Cognitive scientists have been most interested in the long-latency ERP components which include the N400 and P300 components. The letters P and N represent the polarity of the component and the numbers represent their latency after stimulus onset (e.g., the P300 is a *positive component* peaking at 300 ms). In general, components occurring after 250 milliseconds, namely the P300 component, are thought to reflect higher-order cognitive processes (e.g., selective attention, resource allocation, language) [128, 129].

In the light of what has just been presented, it is important to mention that one of the main goals of our research in general, and not just this presented work, is to endow an IUI with the capability to *recognize* a specific mental activity related to the learner's status and inform the ITS who would react accordingly. For example, suppose a learner is trying too hard to focus on complex mathematical operations when he should be looking at the "whole picture". An interface not equipped with EEG sensors would have to rely on imperfect data, such as previous response time to questions; current time spent on lessons; or worse, disturbs the learner to establish a self-report for a proper diagnostic. This can easily hinder the learning session, especially if the intervention is based on "approximate" and incomplete data. In the case of an EEG-evolved IUI, the problem is far less complicated because Beta asymmetries from the left brain would immediately tell and inform the ITS of the present mental state of the learner. A strong dominant presence of Gamma and 40Hz activity for example during a learning session is strongly indicative of intuitive decision making and learning. Relying on EEG as well as standard data will hopefully enable us, in future work, to directly classify the mental state of the learner in a precise manner and thus adapt learning accordingly.

6.5.2. Background on affective data

The literature regarding the ITS and HCI commonly denotes the use of the following physiological signals: skin temperature (ST), respiration (RESP), mainly heart rate(HR) and blood volume pressure, (BVP) for cardiovascular activity, galvanic skin response (GSR) and surface electromyography (SEMG). ST changes when the body undergoes a stress response. In an unconscious process, blood then flows away from the extremities such as hands resulting in a decrease in ST, thus colder hands [104]. RESP is accepted as being an automatic response that increases when provoked by physical exercise or by the expression of thoughts resulting in an emotional reaction, namely fear and sadness [105]. Respiration amplitude and frequency can be important indicators for the presence of anxiety [106]. GSR is a measure reflecting the electrical resistance of the skin. A high GSR signal is often correlated with a high stress level [107]. GSR has a direct link with arousal [101] and is often used to reflect emotional reactions as well as cognitive activities [104]. These sensors are known to reliably measure specific emotional activations and are widely used for emotional detection. Indeed, as emotions can be characterized in terms of judged valence (pleasant or unpleasant) and arousal (calm or aroused), collected physiological signals are analyzed according to the arousal/dominance emotional space. GSR increases linearly

with a person's level of arousal, while HR has been shown to correlate with valence [101] with regards to signal variations in both HR and GSR (figure 6.2). Thus, learner's affective state is determined by normalizing HR and GSR variations with regards to the baseline. For example, a very high positive HR signal and a very high positive GSR signal will be considered as excited. Normalization is done by mean-shifting (subtracting current values from the baseline and dividing the difference with the standard deviation). For readability purposes, we will refer to the mean-shifted normalized values simply as mean HR and mean GSR from now on.

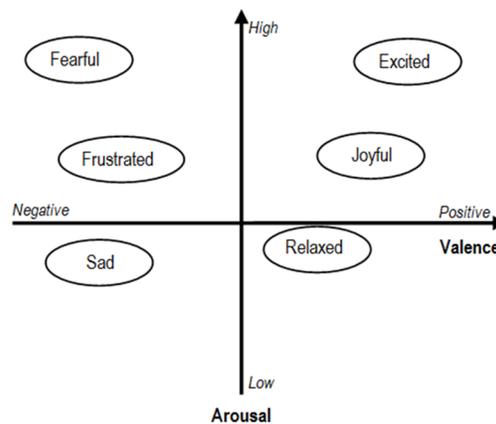


Figure 6.2 – Two dimensional affective (arousal/valence) space.

6.6. Experiment

The current experiment is designed to build on previous results obtained with the use of a novel learning technique employing subliminal stimuli in a way which accelerated the deductive reasoning of learners during a learning session [151]. This experiment teaches the same lesson, learning how to construct a magic square in 3 simple tricks without the use of neither complex mathematical operations nor calculator, but within a very different environment and context. First, we are using a 2D system that looks very similar to an online exam session. The idea is to minimize learner's distractions as much as possible compared to the previous 3D serious game environment cited above. Second, the solution to the three tricks was not presented here. The learners had to infer their own solutions and correctly figure out the algorithm used in each trick. Third, the context also differs for we ask learners this time to make the fewest amounts of mistakes possible whilst taking the shortest amount of time. In our original study, learners could roam around the 3D world freely and were not subject to any time constraints. The focus of this study remains the same: visually teach the construction of an odd magic square of any order with

the use of neither a calculator nor one mental arithmetic operation. To construct a magic square, one must successively apply three simple tricks (see [151] for more details).

6.6.1. Methodology

The experiment consists of five steps depicted in figure 6.3. The experiment went as follows: in **step 1**, a series of neuropsychological tests were administered, namely a spatial and pattern recognition memory tests (SRM and PRM respectively).

Learners proceeded to **step 2** where the three previously mentioned tricks were taught. We decided to show the learners multiple examples of each trick without explaining how the trick works. It was up to them to *deduce* the solution, thus the inter-workings of each trick. Learners reported how they figured each trick by choosing between the following: I deduced the trick by intuition, logic, a little of both, mainly by intuition or mainly by logic. It was clearly explained that answering 'by intuition' should mean 'after *thinking* about the available choices, a decision, judgement, or solution seemed correct in the absence of supporting evidence' [171].

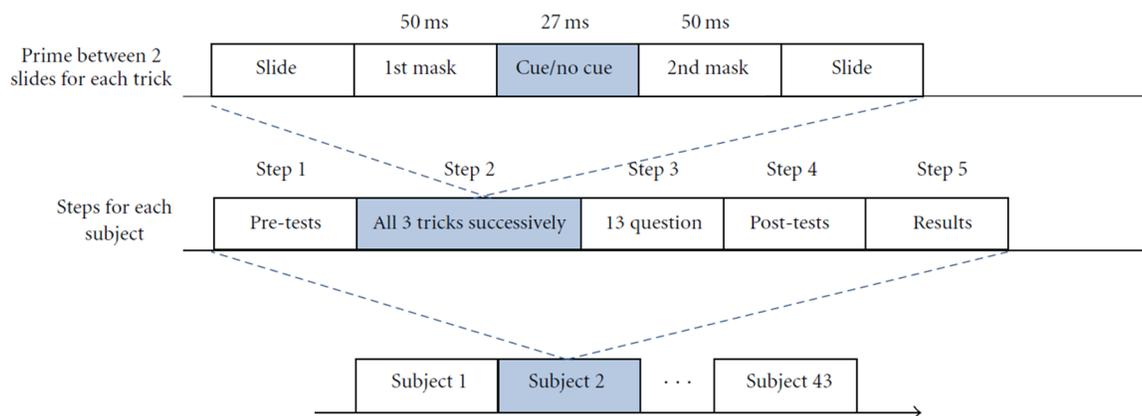


Figure 6.3 – Experiment design in 5 steps shown above along examples of subliminal cue/miscue.

When all the three tricks were deduced, learners were instructed, in **step 3**, to respond to a series of 13 questions. No solution is given to the learners at any time while learning the tricks. The first series of 10 questions, Q1 to Q10 tested their knowledge of each learned trick. Questions 1 to 3 were directly related to the first trick, questions 4 to 7 to the second trick and questions 8 to 10 to the last trick. The last 3 questions however tested their knowledge of all three tricks. Indeed, a partial magic square is presented and learners have to combine all three tricks to answer properly, by a yes or no, if the presented square is correct or not. A fixed time limit of 45 seconds for the questions was imposed. Failing to give an answer within the allowed time was considered a mistake. Learners reported how they answered each question by choosing between

the following: I answered the question by guessing the answer, by intuition, by logical deduction, mainly by intuition or mainly by logical deduction. After giving their answer, a green check or a red cross appears for 2 seconds indicating to the learner if they made a correct or wrong choice respectively.

After answering all the questions, a series of post-tests were administered in **step 4** to test for prime awareness and overall system evaluation, including difficulty levels and intrusiveness of the physiological equipment used (based on a likert scale from 1 to 6 where 1=not intrusive at all and 6=very intrusive).

Lastly, **step 5** displayed the current obtained results as well as information regarding time and performance.

Learners were organized into three distinct groups. A first group (Control group) getting no subliminal cues at any time during the experiment. They did, however, get primes both masks just so EEG data would not be biased. Another group (Answer group) will get primed with the answers for the tricks (step 2 in figure 6.3) by the tutor (e.g., the primed cue for the multiple choice questions will be ‘flashed’ over the square corresponding to the correct answer). The tutor will project subliminal misleading cues for the tricks and the questions for the last group (Miscue group). The subliminal stimulus and thresholds were carefully chosen following the neural bases of subliminal priming [108]. Each stimulus was preceded by a 50 ms pre-mask of random geometrical figures, a 33.33 ms prime (2 frames of a 60Hz SVGA screen) and a 50 post-mask of random geometrical figures. Prime and mask speeds were designed following methodologies previous reported [153, 162].

Table 6.1 - Participants' distribution.

	Men	Women	Total
Control group	7	8	15
Answer group	6	8	14
Miscue group	6	8	14
Total	19	24	43

Each learner was compensated with 10\$ for their participation. We also added an extra monetary incentive by informing learners that an additional 20\$ will be handed out to the top 5 learners who committed the fewer amount of mistakes while taking the fastest time to complete the lesson. This incentive idea is inspired from recent studies showing that subliminal instrumental conditioning can take place in the human brain if proper conditions are met [109,

162]. We are hoping that subliminal cues (associated with positive answers) along with the monetary incentive will provide sufficiently strong conditions for the creation of an ‘unconscious association’ between the stimuli and possibly the decision to choose the correct answer. The teaching material is separated into parts, or PowerPoint-like slides, and displayed at a slow rate to give every learner an equal chance at fully reading each “slide”.

A total of 43 healthy volunteers, 19 men and 24 women, took part of the experiment. The sample’s mean age was 27 (SD = 3.51). A repartition of the learners can be found in table 6.1.

6.6.2. Cue construction

In this experiment, cues are constructed to help guide the visual attention of the learner towards the constructions of the solution used. For example, trick number one requires one to place the next number one slot above and two slots to the right. One possible answer would be to prime the arrow seen in the left part of figure 6.4. This priming is spatially aware, that is located at the place where we believe users will be looking and trying to figure out the answer. Thus, for the letter 10, the answer cue will be projected in a way that the base of the arrow starts from the letter 9 and not anywhere else. Miscue cues are created to distract learners and to possibly point them in the wrong direction. In this case for example, the red arrow is pointing toward a completely false cell. The answer cues and miscues have therefore been tailored for each slide to specifically reproduce the described behaviour.

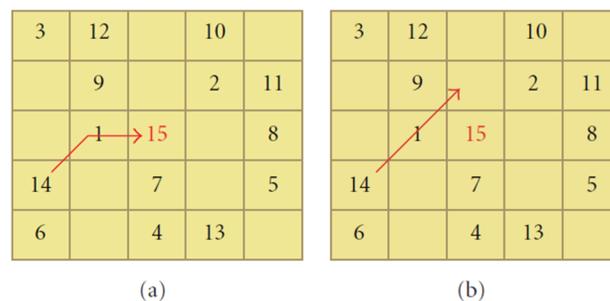


Figure 6.4 – a. Positive cue (answer) versus b. Negative cue (miscue)

6.6.3. Physiological recordings

Physiological recordings, namely EEG, Heart rate (HR) and Galvanic skin response (GSR) and two webcams (mainly used for signal cleaning and noise reduction) were used throughout the experiment. An EEG base line of two minutes with eyes opened and eyes closed preceded all monitored activities. The EEG data was recorded from six active sites using an elastic cap at

locations C3, C4, P3 and P4 as defined by the international 10-20 system [124] and referenced to Cz (figure 6.5). The last two active sites are A1 and A2 and are more typically known respectively as the left and right ear (referential linked ears montage). All recordings were achieved at a sampling rate of 256 Hz (4ms precision, reliability of reporting up to 64Hz). To extract all the EEG band passes described earlier, all EEG signals were filtered using a band-pass Butterworth filter, therefore isolating theta (4.5-7.5), alpha (8-12 Hz), beta (13-30 Hz) and the 40Hz band. Matlab running under a 64bit operating system was then used to compute and normalize the data. Most eye blinks and eye movement artifacts occur dominantly between 0,1 and 4Hz band and thus were eliminated by a proper band-pass filter as well.

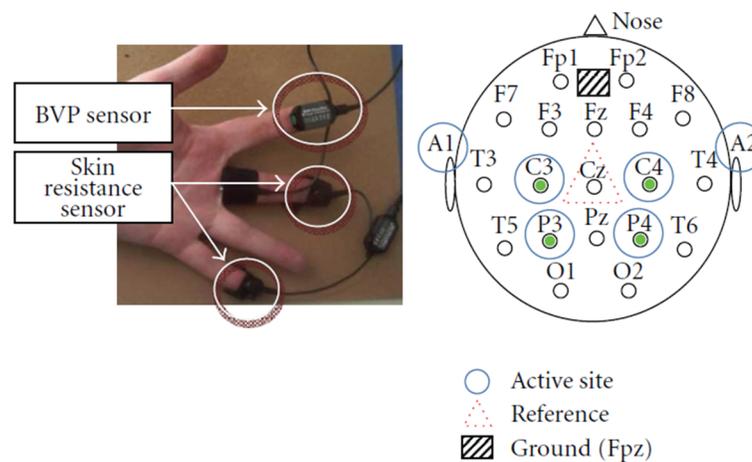


Figure 6.5 – Montage of physiological recording setup.

6.7. Results and discussion

We want to investigate in this paper the possible impact of positive subliminal prime on learning and whether this impact can be observed in physiological recordings. Our findings will be presented in the following sub-sections.

6.7.1. Pre-test results

Before going into further details and explain our findings, we thought it necessary to check if significant differences were observed between groups of learners with regards to pre-test and post-test assessments (table 6.2). Thus, no significant differences between groups of learners were found regarding the SRM and PRM pre-test results (expressed in speed of response and percentage of correctness). These tests are important because they could have introduced an imbalance between learners thus creating a bias for the upcoming results. Also, the results of the

speed test both in terms of response time and accuracy were not significantly different between groups. Furthermore, assessing lesson difficulty and question difficulty are two important factors when determining a learner's success rate. Once more, no significant difference was found between the three groups. Another post-test that could have had an impact on results and motivation is the lesson likability factor. Again, no significant results were found between users. Finally, we wanted to test whether the sensors were intrusive or not and disturbed the learners while learning. The likert scales used for most of these tests was from 1 to 6, 1 being "not at all" and 6 being "a lot". The intrusiveness test for example asked whether the EEG headset hindered the learning process or disturbed them in any way (from 1 to 6). Results show that neither the EEG sensors nor affective sensors disturbance was in any way significant across groups. These initial results tend to show that the positive impact observed on learning seems is not biased by subjective factors such as reported likability or experienced difficulty.

Table 6.2 - No significant difference found between participants' pre and post-tests results

Analysis of variance (ANOVA) between groups	Sum of Squares	Mean Square	F	p-value, alpha = 0.05
Spatial Recognition Memory (SRM) pre-test result	138.870	69.435	.192	.826
Pattern Recognition Memory (PRM) pre-test result	1512.797	756.398	3.110	.066
Speed pre-test response time result	.322	.161	1.310	.281
Speed pre-test accuracy result	1603.128	801.564	.848	.436
EEG post-test intrusiveness result *	1.291	.646	.481	.622
Physiological sensors post-test intrusiveness result *	2.789	1.395	1.216	.307
Lesson likability post-test result *	7.580	3.790	2.228	.121
Question difficulty post-test result *	8.966	4.483	2.956	.063
Lesson difficulty post-test result *	2.466	1.233	.421	.659

* : based on a likert scale from 1 to 6

6.7.2. Descriptive analysis

The first research question we wanted to investigate was the overall performance of the subliminal group versus the other two (control and miscue). We ran a cross-tabulation analysis and found a significant interaction effect between group and overall mistakes (group * mistake, $p < 0,001$, $\alpha = 0,05$). Table 6.3 shows the distribution of the data. Each answer given is computed and presented here. Furthermore, the table is grouped by all type of responses. We did not distinguish between guessed answers or not.

Table 6.3 – Learner’s distribution

Group			Learners	Mistake		Total answers given
				No	Yes	
Control	Sexe	Female	8	68 (65%)	36	104
		Male	7	36 (40%)	55	91
Answer	Sexe	Female	8	79 (76%)	25	104
		Male	6	59 (76%)	19	78
Miscue	Sexe	Female	8	61 (59%)	43	104
		Male	6	43 (55%)	35	78

Note: Results in parentheses represent the success rate on 100% as in an exam.

Pushing the analysis further, we found a significant interaction with answer type, mistake and trick answer: that is how did the learner actually comprehend the lesson versus how they responded to the question and the number of mistakes made (answer type * mistake * trick answer) with a $p < 0,001$, $\alpha = 0,05$ when learners have understood the trick by “Logic”, $p < 0,05$ for learning the trick by “Intuition” and $p < 0,05$ when learners learned the tricks by using a mix of both logic and intuition. The results are presented in table 6.4.

Table 6.4 – Mistake * Question answer type * Trick answer type Crosstabulation

Trick answer type			Question answer type					Total
			Logical deduction	Intuition	Random / Guess	Mainly by logical deduction	Mainly by intuition	
Logic	Mistake	No	88	10	5	9	2	114 (71%)
		Yes	16	10	10	6	4	46
Intuition	Mistake	No	6	1	4	1		12 (43%)
		Yes	3	10	3	0		16
A little of both	Mistake	No	41	15	15	12	3	86 (56%)
		Yes	16	21	15	8	8	68

Results in parentheses represent the success rate on 100% as in an exam.

However, we wanted to investigate if cue type could indeed be responsible or have an impact on learning performance. We found a significant interaction effect between question answer type, mistake and group (Question answer type * mistake * group). This interaction however is only significant for the control group ($p < 0,05$, $\alpha = 0,05$) and answer only ($p < 0,001$, $\alpha = 0,05$). These results, shown in table 6.5, seem to indicate that miscues could actually result in an almost dispersal effect of performance (sometimes high results and sometimes low but nothing statistically significant) whereas the positive cues seem to converge and positive increase

performance for almost all type of question answer type when compared to the control group. One notable exception is the “Mainly by intuition”, even if results are very close nevertheless.

Table 6.5 – Mistake * Question answer type * Group Cross-tabulation results

Group			Question answer type					Total
			<i>Logical deduction</i>	<i>Intuition</i>	<i>Random/ Guess</i>	<i>Mainly by logical deduction</i>	<i>Mainly by intuition</i>	
Control	Mistake	No	52 (65%)	14 (35%)	19 (45%)	14 (61%)	5 (50%)	104 (53%)
		Yes	28	26	23	9	5	91
Answer	Mistake	No	91 (85%)	15 (58%)	4 (57%)	24 (73%)	4 (44%)	138 (76%)
		Yes	16	11	3	9	5	44
Miscue	Mistake	No	44 (71%)	23 (49%)	15 (50%)	15 (54%)	7 (47%)	104 (57%)
		Yes	18	24	15	13	8	78

Results in parentheses represent the success rate on 100% as in an exam.

These results seem to indicate that positive primes seem to enhance learning in several important areas, but pushing the analysis further and running a four way cross-tabulation analysis presented in table 6.6, results show that there is indeed a significant effect of Trick answer type, Question answer type, group and mistake (Mistake * Question answer type * Group * Trick answer type) but only for the following combinations of Trick answer and Group:

- Logic * Control ($p=0.018$, $\alpha=0,05$)
- Logic * Answer ($p=0.002$, $\alpha=0,05$)
- A little of both * answer ($p=0.048$, $\alpha=0,05$)

Table 6.6 – Results of the 4 way crosstabulation analysis (Mistake * Question answer type * Group * Trick answer type)

Trick answer type	Group			Question answer type					Total
				Logical deduction	Intuition	Random / Guess	Mainly by logical deduction	Mainly by intuition	
Logic	Control	Mistake	No	20	3	2	5	1	31 (58%)
			Yes	5	5	7	3	2	22
	Answer	Mistake	No	54	3	0	3	1	61 (81%)
			Yes	7	2	2	1	2	14
	Miscue	Mistake	No	14	4	3	1		22 (69%)
			Yes	4	3	1	2		10
A little of both	Control	Mistake	No	18	5	8	2	1	34 (57%)
			Yes	7	9	7	1	2	26
	Answer	Mistake	No	17	4	2	6	1	30 (67%)
			Yes	4	7	1	1	2	15
	Miscue	Mistake	No	6	6	5	4	1	22 (45%)
			Yes	5	5	7	6	4	27

The results seem to indicate that positive subliminal cues do seem to strongly influence logical decision making when learning a trick logically. It was expected though to have the best results in this category. After all, the experiment was a logical learning paradigm with pattern recognition. It was not a drawing contest. We are however surprise to find that positive subliminal cues alone seem to cause almost a 10% increase in performance when learners use a little of intuition in deducing and answering questions.

Another important aspect to investigate in our study was the performance with regards to response time. We gave specific instructions to the learners to try to make the fewest mistakes in the shortest possible time. We ran an analysis of mean with variance (ANOVA) across subjects by taking into consideration the following variables in table 6.7.

Table 6.7 – Performance Report

Variables used/Group		Success Ratio	Total mistakes	Total Qst RT	Total Trick Time	Mistakes Trick 1 ^a	Mistakes Trick 2 ^b	Mistakes Trick 3 ^c	Mistakes all 3 Tricks ^d
Control	Mean	7.26	6.07	175.27	150.02	1.07	1.73	1.93	1.33
	Sum	108.90	91.00	2629.06	2250.29	16.00	26.00	29.00	20.00
	Std. Dev.	2.35	2.37	50.29	34.27	.887	1.45	.961	.617
Answer	Mean	4.41	3.14	194.11	161.25	.714	.643	1.00	.786
	Sum	61.74	44.00	2717.53	2257.50	10.00	9.00	14.00	11.00
	Std. Dev.	2.37	2.14	41.34	42.49	.611	1.01	.877	.802
Miscue	Mean	7.09	5.57	216.07	156.47	1.21	1.57	1.50	1.286
	Sum	99.27	78.00	3025.04	2190.56	17.00	22.00	21.00	18.00
	Std. Dev.	3.43	2.88	102.77	67.12	1.12	1.16	.760	.611
Total	Mean	6.28	4.95	194.69	155.78	1.00	1.33	1.49	1.14
	Sum	269.90	213.00	8371.63	6698.35	43.00	57.00	64.00	49.00
	Std. Dev.	2.99	2.74	70.20	48.65	.900	1.29	.935	.710

a: Question #1 to #3, b: Question #4 to #7, c: Question #8 to #10, d: Question #11 to #13

We also computed a success ratio based on three variables: number of mistakes, total questions response time and total tricks completion time. The rationale behind this ratio is based directly on the experiment requirements. Indeed, the tricks were designed to be short with an average of 2 minutes per trick. The questions however were designed to be answered in a maximal time of 45 seconds each. The hardest questions, questions 11 to 13 should take no more than 30 to 40 seconds to answer correctly. Thus, a standard learner should be able to finish answering questions in roughly the same amount of time or less than the learner took learning. So basically the division ratio should return a result around 1. In order to distinguish between learners having made the same amount of total mistakes, we simply added the total number of mistakes to that ratio yielding the success ratio. Furthermore, since we were looking for the *lowest* number of mistakes in the *least* amount of time, it seemed reasonable to have a ratio where the lower the value the better the success.

$$\text{Success Ratio} = \text{Number of mistakes} + \frac{\text{Total questions response time}}{\text{Total tricks completion time}}$$

The analysis if means ran on the results show that there is indeed a significant interaction effect of success ratio and group (average of control group = 7.26, answer = 4.41, miscue 7.09 thus not much different than control). Table 6.8 presents all the other relevant results.

Table 6.8 – ANOVA table

	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Success_Ratio * Group	72.56	36.28	4.79	.014
Total mistakes * Group	69.83	34.92	5.68	.007
Total Qst RT * Group	12063.41	6031.70	1.24	.301
Total Trick RT * Group	923.31	461.65	.188	.830
Mistakes Trick1 (Q1 to Q3) * Group	1.85	.926	1.15	.326
Mistakes Trick2 (Q4 to Q7) * Group	9.87	4.93	3.31	.047
Mistakes Trick3 (Q8 to Q10) * Group	6.31	3.16	4.15	.023
Mistakes All 3 Tricks (Q11 to Q13) * Group	2.62	1.31	2.82	.071

It is not surprising though to not expect an effect of total tricks completing time with group because some learners will want to take more time to learn a trick than others. In fact, the time one takes learning one trick is less important than the amount of mistakes one makes (in our experiment). The same argument is given to question response time. However, the lack of interaction between the total amount of mistakes and group for the first trick can be surprising at first. However, after further investigation, we can come to the conclusion that since this trick is really the easiest of all and that the subliminal cues can hardly misdirect learners and thus obvious that everybody should at least have a good score here.

In light of the descriptive analysis, we can claim that positive subliminal cues do seem to have an impact on performance if analyzed with a success ratio and per-trick. Indeed, the further we advance in the lesson the harder the tricks become for they are cumulative.

6.7.3. Affective data analysis

The first research question we wanted to investigate was the impact, if any, of the subliminal cues on learner's performance and problem solving capabilities. As previously mentioned, we present affective results, mainly IBI (inter-beat interval) and skin response that have been mean-shifted and compared between subjects. Figure 6.6 presents both results for the IBI as well as the skin response signals.

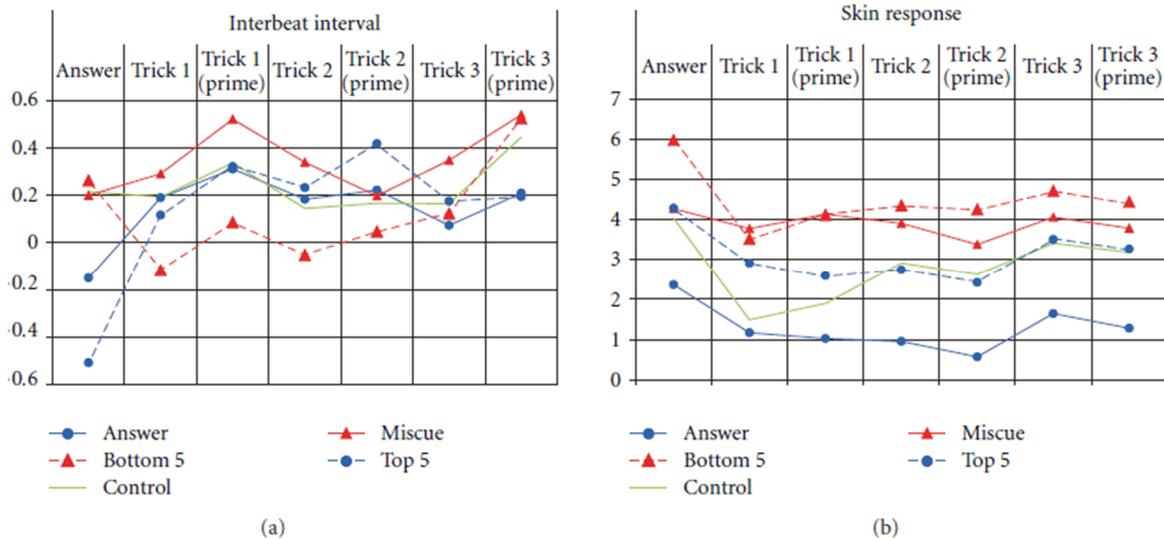


Figure 6.6 - IBI results and skin response.

We ran a multiple comparison of means (MCM) on every point presented on each graph and the presented results are *statistically significant*, even if points seem to overlap. We ran those ANOVAs on five groups: answer, control, miscue, top5 (the learners with the 5 best success ratios), bottom5 (the learners with the 5 worst success ratios). As an example, consider for example the IBI data for Trick 3 where the value of group Top5 (solid round blue line) is almost identical to that of Bottom5 (dashed triangle line). In this case, one can say that the values are *close* or almost *identical* but they are statistically significant nonetheless. The differences are sometimes so small that they appear as the same on the graphs.

The most important column to look at is the Answer column. This is indeed the state in which learners a few seconds (5 seconds) before answering a question. We can see that conditioned learners seem to follow the same overall morphology of the curve representing the 5 best learners. A negative IBI and a positive skin response might suggest that positively conditioned learners seem to be the more relaxed of the groups when answering questions. Indeed, they seem to have quite a high skin response value and the highest IBI interval value which is not recommended for it seems to lead to an excess of attention or implication while resolving the question. Furthermore, the positive subliminal cues seem to help converge the answer group's IBI values towards the top5 group values, which was not the case for the miscue group. However, this observed pattern does not seem to occur with skin response. Indeed, the subliminal primes do not seem to “push” the answer group towards the top5 values. These results deserve further analysis in light of the EEG data that will be presented next.

6.7.4. EEG data analysis

The EEG asymmetry results have been computed for the entire brain area by following the methodology described by Davidson [132]. These results have been computed by subtracting the left hemisphere from the right one (RH-LH)/(RH+LH). Thus, a value of -0.5 would represent a strong 50% left side asymmetry. It is important to mention that the same MCM was computed on every point displayed in figure 6.7.

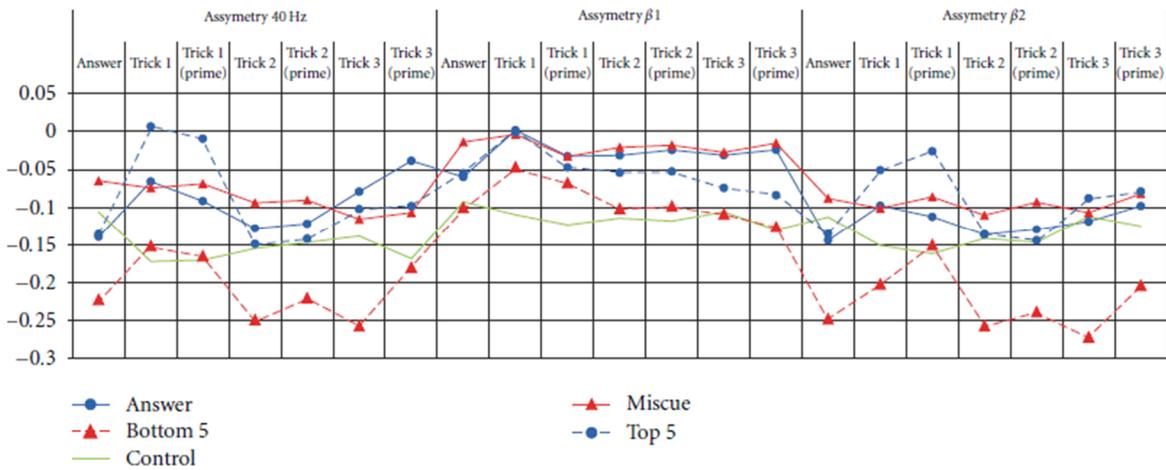


Figure 6.7 - Asymmetry results for Beta and the 40Hz band.

The EEG results tend to confirm the descriptive and affective data analysis when it comes to answering questions. Indeed, the asymmetry value for the 40Hz answer group is significantly different than the miscue group. The surprising result comes from the Asymmetry values for the third and most difficult trick. The positively conditioned learners seem to shift their attention and “insightful” problem solving strategy closer to both hemispheres, thus involving a lot more the right side of the brain that have been known to be an important actor in insightful problem solving.

We separated the beta band in two because neurological evidence presented by [104] seems to point towards the fact that a strong left hemispheric dominance of beta2 can be an indicator of stress or anxiety while engaged in a learning activity. Indeed, we can observe that the bottom5 group is much closer to a left asymmetry than the answer group which seem to make sense with regards to their earliest results.

6.8. Conclusion and future work

We have discussed in this paper the use of subliminal priming for enhanced learning. We believe that we have shown that the new UI implementing subliminal cuing can indeed be used in both a 2D and 3D learning environment and can lead to very encouraging and promising results. Indeed, the implications of this study for HCI developers and experimenters are diverse, but converge on five fronts. (1) HCI system designers wishing to construct an environment for enhancing either learner's deductive or inductive capabilities are not bound by a 2D or 3D computer environment. They can integrate positive cognitive cues as part of any computer environment. The presented results from this study, combined with previous results [151, 155] seem to support this claim. (2) The present study confirmed that only answer cues, not miscues, seem to show great potential in enhancing learners' inductive reasoning, notably intuitive *correct* guessing, in a logic-based problem solving task. This issue is important to consider, from an HCI standpoint, when constructing smart interfaces to interact with a learner. This result seems to complement results from previous work in the HCI community by DeVaul and colleagues [50] claiming that *relevant* miscues may actually improve performance. Results from this study show that *irrelevant* miscues do *statistically* neither hinder nor enhance learner's performance. (3) Another surprising and important finding in this study is the seemingly cumulative effect of priming with *Answer* cues on learner's performance throughout the lesson. Indeed, our results seem to point towards the fact that the effect of positive cues seems to be proportionally related to the trick's difficulty. This is especially the case when positively conditioned learners (primed with positive cues) learned a lesson with using both logic and intuition. An intelligent interface, throughout the EEG and affective physiological sensors, can easily detect such learning conditions with the use of specific EEG asymmetry variations in the left versus the right lobes and adapt their priming strategy accordingly. (4) The use of positive cues seems to have an important impact on learning but more specifically on the learner's affective state when answering the questions. We observe that conditioned learners seem to be in a more relaxed state, while staying aroused to stimuli throughout the lessons. The EEG asymmetry signals indicate that learners in that group seem to "shift" their problem solving strategy from purely logical to a more intuitive, even insightful, approach as indicated by the strong presence of 40Hz waves. Such precious results and data are only obtainable through the use of EEG sensors and could become of great potential and interest for the HCI and ITS community. Indeed, Intelligent Systems that can detect these shifts in

strategies can adapt the course, tutor strategies as well as difficulty levels to the current and exact mental state of the learner through a smart and much more interactive UI.

Although these results are more than encouraging, the experiment is still missing a few avenues of improvement. First, the need to implement in any learning environment, but more specifically one that deals with unconscious cognition, an input for user feedback regarding the “strength” or “confidence” of his answer. We have observed this attitude in the video feedbacks a few times. Learners getting primed with miscues consistently kept getting correct answers, or the inverse: learners getting primed with positive cues did not properly answer the question. Although the later occurred at a much lower frequency, it seems interesting to investigate the learner’s “trust” in his own answers. Second, the offline analysis is definitely something to improve on. An Intelligent system built behind a IUI should be able to make decisions based on a real-time analysis of physiological data processed by proper filters and signal processing algorithms. It is indeed one of our future avenues of research. And third, an in depth EEG analysis is required in order to examine other sources of information such as response time and ratios related to specific pattern recognition in order to help establish the optimal cerebral conditions for efficient subliminal learning to occur.

We are currently working on perfecting our new IUI by implementing signal processing algorithms enabling us to filter EEG and affective signals in real-time. Furthermore, we wish to investigate other aspects of unconscious cognition, such as intuitive decision making, by implementing a multi-agent architecture to model the learner’s subliminal and affective profile. This will hopefully enable our IUI and ITS, through the use of a fully trained neural network and subliminal cues, to determine the proper course of action to take in order to enhance learning performance, either deductive or inductive, with regards to the emotional, cerebral and problem solving ability of the learner.

6.9. Acknowledgements

We would like to thank the two anonymous reviews for their insightful and helpful comments. Furthermore, we would like to thank the Fonds de recherche sur la société et la culture (FQRSC) for funding this research.

CHAPITRE 7

CHAPITRE 7

Discussion des résultats

Sommaire

7.1. DISCUSSION SUR L'AMORÇAGE COGNITIF	139
7.1.1. DIFFÉRENCES DE PERFORMANCE ENTRE LES GROUPES.....	139
7.1.2. L'IMPACT DU GROUPE SUR LA MANIÈRE DE RÉPONDRE À UNE QUESTION	141
7.1.3. RATIO DE SUCCÈS	142
7.1.4. MODIFICATION DYNAMIQUE DE LA VITESSE D'AMORÇAGE	143
7.1.5. TAILLE DE L'ÉCHANTILLON UTILISÉ	144
7.2. DISCUSSION SUR LA DIMENSION CÉRÉBRALE	144
7.2.1. APPORT DU EEG AU RAISONNEMENT LOGIQUE VERSUS INTUITIF.....	144
7.2.2. ASYMÉTRIE CÉRÉBRALE : QUELQUES LIMITATIONS	146
7.2.3. ANALYSE INDIVIDUELLE DES PLAGES DE FRÉQUENCES.....	147
7.3. CONCLUSION	148

Le précédent travail a présenté une étude montrant l'impact positif de notre méthode d'amorçage cognitif sur l'induction de la connaissance. Cette méthode a été enrichie par rapport à notre première étude par l'ajout d'un nouveau type d'amorce et les résultats ont démontré que c'est effectivement les amorces *Réponse* qui ont permis d'améliorer le raisonnement de façon significative. De plus, notre étude a mesuré par EEG les réactions cérébrales pour identifier le type de raisonnement employé par les apprenants pour la résolution des problèmes rencontrés, à savoir un raisonnement logique ou intuitif. Ce chapitre présentera une discussion sur l'amorçage cognitif utilisé et sur la dimension cérébrale que nous avons investiguée avant de conclure sur une discussion applicative de l'ensemble des travaux de cette thèse.

7.1. Discussion sur l'amorçage cognitif

Nous reprenons dans cette section quelques tableaux importants présentés dans la précédente étude pour approfondir des notions montrant l'impact positif de l'amorçage cognitif utilisé sur l'induction de la connaissance tel que mesurée par la performance des apprenants.

7.1.1. Différences de performance entre les groupes

Les premiers résultats que nous voulons reprendre concernent le tableau 6.2 présenté à la page 128 que nous reprenons ici sous l'appellation de tableau 7.1. L'idée de ce tableau était de démontrer que nos groupes ne sont pas biaisés par plusieurs facteurs et donc que tous les apprenants peuvent être considérés comme étant « équivalents ». Évidemment, tout être humain est différent et il est difficile d'affirmer qu'un individu a le même niveau de connaissance qu'un autre. Dans notre étude, nous décidons d'avoir recours à plusieurs tests différents mesurant différents facteurs clés pour comparer les individus entre eux. Nous débutons avec quatre tests objectifs en italique dans le tableau 7.1. Les deux premiers tests, « SRM » et « PRM » sont des tests pour la reconnaissance spatiale de formes et de patrons dans l'espace. Compte tenu de la nature des règles à comprendre, une forte aptitude spatiale pourrait donner un avantage marqué à un participant par rapport à un autre. Nous avons donc observé qu'il n'y avait aucune différence significative à ce niveau. Les deux tests suivants (« Speed test ») sont des versions adaptées du paradigme de l'amorçage cognitif de chiffres par Dehane qui a été présenté à la page 31 du présent document. Dans ce test, nous projetons deux chiffres de façon subliminale en utilisant la même vitesse que celle utilisée durant notre étude, soit 33 millisecondes. Le second chiffre est

soit inférieur soit supérieur au premier. On demande aux apprenants de répondre par oui ou par non le plus rapidement possible si le second chiffre est supérieur au premier. Ce test est important pour notre étude car nous cherchons à savoir si un individu est apte à mieux reconnaître et traiter inconsciemment une information sémantique qu'un autre. Nous avons constaté qu'aucun apprenant n'a obtenu des résultats significativement meilleurs qu'un autre.

Tableau 7.1 – Différences entre utilisateurs

Analysis of variance (ANOVA) between groups	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig. (p-value) at alpha = 0.05
<i>Spatial Recognition Memory (SRM) pre-test result</i>	138.870	69.435	.192	.826
<i>Pattern Recognition Memory (PRM) pre-test result</i>	1512.797	756.398	3.110	.066
<i>Speed pre-test response time result</i>	.322	.161	1.310	.281
<i>Speed pre-test accuracy result</i>	1603.128	801.564	.848	.436
EEG post-test intrusiveness result *	1.291	.646	.481	.622
Physiological sensors post-test intrusiveness result *	2.789	1.395	1.216	.307
Lesson likability post-test result *	7.580	3.790	2.228	.121
Question difficulty post-test result *	8.966	4.483	2.956	.063
Lesson difficulty post-test result *	2.466	1.233	.421	.659

* : based on a likert scale from 1 to 6

Nous avons également mesuré d'autres facteurs plus subjectifs tels que le degré d'intrusion des capteurs physiologiques et cérébraux sur les apprenants. On pourrait penser, à tort, que le fait d'avoir des capteurs pourrait nuire à l'expérience en introduisant un biais pour l'ensemble de l'étude. Or, notre expérience des cinq dernières années nous montre que cela n'est vrai que pour les deux ou trois premières minutes de l'expérience. Par la suite, l'apprenant ne pense plus aux capteurs et se concentre sur la leçon. Ce phénomène s'est avéré vrai dans notre première étude présentée au chapitre 3 et dans celle-ci également. De fait, la moyenne du niveau d'intrusion (note sur 6) que les apprenants ont attribué aux capteurs EEG était de 2/6 comparativement à 1.7/6 pour les capteurs physiologiques (différence statistiquement non significative).

Les trois derniers résultats du tableau sont des mesures subjectives reflétant les degrés d'appréciation et de difficulté des leçons selon les apprenants. Ces métriques nous semblaient importantes car une perception de difficulté élevée et une mauvaise appréciation auraient pu avoir un impact sur l'apprentissage. Les résultats obtenus nous indiquent par contre qu'il n'y avait aucune différence de perceptions selon les groupes.

Après avoir établi que nos apprenants étaient tous assez « équivalents », nous passons maintenant à quelques différences intéressantes au niveau des erreurs commises par groupe.

7.1.2. L'impact du groupe sur la manière de répondre à une question

Nous rappelons que les apprenants indiquaient après chaque réponse la manière dont ils avaient répondu à la question : par hasard, par intuition, par déduction logique, principalement par intuition ou principalement par déduction logique. Nous avons repris le tableau 6.5 et l'avons renommé tableau 7.2. Nous avons observé un impact positif inattendu des amorces *Réponse* sur la performance. Nous avons surligné cette observation.

Tableau 7.2 – Différences de performance lors de la réponse aux questions en fonction du groupe

Group	Question answer type						Total	
		<i>Logical deduction</i>	<i>Intuition</i>	<i>Random/ Guess</i>	<i>Mainly by logical deduction</i>	<i>Mainly by intuition</i>		
Control	Mistake	No	52 (65%)	14 (35%)	19 (45%)	14 (61%)	5 (50%)	104 (53%)
		Yes	28	26	23	9	5	91
Answer	Mistake	No	91 (85%)	15 (58%)	4 (57%)	24 (73%)	4 (44%)	138 (76%)
		Yes	16	11	3	9	5	44
Miscue	Mistake	No	44 (71%)	23 (49%)	15 (50%)	15 (54%)	7 (47%)	104 (57%)
		Yes	18	24	15	13	8	78

Results in parentheses represent the success rate on 100% as in an exam.

Nous observons que les amorces *Réponse* semblent effectivement provoquer moins de réponses aléatoires de la part des apprenants du groupe « Answer » (groupe avec amorces *Réponse*) que dans les groupes « Control » (groupe témoin) et « Miscue » (groupe avec amorces *Erreur*). Nous observons que le groupe témoin a répondu au hasard 42 fois sur 159, que le groupe « Miscue » a répondu 30 fois sur 182 au hasard contrairement à seulement 7 fois sur 182 pour le groupe « Answer ». Nous avions l'intuition au départ que les amorces *Réponse* pouvaient favoriser l'apprentissage et améliorer l'induction de la connaissance, mais nous sommes ravis de découvrir ici une répercussion inattendue de ce type d'amorces sur la performance. Il se peut fort bien que les amorces *Réponse* aient également un effet positif sur les capacités d'encodage et de récupération de l'information en mémoire, mais il faut être prudent et approfondir ces résultats avant d'en tirer une conclusion définitive. Nous passons maintenant aux résultats concernant le ratio de succès calculé dans notre étude.

7.1.3. Ratio de succès

Nous reprenons cette métrique qui a été expliquée dans le chapitre précédent à la section 6.7.2 intitulée « Descriptive analysis » afin de commenter un peu plus longuement les résultats importants qu'elle nous a permis d'obtenir en lien avec nos hypothèses de recherche.

Équation 7.1 – Ratio de succès en fonction des erreurs et des temps de réponse pour les questions et leçons

$$\text{Success Ratio} = \text{Number of mistakes} + \frac{\text{Total questions response time}}{\text{Total tricks completion time}}$$

Les résultats significatifs du ratio de succès suite à deux t-tests entre les groupes Answer et Control ($t=3.252$, $p=0.003$, $\alpha=0.05$) et Answer et Miscue ($t=-2.405$, $p=0.024$, $\alpha=0.05$) ont été présentés dans le tableau 6.7 que nous reprenons ici sous une forme allégée sous le nom de tableau 7.3. Nous avons surligné quatre colonnes importantes que nous discutons dans cette section.

Tableau 7.3 – Tableau résumant les résultats du ratio de succès en fonction des groupes

Group		Success Ratio	Total mistakes	Total Qst RT	Total Trick Time	Mistakes Trick 1 ^a	Mistakes Trick 2 ^b	Mistakes Trick 3 ^c	Mistakes all 3 Tricks ^d
Control	Mean	7.26	6.07	175.27	150.02	1.07	1.73	1.93	1.33
	Std. Deviation	2.35	2.37	50.29	34.27	.887	1.45	.961	.617
Answer	Mean	4.41	3.14	194.11	161.25	.714	.643	1.00	.786
	Std. Deviation	2.37	2.14	41.34	42.49	.611	1.01	.877	.802
Miscue	Mean	7.09	5.57	216.07	156.47	1.21	1.57	1.50	1.286
	Std. Deviation	3.43	2.88	102.77	67.12	1.12	1.16	.760	.611

a: Question #1 to #3, b: Question #4 to #7, c: Question #8 to #10, d: Question #11 to #13

Tout d'abord, ce ratio est probablement la meilleure métrique qui nous a permis d'observer un effet à moyen terme de l'impact positif des amorces subliminales sur l'apprentissage. Ce qui est intéressant dans ce ratio est le fait que, bien que le groupe « Answer » ait pris en moyenne plus de temps à répondre à chaque leçon (161 secondes versus 150 et 157 secondes pour les deux autres groupes), le nombre d'erreurs commises est deux fois plus faible (3 erreurs en moyenne versus 6 erreurs moyennes pour les deux autres groupes).

Ensuite, nous avons remarqué que la différence de performance que l'on peut attribuer aux amorces cognitives arrive plutôt vers la fin de l'étude, lorsqu'il vient temps de répondre aux

questions de la troisième règle (« Mistakes 3^c ») et aux questions en lien avec les trois règles (« Mistakes all 3 Tricks^d »). Nous avons surligné ces 2 dernières colonnes dans le tableau 7.3.

Les questions de la troisième règle sont les plus complexes car elles intègrent les astuces des deux premières. C'est à ce moment que nous pensons que l'amorçage fonctionne à son meilleur car le raisonnement devient plus intuitif que logique. À cette étape-ci, l'apprenant a déjà validé ses schémas mentaux au fur et à mesure qu'il répond aux questions. Nous pensons que l'efficacité de l'amorce est proportionnelle à la complexité du raisonnement.

Finalement, pour ce qui est des questions en lien avec les trois règles, nous observons une différence relativement importante et significative entre la performance des groupes. Nous rappelons que ces questions sont différentes des trois autres car elles ne posent pas une question sur une règle donnée, mais présentent un carré magique partiellement complété en demandant à l'utilisateur d'indiquer si ce carré est valide ou non. L'apprenant doit donc simuler la construction d'un carré à partir du début et s'arrêter au moment où il pense qu'il y a une erreur entre le carré affiché et celui que l'apprenant s'imagine en tête. Il est très intéressant de voir que même dans ce genre d'exercice de raisonnement complexe, les apprenants ayant appris avec les amorces *Réponse* arrivent à s'exécuter avec une meilleure performance que les autres. Il serait par contre utile de creuser un peu plus dans le détail l'analyse du ratio de performance par leçon apprise, afin de voir si ces observations générales se reproduisent dans des situations plus pointues lors de l'apprentissage.

Nous passons maintenant à une discussion sur l'apport des capteurs EEG utilisés dans cette étude à l'analyse du raisonnement de l'apprenant.

7.1.4. Modification dynamique de la vitesse d'amorçage

Nous avons utilisé dans notre deuxième étude une vitesse fixe pour les amorces. Nous avons fondé cette hypothèse sur les bases neuroscientifiques de la perception subliminale. Or, Pessiglione et al. [162] se sont questionnés sur la pertinence d'avoir recours à une seule vitesse de projection pour tout le monde. Les auteurs affirment qu'une adaptation de la vitesse de projection des amorces pour chaque apprenant pourrait mener vers un gain de performance. Les auteurs suggèrent l'utilisation de deux vitesses de projection, soit 33 millisecondes soit 50 millisecondes. Nous pensons effectivement que la variation du seuil est un élément à apporter à nos futures expériences afin de mesurer le degré d'influence que ces amorces pourraient avoir

sur les mécanismes cérébraux inconscient du raisonnement pour une meilleure amélioration de l'acquisition de la connaissance.

7.1.5. Taille de l'échantillon utilisé

Une autre amélioration à apporter concerne la taille de l'échantillon que nous avons utilisé. Nous avons enregistré les données cérébrales et physiologiques de quarante-trois participants, ce qui normalement constitue un très bon nombre pour une étude en neurosciences. Nous aurons souhaitez enregistrer un plus grand échantillon afin d'explorer toutes les interactions possibles entre les différents types d'amorces et la richesse des données psychométriques que nous disposons pour chaque apprenant. Cependant, du point de vue statistique, ce nombre de quarante-trois est acceptable pour confirmer des hypothèses sans généraliser les résultats.

7.2. Discussion sur la dimension cérébrale

Nous discutons dans cette section de trois points importants concernant la dimension cérébrale et la mesure des mécanismes cognitifs sous-jacents aux amorces cognitives utilisés.

7.2.1. Apport du EEG au raisonnement logique versus intuitif

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à mesurer la manière dont un apprenant raisonne lorsqu'il se trouve dans un contexte de résolution de problème. Nous avons décidé d'utiliser l'EEG comme outil d'investigation de ces processus, et ce dernier s'est avéré être un excellent choix pour cela. Une fois les problématiques de filtrage et de traitement de plages requises résolues, l'EEG permet d'observer des phénomènes cognitifs, particulièrement lorsque ceux-ci sont à des spectres opposés. Par cela, nous voulons dire que le fait de penser à des chiffres ne sollicite pas les mêmes régions cérébrales (donc les mêmes activations neuronales) que de composer une chanson. Le même phénomène s'observe lorsqu'on veut mesurer les différences cérébrales de raisonnement entre un raisonnement logique versus intuitif. Nous avons même découvert que ceci est encore plus vrai lorsqu'on catégorise les apprenants en fonction de leur performance. Nous présentons un exemple de cela sur la figure 7.1 qui est une reprise simplifiée de la figure 6.7 du chapitre précédent à la page 135.

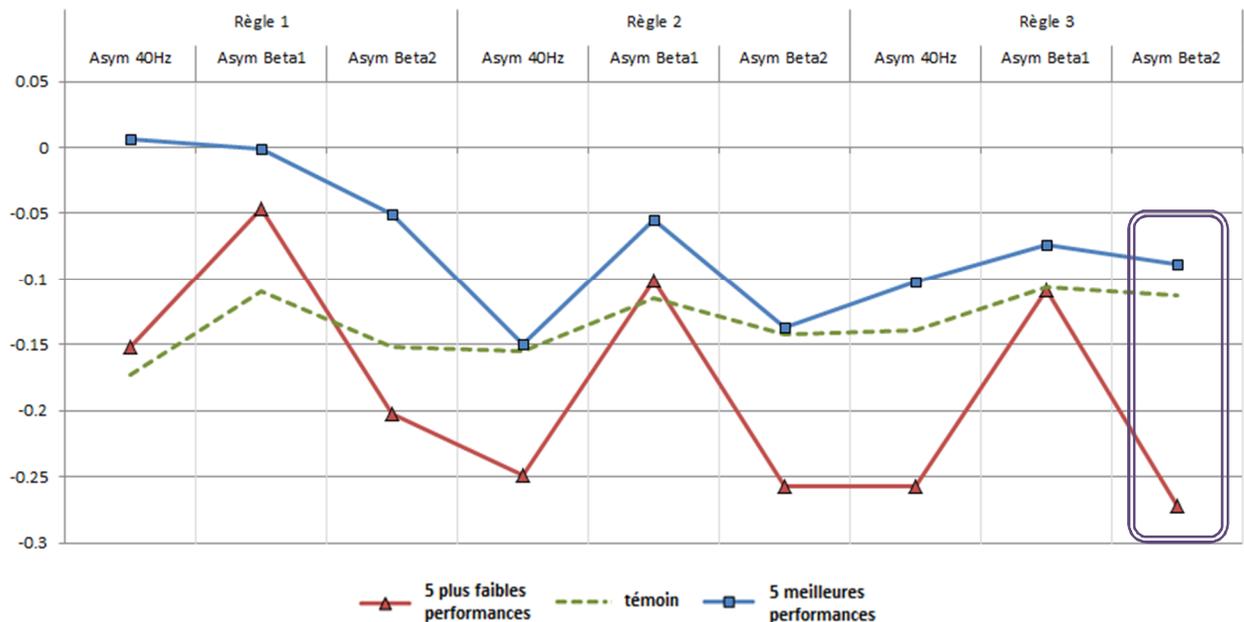


Figure 7.1 – L’apport important des données EEG dans l’analyse des états mentaux et affectifs entre les meilleurs apprenants et les moins performants

Cette figure présente très clairement deux patrons cérébraux différents sur plusieurs fréquences entre les cinq meilleures performances et les cinq plus faibles. Avant de poursuivre, nous rappelons que l’axe des ordonnées représente la différence asymétrique cérébrale par rapport à l’hémisphère droite. Une valeur négative représente moins d’effort mental du côté droit et donc plus d’effort du côté gauche. Les deux premières asymétries (40Hz et Beta1) sont respectivement associées à un raisonnement intuitif et logique. La dernière asymétrie (Beta2) est associée à un état de stress. Plus elle est négative, plus le stress est élevé. On observe dans la partie droite de la figure que les apprenants ayant eu les meilleurs résultats pour la règle 3 ont eu recours à un raisonnement plutôt équilibré entre logique et intuitif (valeur de Beta1 très proche de 40Hz). C’est également le cas pour le groupe témoin tel que représenté par la ligne verte hachurée. Cependant, on peut remarquer une différence importante entre les asymétries Beta1 et 40Hz pour le groupe des cinq plus faibles performances (-0,1 et -0,25). Ce que l’on peut interpréter grâce à l’EEG ici est que ces apprenants oscillent beaucoup trop entre ces deux types de raisonnement, sans se concentrer sur un raisonnement en particulier. Ils semblent opter pour deux types extrêmes de raisonnement et ce constant va-et-vient est renforcé par un état négatif au niveau émotionnel mesuré par la troisième asymétrie Beta2. On voit dans ce cas que le groupe des cinq plus faibles performances est dans un état émotionnel beaucoup plus négatif que les

deux autres groupes ce qui vient renforcer la richesse des mesures EEG et plus particulièrement des asymétries pour l'analyse du raisonnement en parallèle à l'état émotionnel.

7.2.2. Asymétrie cérébrale : quelques limitations

Nous venons de discuter des asymétries cérébrales et de leur apport à notre recherche. Il est utile cependant de discuter de quelques limitations importantes, à savoir le nombre de régions utilisées, la formule employée et le bruit. Débutons avec la première limitation.

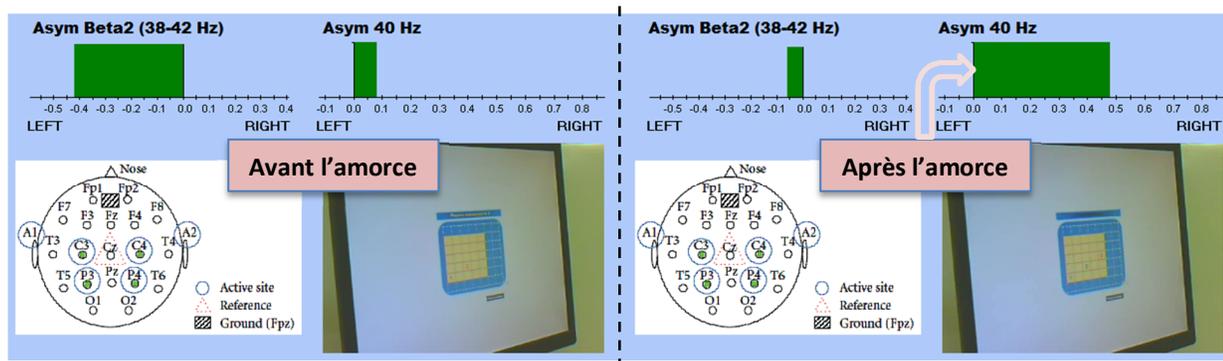


Figure 7.2 – Raisonement intuitif par une apprenante lors de l'apprentissage d'une leçon. On observe une augmentation de 40Hz suite à une amorce cognitive *Réponse*

Le nombre de régions cérébrales mesurées permet de produire ce que l'on appelle une carte topographique du cerveau. Plus le nombre de régions mesurées est élevé, plus la localisation d'un phénomène cognitif dans le cerveau peut être identifiée avec précision. Considérons l'exemple illustré sur la figure 7.2, dans lequel on aperçoit une apprenante en train de raisonner de façon intuitive pour comprendre la première règle dans notre leçon lorsqu'une amorce cognitive de type « Réponse » lui est envoyée. La version textuelle de cette figure a été publiée à la conférence ITS 2012 de cette année [172].

Nous observons sur cette figure une nette augmentation de l'amplitude du signal EEG pour la fréquence 40Hz pour le côté droit du cerveau, ce qui est conforme avec la littérature. Cependant, nous avons calculé dans notre étude une amplitude commune pour chaque hémisphère en utilisant uniquement deux capteurs par hémisphère afin déterminer le type de raisonnement utilisé. Si nous avions plusieurs capteurs cérébraux par hémisphère pour le calcul des asymétries, nous aurions pu localiser de façon plus précise la région cérébrale dans l'hémisphère droit où le phénomène cognitif de l'intuition se serait manifesté pour l'apprenante sur la figure 7.2.

La seconde limitation est la simplicité de la formule utilisée pour calculer une asymétrie cérébrale. Cette formule, $(RH-LH)/(RH+LH)$ a été présentée sur la figure 5.7 du chapitre précédent. Dans cette formule, on se doit de choisir tout d'abord une plage de fréquences pour comparer les asymétries. Il n'existe à notre connaissance aucun travail qui permet de calculer un seul ratio d'asymétrie basé sur plusieurs fréquences. La sélection d'une région constitue une autre limitation avec cette formule, en ce sens qu'elle s'applique soit à un capteur ou à tout un hémisphère. Il y a donc un effort non négligeable en termes de comparaison statistique des plages de fréquences et des régions cérébrales si l'on souhaite travailler avec les asymétries.

Finalement, la dernière limitation concerne le bruit et les artefacts à traiter dans le signal EEG. Un bruit est un phénomène aléatoire présent en cours d'enregistrement et dont la forme n'est pas connue. Par exemple, un bruit peut être produit par un apprenant qui se gratte le menton ou la tête. Un artefact est quant à lui un phénomène, aléatoire ou non, dont la forme est connue et reproductible. Il pourrait s'agir notamment du clignement des yeux d'un apprenant. Il faut savoir que le calcul des asymétries dépend grandement d'un équilibre entre les données collectées de chaque hémisphère. La présence d'un artefact ou d'un bruit sur un côté du cerveau pourrait grandement modifier les valeurs collectées, tels qu'un apprenant qui se gratte l'œil gauche ou qui fait un clin de l'œil droit). Il est donc important d'utiliser les bons algorithmes de traitement de signal pour détecter et corriger le bruit et les artefacts si l'on souhaite travailler avec l'EEG.

Nous venons de discuter dans cette section des résultats obtenus en ce qui a trait à l'impact positif de notre méthode d'amorçage cognitive sur l'induction de la connaissance. Nous avons également abordé le rôle majeur du signal EEG dans la mesure du raisonnement utilisé par un apprenant et de la sensibilité des données EEG. Passons maintenant aux améliorations possibles à apporter à notre étude.

7.2.3. Analyse individuelle des plages de fréquences

La dernière amélioration sur laquelle nous travaillons actuellement est l'étude individuelle des fréquences EEG. Le fait de moyenniser les fréquences dans des plages entraîne une perte de la valeur au signal EEG dans certaines situations. Le fait de considérer les fréquences 38 à 42 Hz comme étant « une seule » plage noie la fréquence particulière de 40Hz. Il serait beaucoup plus efficace de considérer les changements asymétriques une fréquence à la fois et construire un modèle statistiquement plus riche et significatif. Nous avons commencé à apporter ces améliorations pour un futur article de revue.

7.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commenté un peu plus longuement quelques résultats présentés dans la revue du chapitre précédent. Ces résultats nous ont permis d'approfondir un peu plus l'analyse de l'impact positif de l'amorçage cognitif sur l'induction de la connaissance et la performance des apprenants. Nous avons également été en mesure de confirmer que ce sont bel et bien les amorces *Réponse* qui améliorent de façon significative le raisonnement de l'apprenant dans un contexte de résolution de problème. Ce chapitre a également présenté un nouveau capteur fort utile pour la mesure des mécanismes inconscients impliqués dans le raisonnement. Nous avons également expliqué que l'EEG est une technique riche, mais complexe qui requiert un certain niveau d'expertise et de traitement de signal pour interpréter convenablement les données collectées.

Nous pensons que le temps est maintenant venu d'intégrer les résultats obtenus dans nos travaux dans un nouveau STI. La mise en place de l'amorçage cognitif comme preuve de concept dans un STI à base d'agents est le dernier objectif visé par la thèse. Le but est d'avoir un système autonome amélioré par l'ajout d'un agent subliminal capable d'utiliser les résultats trouvés dans nos travaux de recherche pour enrichir la session d'apprentissage. De plus, un prototype fonctionnel de ce STI nous permettra de rapidement mettre en place de nouvelles expériences sans devoir recommencer à coder à nouveau un environnement test pour valider une nouvelle hypothèse de recherche. Finalement, nous espérons rendre ce STI disponible à la communauté afin qu'elle puisse l'utiliser, le valider et l'enrichir par de nouvelles fonctions.

CHAPITRE 8

Discussion applicative de la recherche

Sommaire

8.1. CHARLIE : UN STI CLIENT-SERVEUR MULTI-AGENTS AVEC AMORÇAGE COGNITIF.....	151
8.1.1. CRÉER DES LEÇONS	154
8.1.2. ORDONNER LA MATIÈRE	155
8.1.2.1. PARAMÉTRER LES LEÇONS ET QUESTIONS.....	155
8.1.2.2. CRÉER LA LISTE DES PRÉREQUIS POUR LES LEÇONS	156
8.1.3. APPLIQUER DES STRATÉGIES PÉDAGOGIQUES	157
8.1.4. APPLIQUER L'AMORÇAGE COGNITIF	158
8.1.5. MODÉLISER L'APPRENANT	160
8.1.5.1. AUTHENTIFIER ET AJOUTER DES APPRENANTS	160
8.1.5.2. SUIVI DES RÉSULTATS	161
8.1.5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES BIOMÉTRIQUES.....	162
8.1.6. ENREGISTRER LES OPÉRATIONS.....	163
8.2. CONCLUSION	165

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes intéressés à mieux comprendre les mécanismes inconscients dans l'objectif d'améliorer l'acquisition de la connaissance par des mesures expérimentales et biométriques. Nous avons mis au point une nouvelle stratégie d'apprentissage subliminale et l'avons implémentée dans deux études différentes présentées et commentées. Dans ce chapitre, nous décrivons le système tutoriel intelligent (STI) client-serveur que nous avons construit à base d'agents en y intégrant un agent subliminal pour l'amorçage cognitif. Nous avons choisi d'utiliser JADE pour construire notre système pour les raisons suivantes :

- JADE est une plate-forme de développement « open-source » et basée sur le langage multiplateformes Java qui offre un support avancé de la norme FIPA-ACL.
- JADE offre également des outils de validation syntaxique des messages entre agents basé sur les ontologies.
- JADE est compatible avec Jadex, une plate-forme développée en JAVA qui facilite grandement le développement d'agents cognitifs.

8.1. CHARLIE : un STI client-serveur multi-agents avec amorçage cognitif

L'architecture du STI que nous avons mis en place est résumée sur la figure 8.1. Inspirés de l'architecture MVC (« Model-View-Controller »), nous avons construit notre STI en séparant l'interface utilisateur du traitement de l'information. Ce système est baptisé « CHARLIE » en hommage posthume à mon père. L'agent subliminal est implémenté du côté client, mais communique constamment avec les autres agents sur le serveur.

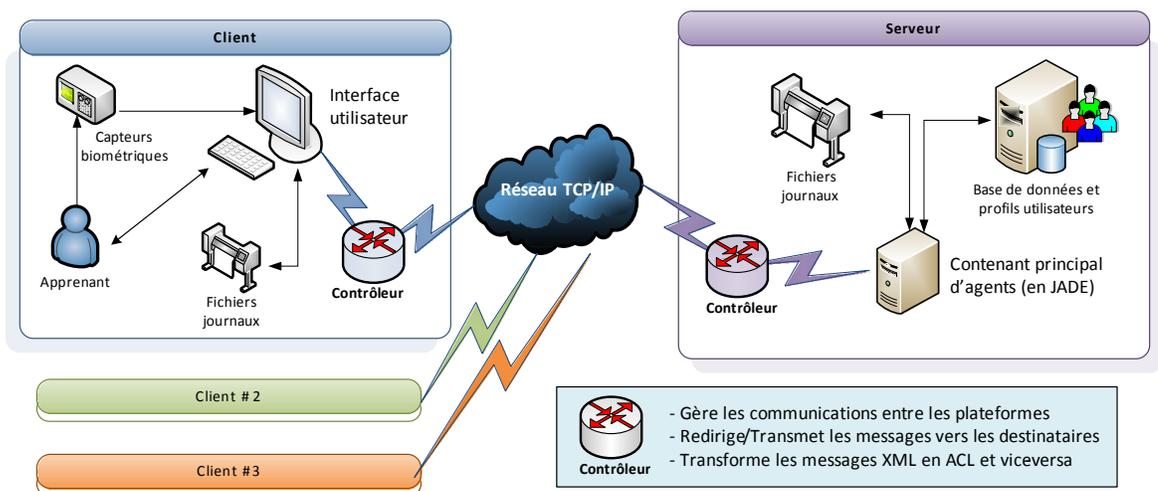


Figure 8.1 – Architecture client-serveur de CHARLIE

Pour la partie client de CHARLIE, nous avons utilisé le moteur graphique Ogre3D comme interface utilisateur pour la gestion de l'interaction avec l'utilisateur car il répond à trois critères fondamentaux pour notre recherche :

1. La nécessité d'utiliser le langage C++ pour un traitement rapide et efficace des signaux biométriques du côté client.
2. La gratuité (« open source ») et qualité de l'environnement pour permettre une distribution future une fois le système complété.
3. La richesse de la documentation pour la maintenance future du système.

Notre interface a également été construite de façon modulaire, c'est-à-dire capable d'intégrer des composants indépendants pour enrichir le système. Nous allons entre autres discuter de l'intégration du module de projection subliminale dans l'interface utilisateur dans la section 8.1.4 de ce chapitre. Nous précisons également qu'un apprenant est associé à un client dans notre système. Chaque nouvel apprenant voulant se connecter au serveur pour suivre une leçon est modélisé comme un nouveau client tel qu'illustré sur le bas de la figure 8.1.

Pour la partie serveur de CHARLIE, nous avons décidé d'utiliser des agents implémentés sur la plateforme JADE. L'objectif est de permettre à ces agents de prendre des décisions pédagogiques pour garantir un apprentissage optimal et personnalisé à chaque apprenant. Pour permettre une collaboration optimale entre les agents, toutes les décisions pédagogiques du système sont centralisées dans la base de données du côté serveur.

Pour la partie communication entre les clients et le serveur, nous avons décidé d'implémenter un contrôleur pour chaque client (en C++) et un contrôleur central pour le serveur (en Java). Cette décision s'explique par le fait que les protocoles d'encodage et de décodage de l'information transmise diffèrent entre les plateformes exécutant les langages C++ et JAVA. Nous avons décidé d'utiliser le protocole TCP/IP pour transmettre les messages codés en XML (langage universel) et laisser le soin aux contrôleurs de faire le décodage des paquets XML en ACL (langage agent) en fonction de chaque langage utilisé. De cette façon, chaque agent contrôleur est le chef d'orchestre sur sa plateforme. Ainsi, autant du côté serveur (Java) que client (C++), les contrôleurs ont la responsabilité d'acheminer les directives aux agents concernés en effectuant la traduction des messages de ACL vers XML et vice-versa.

Nous avons décidé d'utiliser une méthodologie de développement d'agents appelée TROPOS [173] pour construire l'architecture de notre SMA. TROPOS est une méthodologie visuelle basée sur la dépendance d'objectifs entre agents. Elle a été choisie car elle donne des directives claires

et détaillées en ce qui a trait aux spécifications architecturales à considérer lors de la phase de développement. Les auteurs de cette méthodologie ont de plus fourni gratuitement un outil couvrant tout le cycle de vie de développement d'agents. Cet outil développé pour la plateforme gratuite Éclipse se nomme TAOM4E. Nous avons donc utilisé TAOM4E pour développer l'architecture de CHARLIE en établissant le diagramme illustrant les trois buts principaux de CHARLIE (figure 8.2) : modéliser l'apprenant, apprendre une leçon et enregistrer les progrès (physiologiques et psychométriques). TROPOS permet également de décomposer chaque but en sous-buts. On aperçoit un exemple trois sous-buts de « Teach lesson » illustrés sur la figure 8.2. Il s'agit de « Provide learning content », « Provide relevant support » et « Present help ». Ces trois sous-buts sont accomplis par un ou plusieurs agents dépendamment du degré de complexité de la tâche. À titre d'exemple, « Provide learning content » est un sous-but qui requiert la communication entre plusieurs agents en fonction du profil et du progrès de l'apprenant.

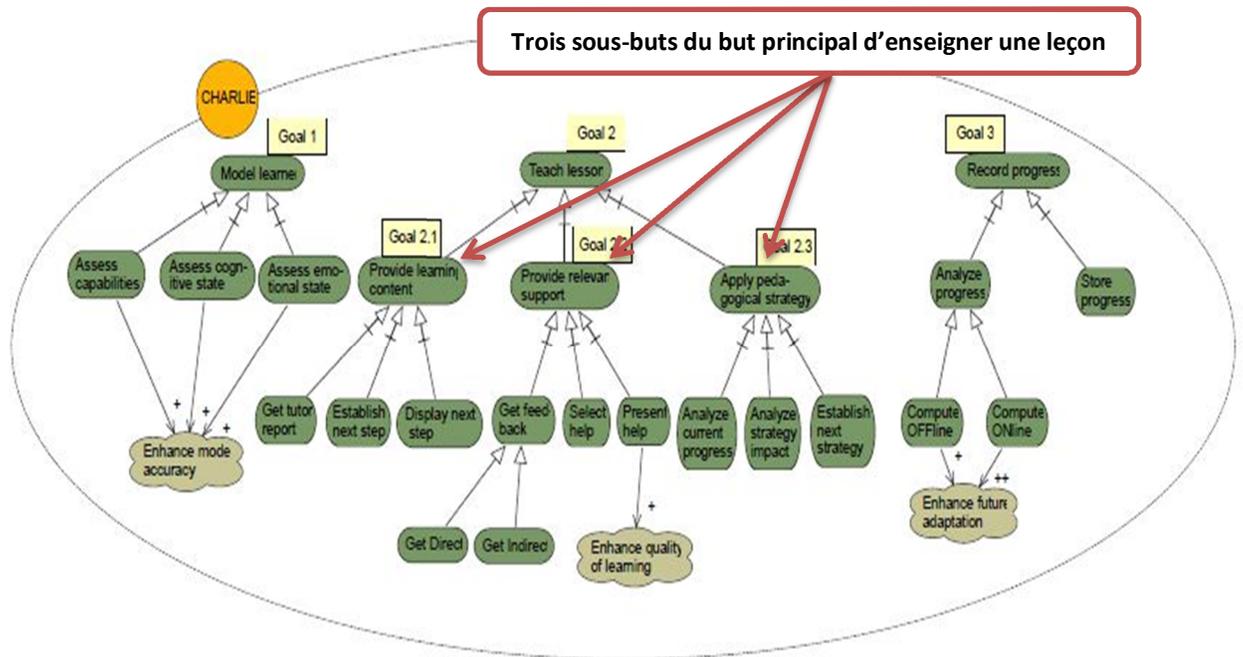


Figure 8.2 – Les objectifs visés par les agents en suivant la méthodologie TROPOS

CHARLIE comporte six fonctionnalités essentielles pour la saine gestion d'une (ou plusieurs) sessions d'apprentissage résumées dans le tableau 8.1 : créer des leçons, structurer la matière, appliquer des stratégies pédagogiques, appliquer l'amorçage cognitif, modéliser l'apprenant et enregistrer les opérations.

Tableau 8.1 – Liste des fonctionnalités de haut niveau de CHARLIE

Fonctionnalité	Description
Créer des leçons	CHARLIE supporte la création de plusieurs leçons facilement et de manière semi-automatisée.
Ordonner la matière	CHARLIE supporter la création de règles expertes qui définissent les prérequis permettant la transition entre les leçons en fonction du degré de compréhension de chaque leçon.
Appliquer des stratégies pédagogiques	CHARLIE est capable d'exécuter une ou plusieurs interventions pédagogiques différentes en fonction du contexte et des besoins de l'apprenant.
Appliquer l'amorçage cognitif	CHARLIE est capable de configurer et d'activer l'agent subliminal en temps opportun. L'agent subliminal communique avec les autres agents pour suivre le progrès de l'apprenant.
Modéliser l'apprenant	CHARLIE crée un profil informatique fiable pour chaque apprenant inscrit. De plus, l'évolution de chaque apprenant est enregistrée et accessible en tout temps par les agents.
Enregistrer les opérations	CHARLIE est en mesure d'enregistrer toutes les transactions effectuées par l'apprenant durant une séance d'apprentissage.

Les sous-sections suivantes décrivent à leur tour chaque fonctionnalité listée avec des saisies d'écran du système lorsque pertinent. Débutons par décrire la première fonctionnalité.

8.1.1. Créer des leçons

La création de leçons dans le système se fait de façon semi-automatique. L'idée est de prendre n'importe quelle présentation Power Point et de l'intégrer à notre système. Nous avons décidé d'utiliser le principe de conversion d'images en textures dans l'environnement 3D. De plus, chaque série d'images est placée dans un dossier séparé constituant une leçon. Le processus est donc relativement simple, mais requiert une première opération manuelle de la part de l'enseignant. Celui-ci doit convertir ses transparents Power Point en images. Heureusement, ceci est très facile car Power Point (par exemple) permet d'effectuer cette tâche par un simple « Sauvegarder sous ... ». Une fois les images extraites, on les place dans un dossier et un agent du côté de l'interface s'assure de collecter les images, de créer les textures requises pour l'interface et de faire correspondre chaque dossier à une leçon. Ce procédé est illustré sur la figure 8.3.

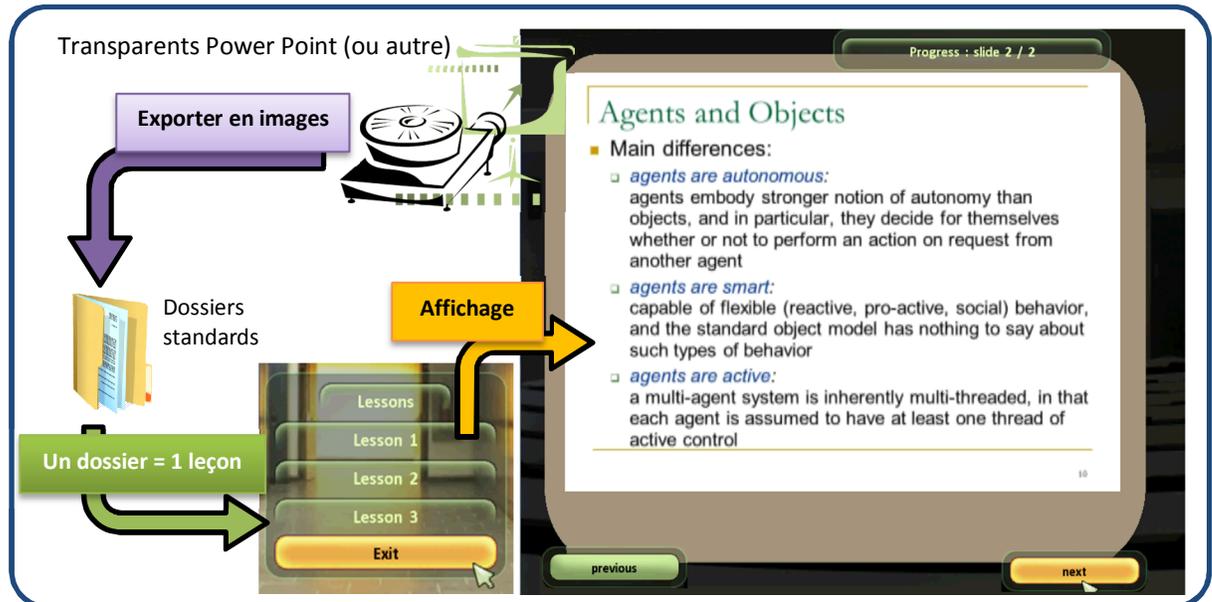


Figure 8.3 – Processus de génération semi-automatique de leçons

De cette façon, le système chargera en mémoire les textures une seule fois par leçon. Nous allons par la suite ordonner la matière afin qu'elle soit présentée de façon pédagogique. C'est l'objectif de la deuxième fonctionnalité de notre système.

8.1.2. Ordonner la matière

Comme nous venons d'expliquer, les trois leçons que l'on peut apercevoir sur la figure 8.3 sont trois fichiers Power Point dont les transparents ont été convertis en images et placés dans trois dossiers distincts. Afin de rendre ces leçons et questions qui y sont associées fonctionnelles, il faut paramétrer les leçons et questions, et créer une liste de prérequis déterminant les règles de passage d'une leçon à l'autre.

8.1.2.1. Paramétrer les leçons et questions

Nous avons décidé de coder la majeure partie des décisions et paramètres dans des fichiers XML dont la lecture et écriture se fait par la librairie gratuite TinyXML. Ainsi, il devient très facile de modifier un paramètre et le changement est immédiatement reflété dans l'interface. En effet, l'interface graphique surveille constamment les paramètres dans les fichiers XML et s'adapte en conséquence. Dans l'exemple précédent, il suffit de préciser dans trois balises XML successives

l'ordre des trois dossiers précédemment discutés pour permettre à l'utilisateur d'y accéder. De plus, dans ce même fichier XML, il est possible d'appliquer d'autres configurations pertinentes pour les leçons et questions, notamment le nombre de fois que l'on peut recommencer une leçon (et ses séries de questions), l'accès ou non à l'aide et le nombre de temps dont on dispose entre chaque transparent. Ces règles sont lues et interprétées par un agent du côté client de notre système qui transfère l'information à l'interface pour affichage et exécution.

Pour ce qui est des questions, nous avons décidé d'utiliser aussi des fichiers XML pour les inscrire et les afficher dans l'interface. Ainsi, chaque série de questions est enregistrée dans un fichier XML qui est lu et affiché par l'interface sous la forme d'un QCM (questionnaire à choix multiple). Précisons que notre interface graphique est en mesure d'afficher tous les caractères spéciaux, accentués et autres. Nous avons décidé de confier les questions au serveur et l'agent Expert transmettra les questions de chaque leçon à un agent du côté de l'interface au moment opportun. La figure 8.4 présente un extrait d'un code XML utilisé pour afficher une question.

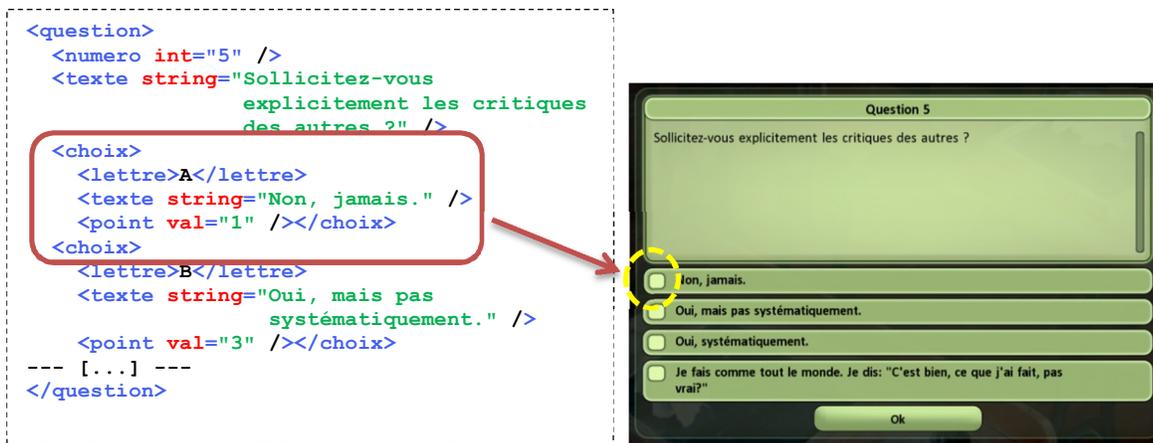


Figure 8.4 – Affichage d'une question dans l'interface à partir de données XML

Évidemment, la possibilité de pouvoir démarrer une leçon ou les questions qui y sont associées est déterminé par une liste de prérequis en XML présentée dans la prochaine section.

8.1.2.2. Créer la liste des prérequis pour les leçons

Comme nous venons de voir, nous avons des leçons dans des dossiers physiquement séparés et des questions dans des fichiers XML. Les règles permettant d'établir le passage entre une leçon et une autre sont inscrites manuellement dans un fichier XML, dont un extrait est illustré sur la figure 8.5.

```

<lesson>
  <name>Lesson 1</name>
  <agent>JTutorAgent</agent>
  <completed viewed="10" score="79" repeat="1" />
  <requirements>
    <sameas></sameas>
  </requirements>
</lesson>
<lesson>
  <name>Lesson 2</name>
  <agent>JTutorAgent</agent>
  <completed viewed="15" score="70" repeat="2" />
  <requirements>
    <sameas>Lesson 1</sameas>
    <sameas>Questions 1</sameas>
  </requirements>
</lesson>
-----[...]-
<question>
  <name>Questions 1</name>
  <agent>JTutorAgent</agent>
  <completed viewed="" score="" repeat="0" />
  <requirements>
    <sameas>Lesson 1</sameas>
  </requirements>

```

La leçon 1 est considérée comme réussie si l'apprenant a vu au moins 10% de la matière et ayant obtenu 79% aux questions de celle-ci. De plus, l'apprenant ne peut répéter la leçon qu'une seule fois.

Pour passer à la leçon 2, il faut avoir réussi les critères de la leçon 1 (présentés plus haut) et avoir répondu aux questions de la leçon 1. Pour la leçon 3, il faut avoir suivi 15% de la leçon 2 et avoir obtenu 70%. Et ainsi de suite.

Pour passer aux questions de la leçon 1, il faut avoir au moins réussi les prérequis de la leçon 1 (présentées plus haut). De plus, on ne peut pas répéter les questions plus d'une fois (repeat=0)

Figure 8.5 – Extrait de règles pré-requises provenant du serveur et traitées par l'interface

Cette planification en termes de prérequis et seuils de passage d'une leçon à une autre est indiquée dans le fichier XML sur le serveur. En premier temps, l'agent Expert va lire cette série de règles et former une liste de directives qui est envoyée à l'interface. Ensuite, du côté de l'interface, un agent s'occupera de lire cette liste de directives et l'interpréter à l'écran.

8.1.3. Appliquer des stratégies pédagogiques

Nous avons vu dans la précédente section que l'agent Expert lit la liste de règles décrites sur la partie gauche de la figure 8.7 et forme une liste de directives qui est transmise à l'interface. Ce qu'il faut ajouter ici est que l'agent Tuteur peut intervenir du côté serveur et modifier ces règles s'il juge nécessaire. En effet, l'interface du côté client suit le progrès des apprenants et transfère l'information aux agents du côté serveur pour mettre à jour le profil de l'apprenant. Suite à ce transfert, l'interface demande une liste à jour d'instructions. C'est à ce moment que l'agent Tuteur peut intervenir en fonction des besoins de l'apprenant et modifier la liste d'instruction transmise. Prenons un exemple pour illustrer cela.

L'apprenant suit la leçon 1 avec les règles initiales suivantes (`<completed viewed="45" score="79" repeat="1" />`). À la fin de la leçon, on s'aperçoit que l'apprenant ne regarde que 30% de la matière, lit un peu lentement chaque transparent et obtient une note de 55% aux questions de cette leçon. Le tuteur peut donc intervenir à ce moment et décider d'assouplir les

règles. Lors de la mise à jour du profil de l'apprenant, l'agent Tuteur interceptera le fichier XML et apportera les modifications suivantes :

```
<name>Lesson 1</name> <completed viewed="45" score="79" repeat="1" />
```

devient

```
<name>Lesson 1</name> <completed viewed="60" score="72" repeat="2" />
```

En assouplissant les prérequis de la leçon, en augmentant le pourcentage minimal de visionnement et le nombre de répétitions, on permet d'adapter la matière en fonction du profil de l'apprenant. Cet exemple relativement simpliste permet de montrer l'indépendance des agents et la facilité avec laquelle on peut prendre des décisions dans le système. En plus de ce dynamisme d'interprétation de règles, nous pouvons aussi adapter les interventions en fonction du contexte, en offrant par exemple une aide personnalisée en fonction de la situation.

Au-delà de l'aide textuelle, une autre intervention que le système peut effectuer de façon dynamique est l'application de l'amorçage cognitif. Nous présentons cela à la prochaine section.

8.1.4. Appliquer l'amorçage cognitif

Les résultats de nos travaux ont bien démontré les bienfaits de l'amorçage cognitif pour l'apprentissage et plus particulièrement pour l'induction de la connaissance. Nous avons implémenté un agent autonome du côté de l'interface (donc du client) et non du côté serveur pour gérer l'amorçage. Cette décision est basée sur le fait que les amorces sont d'une durée très courte et doivent conséquemment être gérées du côté client. Ce que notre agent va faire est de prendre le fichier XML discuté sur la figure 8.3 contenant les directives pour les leçons et placer ces amorces à des endroits désirés entre les images. La figure 8.6 résume le processus.

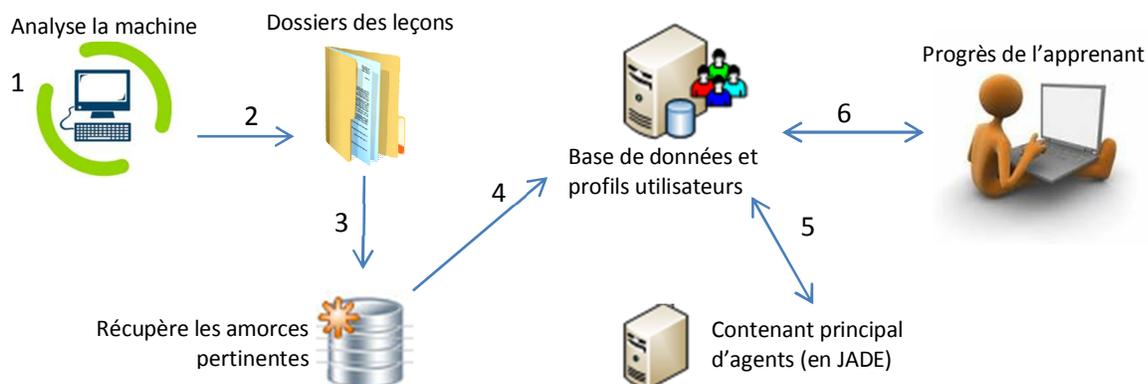


Figure 8.6 – Entités sollicitées par l'agent subliminal

En premier lieu, l'agent subliminal analyse le système client afin d'ajuster les vitesses de projections des stimuli subliminaux en fonction des capacités techniques de la machine en cours (1). L'agent que nous avons mis en place est capable de projeter des images à la vitesse dictée par les fondements neuroscientifiques de la perception subliminale présentés au chapitre 1. Cette vitesse est calibrée en fonction du taux de rafraîchissement et de la résolution de l'écran. Même si nous sommes conscients que les écrans à cristaux liquides ne fonctionnent pas « réellement » avec le taux de rafraîchissement car ils ne possèdent pas de tube cathodique, il n'en demeure pas moins que les cartes graphiques respectent ce taux de rafraîchissement et effectue le balayage à l'écran en conséquence, c'est-à-dire rafraîchissent l'écran à la fréquence de la résolution actuelle. Ensuite, celui-ci récupère les dossiers des leçons (2) puis les amorces pertinentes de sa base de données (3) pour les appliquer aux leçons. Ces informations sont ensuite enregistrées dans la base de données des profils utilisateurs du côté serveur de l'application (4).

Ceci nécessite bien entendu une communication entre les agents (5) responsables de cela du côté de JADE. De plus, l'agent subliminal devra constamment échanger avec les autres agents afin d'être à l'affût des modifications de l'apprenant qui sont mises à jour dans la base de données. Les informations conservées sur les apprenants sont nombreuses et contiennent notamment des données physiologiques (6). L'agent subliminal utilise toutes ces informations à jour pour adapter les amorces en fonction des cibles pédagogiques à atteindre. Toutes ces communications permettront d'obtenir le résultat présenté dans la thèse :

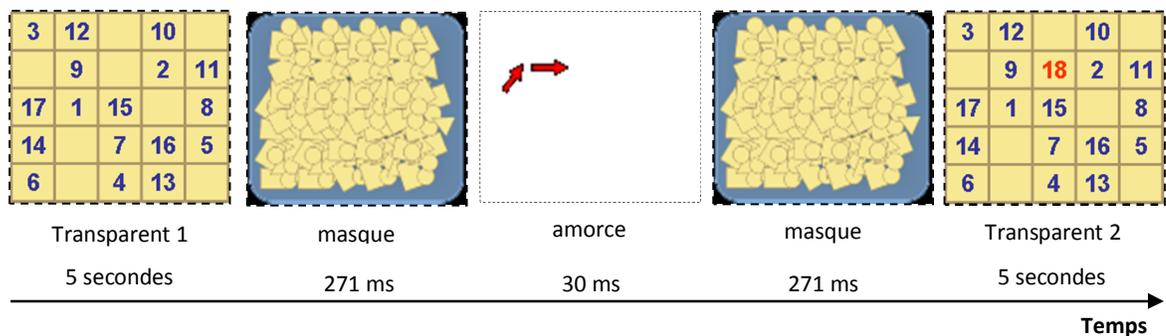


Figure 8.7 – Un exemple d'amorçage cognitif pour CHARLIE

Afin d'intégrer l'agent subliminal dans notre ITS de façon harmonieuse, nous avons aussi programmé l'agent responsable de l'affichage de la matière afin de ne pas faire de distinction entre une image projetée normalement et une image projetée de façon subliminale. L'agent Leçon dans l'interface ne fait pas de distinction entre une image normale et subliminale et se contente d'afficher une image à la vitesse qu'on lui demande.

Pour l'instant, le processus d'amorçage cognitif est codé de façon manuelle dans un fichier XML avec les vitesses de projections, les masques requis et la position de projection des amorces entre les transparents pour chaque cours. Nous pensons automatiser prochainement ce processus. La prochaine section présente la cinquième fonctionnalité de notre système.

8.1.5. Modéliser l'apprenant

Nous avons vu jusqu'à présent les trois premières fonctionnalités de notre système : créer des leçons, ordonner la matière et appliquer des stratégies pédagogiques. Il est clair que les deux dernières fonctionnalités dépendent grandement de la modélisation que l'on fait de l'apprenant. Nous avons donc bâti un système d'authentification et de suivi basé sur des fichiers XML. Nous décrivons dans un premier temps la gestion de l'authentification et présentons un exemple de suivi des résultats.

8.1.5.1. Authentifier et ajouter des apprenants

Au démarrage de notre système, l'apprenant a le choix de s'authentifier, de créer un nouvel utilisateur, de demander de l'aide ou de quitter. Dans le cas de l'inscription, on demande à l'apprenant de fournir quelques renseignements de base tels que son nom d'utilisateur, son nom, son prénom et un mot de passe pour son compte. Les agents contrôleurs s'échangeront les informations entrées afin de valider son inscription. Par validation, on entend la présence d'un autre apprenant avec le même nom d'utilisateur. Dans un tel cas, on précise le tout à l'utilisateur dans une boîte de texte en lui demandant de choisir un nouvel identifiant. Pour ce qui est de valider un apprenant déjà existant, rien de très compliqué : on demande son nom d'utilisateur et son mot de passe et toute information erronée est présentée à l'écran. On peut voir un exemple illustré sur la figure 8.8.

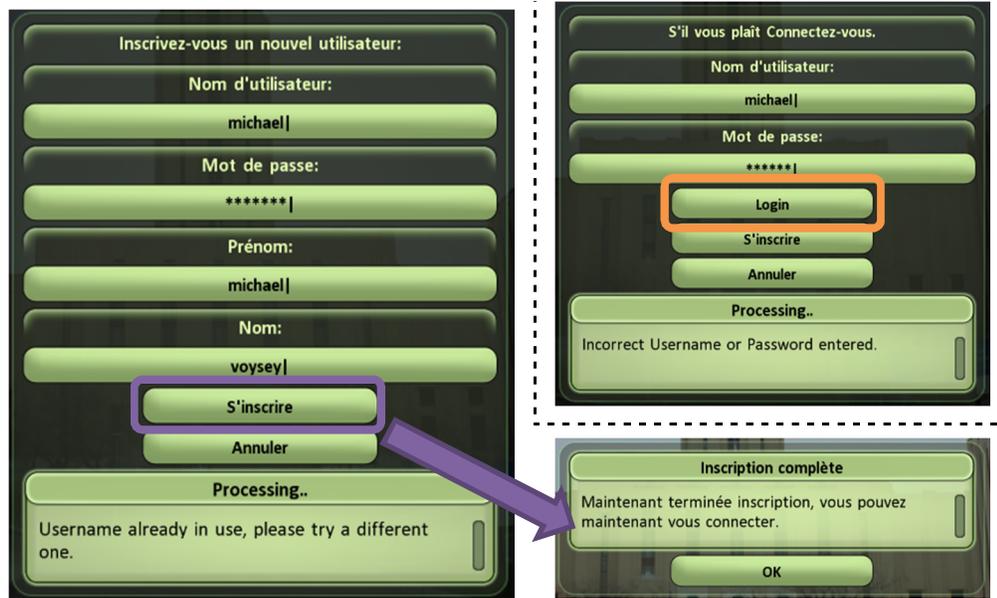


Figure 8.8 – Deux scénarios pour l'authentification

Une fois l'inscription terminée ou l'authentification validée, l'apprenant est amené au menu principal de notre système où il a le choix entre suivre une leçon, répondre à des questions, voir ses résultats, demander de l'aide ou se déconnecter du système. Dans ce cas, si l'apprenant décide de répondre à des questions, l'interface suivra son progrès tout au long de la séance de questions et enregistrera son progrès dans un fichier XML. Ce processus est présenté dans la prochaine section.

8.1.5.2. Suivi des résultats

Dans notre système, la connexion d'un apprenant est immédiatement signalée au serveur et celui-ci transmet le profil actuel de l'apprenant à l'interface. L'interface a comme but d'enregistrer tout ce que l'apprenant fait et transférer ensuite les résultats au serveur pour mise à jour immédiate des résultats dans le profil de celui-ci. Cette opération permet de garder un profil à jour et d'adapter les stratégies pédagogiques à appliquer tel qu'expliqué précédemment. L'interface utilise donc les fichiers XML pour conserver le détail des variables psychométriques pour les questions suivies : le numéro de la question, la leçon correspondante, la réponse choisie, le nombre de points associé (le cas échéant) et le temps de réponse pour chaque question. Le même principe s'applique également pour les leçons. On sauvegarde dans le profil de l'apprenant le nombre de fois qu'il a suivi la leçon, la note obtenue aux questions (le cas échéant) ainsi que le

nombre de questions auquel il a répondu et le temps pris pour terminer la leçon. Un aperçu de cela est illustré sur la figure 8.9.

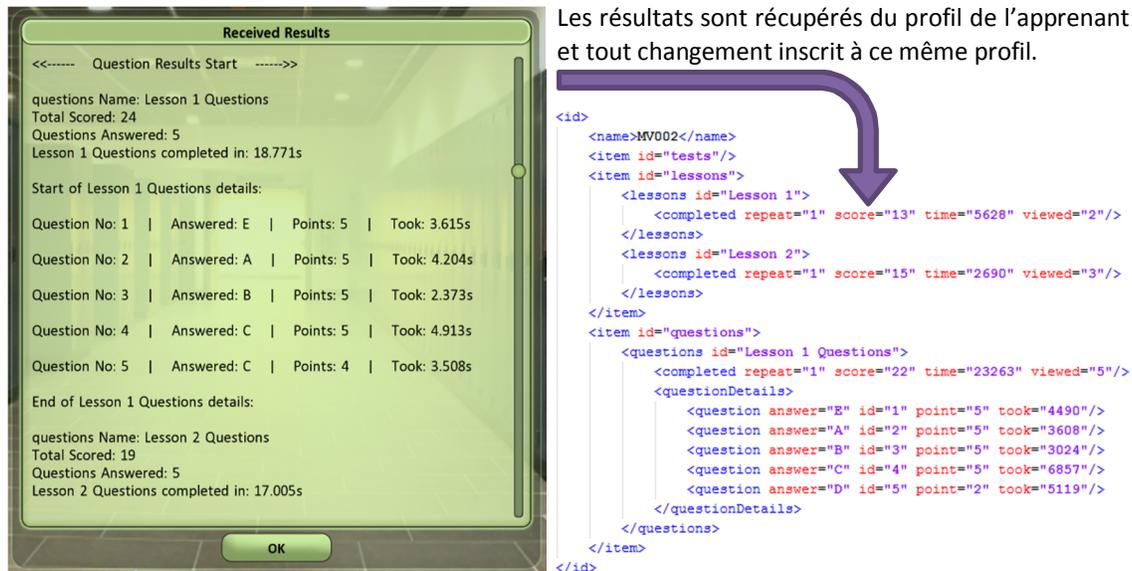


Figure 8.9 – Sauvegarde des résultats sur le serveur et leur affichage dans l'interface

Cette façon de faire permet à notre système de présenter les résultats les plus à jour de l'apprenant. De plus, les résultats étant centralisés sur le serveur, le tuteur pourrait même décider de fournir des résultats comparatifs pour cet apprenant par rapport aux autres apprenants connectés sur le système sans dévoiler leurs identités. Cette flexibilité est possible grâce à la séparation de l'interface et des agents intelligents côté serveur.

En plus des résultats psychométriques, nous avons mis sur pied un module d'affichage des données biométriques. Les données affichées sont transmises aux agents afin qu'ils puissent effectuer des décisions pédagogiques en conséquence.

8.1.5.3. Traitement des données biométriques

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes intéressés à analyser les données émotionnelles et cérébrales des apprenants. Nous avons intégré un module capable d'afficher des données biométriques aux apprenants du côté client et transmettre ces données aux agents du côté serveur. Ce module fonctionne de façon autonome et opère en parallèle au système. C'est un module complémentaire qu'on peut appeler au besoin. Ainsi, lorsque les capteurs biométriques seront analysés et traités du côté client, les résultats pourraient être facilement affichés à la

demande de l'apprenant. On peut apercevoir sur la figure 8.10 un exemple de données biométriques pendant une navigation dans un environnement virtuel de test.

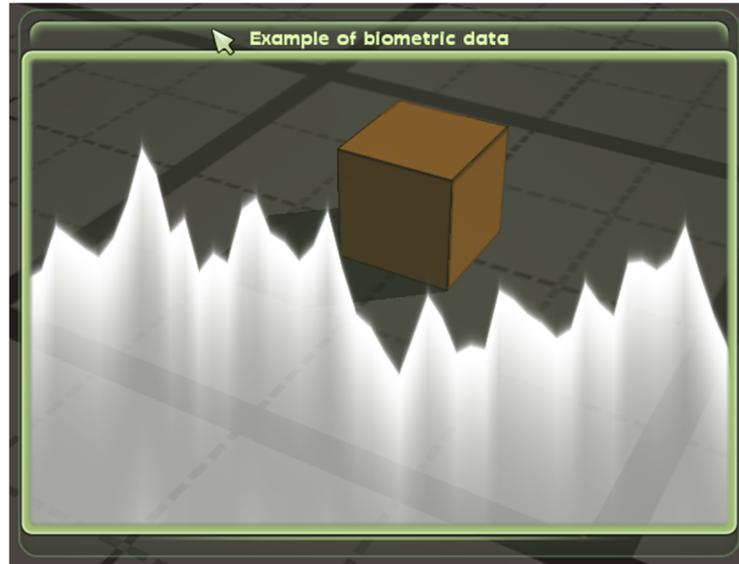


Figure 8.10 – Extrait de données cérébrales traitées en parallèle à l'utilisation du système

Les données biométriques doivent être analysées dans un module indépendant du côté du client pour ne pas interférer avec les interactions de l'utilisateur. C'est la raison pour laquelle le traitement de signal et tous les algorithmes qui y sont associés seront exécutés du côté client pour profiter de la force de calcul et éviter de surcharger le serveur avec des données biométriques. Nous pouvons par contre facilement transmettre le résultat de ce traitement au serveur pour permettre aux agents d'adapter convenablement l'affichage de la matière en fonction de l'état affectif et cérébral observé.

Toutes les opérations présentées jusque-là seront enregistrées dans des fichiers journaux. C'est cette sixième fonctionnalité de notre système qui est décrite dans la prochaine section.

8.1.6. Enregistrer les opérations

Nous avons décidé d'utiliser plusieurs fichiers journaux dans notre système. Du côté du serveur, l'agent contrôleur est le responsable de la création d'un fichier journal global enregistrant tous les échanges entre les agents. On voit un extrait de ce fichier sur la figure 8.11. Cet agent central à toutes les communications reçues et envoyées est bien placé pour garder un suivi plus général pour nous permettre d'analyser les problèmes de façon plus globale. Par contre, nous ne nous sommes pas arrêtés là. En plus du fichier global, chaque agent dans l'interface conservera à son tour un fichier de toutes les communications reçues et envoyées. Ce fichier, beaucoup plus

détaillé, nous servira de guide en cas de problèmes ou simplement pour une analyse détaillée hors ligne du comportement de l'apprenant.

```

| <----- START OF LOGFILE ----->
Master MAS Log Started: 22/06/2012 | 16:55:54:571
Message Date:      From:      To:      Message Type:      Conversation ID:      Message Contents:
22/06/2012 | 16:55:55:530 | Agent Started: JControllerAgent
22/06/2012 | 16:56:10:355 | Agent Started: JTCPServerAgent
22/06/2012 | 16:56:10:513 | Agent Started: JLearnerAgent
22/06/2012 | 16:56:10:698 | Agent Started: JDatabaseAgent
22/06/2012 | 16:56:10:747 | Agent Started: JTutorAgent
22/06/2012 | 16:56:10:877 | Agent Started: JExpertAgent
22/06/2012 | 16:56:16:465 | cControllerAgent | JTCPServerAgent | INFORM | client_0062552 | <getHelp>MenuIt
22/06/2012 | 16:56:16:467 | JTCPServerAgent | JControllerAgent | INFORM | client_0062552 | <getHelp>MenuIt
22/06/2012 | 16:56:16:475 | JControllerAgent | JTutorAgent | INFORM | client_0062552 | <getHelp>MenuItem
22/06/2012 | 16:56:16:483 | JTutorAgent | JControllerAgent | INFORM | client_0062552 | msgType: MSGTOCLIEN
22/06/2012 | 16:56:16:504 | JControllerAgent | JTCPServerAgent | INFORM | client_0062552 | msgType: MSGTOC
22/06/2012 | 16:56:16:516 | JTCPServerAgent | cControllerAgent | INFORM | client_0062552 | msgType: MSGTOC
22/06/2012 | 16:56:34:201 | Agent Stopped: JExpertAgent
22/06/2012 | 16:56:34:201 | Agent Stopped: JLearnerAgent
22/06/2012 | 16:56:34:207 | Agent Stopped: JDatabaseAgent
22/06/2012 | 16:56:34:207 | Agent Stopped: JTutorAgent
22/06/2012 | 16:56:34:213 | Agent Stopped: JTCPServerAgent
22/06/2012 | 16:56:39:231 | Agent Stopped: JControllerAgent
| <----- END OF LOGFILE @ 22/06/2012 | 16:56:39:232 ----->

```

Figure 8.11 – Fichier journal global pour toutes les opérations sur le serveur (Java)

Il faut mentionner que les fichiers journaux du côté du serveur se réfèrent tous au numéro d'identification d'un client (client_0062552). Ce numéro unique est généré par le serveur et attribuable à chaque apprenant se connectant sur le serveur. De cette façon, les agents savent à qui parler et communiquer l'information.

Du côté du client, les informations enregistrées dans les fichiers journaux sont légèrement différentes de par la nature des communications. En effet, le moteur Ogre3D utilisé dans notre système possède sa propre mécanique de gestion de fichiers journaux que nous avons modifiée pour l'adapter à nos besoins. Ainsi, nous avons employé une méthode de synchronisation d'horloge avec le serveur pour enregistrer les interactions du système avec l'utilisateur (clic de boutons, demande d'aide, etc.). Nous avons également utilisé cette même horloge synchronisée pour enregistrer les données biométriques dans un fichier séparé pour chaque apprenant car ce type de fichier journal est souvent excessivement long et volumineux. Pour les données cérébrales, on pourrait avoir, dépendamment de l'encodeur utilisé, jusqu'à 256 lignes de données pour une région cérébrale par seconde.

```
<<----- START OF LOGFILE ----->>
Master Interface Log Started: 22/06/2012|16:55:44:142
Log Date:          Log Details:
22/06/2012|16:55:44:143|***** OGRE starting up *****
22/06/2012|16:55:44:143|***** OGRE Setting up Resources *****
22/06/2012|16:55:52:625|Get clientID: client_0062552
22/06/2012|16:55:52:626|***** OGRE Resources Loaded *****
22/06/2012|16:55:52:626|***** OGRE Setup Completed *****
22/06/2012|16:55:52:770|***** OGRE Starting rendering *****
22/06/2012|16:56:16:309|Help requested for the login menu.
22/06/2012|16:56:16:310|Starting the get help message process for: MenuItem
22/06/2012|16:56:16:311|Sending get help request to server
22/06/2012|16:56:16:457|Sending message to server msgType: GET_HELP message
22/06/2012|16:56:18:492|Received a reply matching: msgFor:HELP_DETAILS
msgType: MSGTOCLIENT msgFor:HELP_DETAILS HELP_PROCESSED <helpDetails>Help r
22/06/2012|16:56:18:511|Got Help received: Help message from java. This is
22/06/2012|16:56:24:004|Button: okDetailsMsg was hit.
22/06/2012|16:56:25:434|User clicked on login exit button
<<----- END OF LOGFILE @ 22/06/2012|16:56:27:243 ----->>
```

Figure 8.12 – Fichier journal global pour toutes les opérations sur le client (C++)

Dans tous les fichiers journaux utilisés du côté serveur, on utilise une classe Singleton pour gérer l'horloge et la synchronisation de celle-ci avec les clients. Ainsi, toutes les estampilles temporelles sont cohérentes et comparables.

8.2. Conclusion

Ce chapitre a présenté un nouveau genre de STI à base de multi-agents en architecture client-serveur intégrant un agent subliminal pour améliorer l'apprentissage tel que démontré tout au long de cette thèse. Nous pensons que l'ajout de la dimension biométrique et le suivi en temps réel permettront de rapidement prototyper les futures expériences et collecte de données afin de nous permettre de tester notre nouvelle méthode d'amorçage dans des conditions plus variées et de plus en plus complexes afin de poursuivre notre investigation des mécanismes de l'inconscient cognitif.

CHAPITRE 9

Discussion générale et conclusion

Sommaire

9.1. CONTRIBUTION POUR LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE	167
9.2. TRAVAUX FUTURS	169

Durant cette thèse, des mécanismes inconscients impliqués dans l'apprentissage, plus particulièrement le raisonnement humain, ont été investigués.

Dans la première partie traitant de l'apprentissage, deux objectifs ont été réalisés suite à la première étude menée. Le premier est la mise au point d'une nouvelle méthode basée sur l'amorçage cognitif qui améliore l'apprentissage de façon générale. Le second est l'utilisation de la biométrie pour mesurer les émotions lors de l'utilisation de la méthode d'amorçage, tout en montrant que les amorces semblent avoir un impact positif sur les états émotionnels des apprenants. Notre amorçage cognitif est une implémentation de la taxonomie de la perception subliminale en neurosciences [73] que nous avons adaptée au domaine éducatif.

Dans une deuxième partie, une version enrichie de la précédente méthode à base d'amorçage cognitif a été proposée pour améliorer l'induction de la connaissance de façon plus précise. Deux objectifs ont également été réalisés par l'entremise des résultats de la deuxième étude. D'une part, nous avons démontré que l'amorçage cognitif améliorerait significativement l'induction de la connaissance. D'autre part, nous avons utilisé des capteurs biométriques capable d'investiguer des processus cérébraux et par le même fait nous avons établis des métriques d'asymétries cérébrales capables de distinguer entre deux types de raisonnement différents lors de l'acquisition de la connaissance.

Ces deux preuves de concept validées expérimentalement sont les contributions majeures réalisées durant les travaux de cette thèse. La création d'un nouvel agent subliminal dans un STI implémentant ces preuves de concepts représente une troisième contribution néanmoins originale.

Dans cette dernière partie, nous considérons ces apports sous différentes perspectives afin de mieux comprendre l'intérêt qu'ils peuvent représenter pour la communauté scientifique, avant de conclure sur des travaux futurs.

9.1. Contribution pour la communauté scientifique

Les deux études menées dans cette thèse ont deux points communs : (1) l'étude des mécanismes de l'inconscient cognitif en lien avec l'apprentissage et (2) la mesure des réactions émotionnelles et cérébrales des apprenants par la biométrie en lien avec ces mécanismes inconscients. Les mécanismes sur lesquels nous avons porté notre attention sont ceux du raisonnement, plus particulièrement l'induction de la connaissance, le tout dans un contexte de résolution de problème.

Pour le premier point commun, nous avons amélioré les mécanismes du raisonnement pour l'apprentissage général et pour l'induction de la connaissance en mettant au point une méthode appelée amorçage cognitif inspirée de travaux en neurosciences de la perception. Nos travaux ont non seulement montré l'impact positif de notre méthode sur l'apprentissage, mais les résultats de nos études sont les premiers à avoir démontré qu'il est possible d'utiliser ce type d'amorçage pour résoudre des problèmes plus complexes que ceux cités dans la littérature neuroscientifique.

Pour le second point commun, nous avons montré qu'il était possible de mesurer l'impact d'amorces cognitives sur les émotions et le raisonnement par des capteurs biométriques (EEG, GSR, BVP). En plus d'avoir utilisé des métriques (asymétries cérébrales) permettant de distinguer entre un raisonnement logique et un raisonnement intuitif, les résultats de nos recherches ont démontré que les asymétries cérébrales peuvent également fournir une information de nature émotionnelle permettant d'expliquer le cheminement du raisonnement d'un apprenant en cours d'apprentissage.

Un autre fait intéressant à noter dans nos résultats est l'influence des amorces sur les états émotionnels et cognitifs. Le chapitre 4 et le chapitre 7 ont présenté et commenté des résultats montrant non seulement une amélioration claire de l'acquisition de la connaissance par l'amorçage cognitif, mais aussi une amélioration positive de l'amorce *Réponse* sur les états émotionnels et cognitifs des apprenants.

Une dernière contribution d'ordre technique a été apportée dans cette thèse. Nous avons mis sur pied un système tutoriel intelligent multi-agent fonctionnel intégrant les résultats de cette recherche. La particularité de ce STI est qu'il est codé uniquement avec des logiciels libres. En effet, Ogre3D, JADE et TinyXML sont des bibliothèques gratuites. La distribution future de ce STI est donc grandement facilitée par les choix que nous avons effectués depuis le début des travaux. Dans ce système client-serveur, plusieurs utilisateurs peuvent se connecter et suivre des sessions en parallèle. Les agents autonomes codés en JADE permettent une plus grande flexibilité d'utilisation et une meilleure personnalisation de l'enseignement. Nous trouvons dommage que chaque équipe dans notre domaine travaillant sur des problématiques affectives ait son propre STI fermé. Nous espérons pouvoir continuer à développer CHARLIE, terminer de coder les composantes importantes et publier son architecture dans une revue à venir. Une fois fait, nous songeons à le rendre disponible au membres du laboratoire et à la communauté internationale sous une licence « GNU General Public License » [174]. Nous pensons que ce geste permettrait

aux autres équipes d'évaluer CHARLIE, de l'enrichir et de le comparer à leurs systèmes afin d'harmoniser nos méthodes de travail et partager les idées pour de futures améliorations.

9.2. Travaux futurs

Deux axes pertinents comme futurs directions de recherche émergent de nos travaux. Tout d'abord, les questions sur la modalité de l'amorçage en lien avec le niveau de complexité de la leçon choisie. Il est vrai que nous avons employé uniquement des images pour amorcer le raisonnement puisque la tâche enseignée est une tâche visuelle complexe, mais pas compliquée.

Une première avenue possible de travaux futurs serait de déterminer les différents niveaux de complexité pour lesquels les amorces visuelles pourraient cesser de fonctionner. On peut imaginer par exemple une leçon plus compliquée que le carré magique présenté qui impliquerait un raisonnement visuel et spatial par exemple, comme l'enseignement de la chimie. Il serait intéressant d'explorer l'efficacité des amorces dans un tel contexte. Nous pensons que la méthode que nous avons proposée est fortement adaptée aux tâches visuelles, mais pourrait devenir déficiente si utilisée de manière exclusive. C'est la raison pour laquelle les stratégies actuelles dans les STI demeurent toujours d'actualité, mais nous voyons d'un bon œil notre méthode d'enseignement subliminale comme un ajout intéressant aux tuteurs actuels. À ce sujet, Mme Jraidi propose dans sa thèse d'établir des stratégies implicites pour les STI [175]. Nous pensons que cette avenue de recherche est fort pertinente pour la communauté en plus d'être très complémentaire à nos idées de recherche et travaux futurs.

Le second axe que nous voyons serait l'investigation des deux amorces utilisées, soit *Réponse* et *Erreur*. Pour le moment, nous avons observé que les amorces *Réponse* semblent avoir un effet très positif sur le raisonnement, mais plus particulièrement lorsque ce raisonnement devient plus complexe. Il serait pertinent d'étudier l'efficacité de ces amorces en fonction du degré de complexité des leçons. Pour ce qui est des amorces *Erreur*, on a remarqué que celles-ci ne semblaient pas « perturber » le raisonnement en soi de façon significative, mais il n'en demeure pas moins que leur utilisation mériterait une investigation plus approfondie afin d'identifier les situations potentielles où ces amorces pourraient effectivement nuire au raisonnement.

Ces deux avenues de recherches, en plus de la finalisation de notre STI nommé CHARLIE, nous semblent être les pistes les plus prometteuses pour la suite éventuelle de nos travaux.

Diffusion scientifique de la recherche

Nous soulignons dans cette section le résultat de la diffusion des travaux de cette recherche dans plusieurs médiums scientifiques :

Articles de revues

- 2012** Riener, A., **Chalfoun, P.**, Frasson, C. (**soumis**). Potential of subliminal information displays to change drivers' behaviour. **IEEE Pervasive Computing, Special Issue on Human Behavior Analysis for Inducing Behavior** (PCSI-2012-09-0066).
- 2011** **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Subliminal cues while teaching: HCI technique for enhanced learning. **Advances in Human Computer Interaction: Special Issue on Subliminal Communication in Human-Computer Interaction**. vol. 2011, Article ID 968753, 15 pages, pp. 21-25.
- 2008** **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Subliminal priming enhances learning in a distant virtual 3D Intelligent Tutoring System **IEEE Technology and Engineering Education (ITEE): Special Issue on Intelligent Tutoring Systems**, Vol. 3, No. 4, pp 125-130.

Articles de conférences internationales avec jury

- 2012** Jraidi, I, **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Implicit Strategies for Intelligent Tutoring Systems. **The 11th International Conference On Intelligent Tutoring Systems (ITS 2012)**. Chania, Crete. June 14-18. (*taux d'acceptation de 16%*).

NB : ce papier écrit en collaboration avec Mme Imène Jraidi dans le cadre de son sujet de thèse portant sur les stratégies implicites. Le tiers de l'article porte sur les travaux de cette thèse, l'autre tiers sur les travaux de Mme Jraidi et le dernier tiers sur une plateforme commune à nos deux sujets.

- 2012** **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Cognitive priming: assessing the use of non-conscious perception to enhance learner's reasoning ability. **The 11th International Conference On Intelligent Tutoring Systems (ITS 2012)**. Chania, Crete. June 14-18. (*papier court*).
- 2010** **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Showing the positive influence of subliminal cues on learner's performance and intuition: an ERP study. **The 10th International Conference On Intelligent Tutoring Systems (ITS 2010)**, Springer Verlag. Pittsburg, USA. June 14-18 2010. (*papier court*)
- 2009** **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Optimal Affective Conditions for Subconscious Learning in a 3D Intelligent Tutoring System. **13th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2009)**, San Diego, CA, USA. July 19-24 2009.
- 2008** **Chalfoun, P.**, Frasson, C. Subliminal Priming Enhances Learning and Performance in a Distant 3D Virtual Intelligent Tutoring System. **AACE World Conference on E-learning in Corporate, Government, Healthcare, & Higher Education (E-LEARN 2008)**, Las Vegas, USA, Nov. 17-21, 2008.

2008 Chalfoun, P., Frasson, C. Positive emotional impact and increase in performance observed in a 3D subliminal teaching ITS. **Workshop on Emotional and Cognitive Issues in ITS at the International Conference on Intelligent Tutoring System (ITS 2008)**, Montreal , Canada , June 2008.

2008 Chalfoun, P., Frasson, C. Subliminal priming enhances learning in a distant virtual 3D Intelligent Tutoring System. **Young Research Track (YRT) at the International Conference on Intelligent Tutoring System (ITS 2008)**, Montreal , Canada , June 2008.

NB : ce papier a été sélectionné parmi les meilleurs papiers de la session « Young Research Track » pour une version étendue en revue.

Chapitre de livre

2010 Frasson, C., Chalfoun, P. Managing Learner's Affective States in Intelligent Tutoring Systems. In R. Nkambou, R. Mizoguchi, and J. Bourdeau (Eds), **Advances in Intelligent Tutoring Systems**. Springer. pp. 339-358.

Ateliers

2012 Co-organisation d'un atelier portant sur le phénomène de la perception subliminale pour les environnements intelligents ("Ubiquitous environments"). Cet atelier a été accepté à la plus prestigieuse conférence de ce domaine (UBIComp 2012).

Titre de l'atelier: "Workshop on Methodical approaches to prove the effects of subliminal perception in Ubiquitous Computing Environments"

Conférence: The 14th ACM International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP)

Organisateurs: Andreas Reiner, Myoungsoon Jeon, Miriam Reiner, **Pierre Chalfoun**

Conférencier invité

2011 Présentation de nos travaux sur la biométrie et des capteurs utilisés dans cette thèse aux étudiants et professeurs du programme de doctorat en sciences cognitive (DIC) à l'université du Québec à Montréal (UQAM).

Titre de la présentation: "Signaler avec discrétion, mais discrétiser avec intérêt. Apport des capteurs physiologiques aux systèmes tutoriels."

Conférencier: Pierre Chalfoun

Bibliographie

- [1] Classroom Learning and respect. 2012; Available from: <http://vclassroom.net>.
 - [2] Wikipedia. 2012; Available from: <http://fr.wikipedia.org/>.
 - [3] Sleeman, D. and J. Brown, *Intelligent tutoring systems*. 1982: Academic Press.
 - [4] Psotka, J. and S.A. Mutter, *Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned*. . 1988: Lawrence Erlbaum Associates.
 - [5] Wenger, E., *Artificial Intelligence and Tutoring Systems : Computational and cognitive approaches to the communication of knowledge*. 1987: Morgan Kauffman.
 - [6] Johnson, L.W., J.W. Rickel and J.C. Lester, Animated Pedagogical Agents: Face-to-Face Interaction in Interactive Learning Environments. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 2000. 11: p. 47-78.
 - [7] Nkambou, R. and Y. Laporte, Producing Non-verbal Output for an Embodied Agent in an Intelligent Tutoring System, in Proceedings of the International Conference on Computational Science-Part II2001, Springer Berlin / Heidelberg. p. 366-376.
 - [8] Kort, B. and R. Reilly, An Affective Module for an Intelligent Tutoring System, in Intelligent Tutoring Systems, S. Cerri, G. Gouardères, and F. Paraguaçu, Editors. 2002, Springer Berlin / Heidelberg. p. 955-962.
 - [9] Faivre, J., R. Nkambou and C. Frasson, Toward Empathic Agents in Tutoring Systems, in FLAIRS2003, AAAI Press: Florida, USA.
 - [10] Litman, D. and K. Forbes. Recognizing emotions from student speech in tutoring dialogues. in Automatic Speech Recognition and Understanding, 2003. ASRU '03. 2003 IEEE Workshop on. 2003.
 - [11] Ochs, M. and C. Frasson, Emotionally Intelligent Tutoring System, in The 17th International FLAIRS Conference2004: Florida, USA.
 - [12] Ferrero, T., The influence of affective processing in education and training. *New Directions for Adult and Continuing Education*, 1995. 59: p. 25-33.
 - [13] Martinez, M., Key design considerations for personalized learning on the Web. *Educational Technology and Society*, 2001. 4(1): p. 26-40.
 - [14] Boud, D., R. Cohen and D. Walker, Introduction: Understanding learning from experience, in Using Experience for Learning, S.O.U. Press, Editor. 1993: Buckingham. p. 1-18.
 - [15] Levin, F.M., *Emotion and the Psychodynamics of the Cerebellum: A Neuro-Psychoanalytic Analysis and Synthesis*. . 2009, London, UK: Karnac Books.
 - [16] Damasio, A., *Descarte's Error - Emotion, Reason and the Human Brain*. 1994, New York: Putman Press.
 - [17] Phelps, E.A., Emotion and cognition : Insights from Studies of the Human Amygdala. *Annual Review Psychology*, 2006. 57: p. 27-53.
 - [18] Mandler, G., Emotion, in Cognitive science. Handbook of perception and cognition 2nd ed., B.M.B.D.E. Rumelhart, Editor. 1999, Academic Press: San Diego, CA. p. 367-384.
 - [19] Picard, R.W., *Affective Computing*. 1997, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
 - [20] Picard, R.W., J. Healey and E. Vyzas, Toward Machine Emotional Intelligence Analysis of Affective Physiological State. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001. 23: p. 1175-1191.
-

-
- [21] Conati, C. and H. Maclaren, Data-driven refinement of a probabilistic model of user affect., in *User Modeling2005: New-York*. p. 40-49.
- [22] McQuiggan, S. and J. Lester. Learning Empathy: a data driven framework for modeling empathetic companion agents. in *Proceedings of the 5 th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agents Systems*. 2006.
- [23] DiMello, S.K., R. Taylor and A.C. Graesser, Monitoring Affective Trajectories during Complex Learning, in *Proceedings of the 29th Annual Cognitive Science Society, D.S.M.J.G. Trafton, Editor 2007: Austin, TX*. p. 203-208.
- [24] D'Mello, S.K., et al., Integrating Affect Sensors in an Intelligent Tutoring System, in *Workshop at 2005 International conference on Intelligent User Interfaces2005*. p. 7-13.
- [25] Graesser, A., et al., AutoTutor: an intelligent tutoring system with mixed-initiative dialogue *IEEE Transactions on Education*, 2005. 48(4): p. 612-618.
- [26] Burleson, W., Affective Learning Companions: Strategies for Empathetic Agents with Real-Time Multimodal Affective Sensing to Foster Meta-Cognitive Approaches to Learning, Motivation, and Perseverance, in *Program In Media Arts and Sciences2006, Massachusetts Institute of Technology*.
- [27] Healey, J.A. Affect detection in the real world: Recording and processing physiological signals. in *3rd International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops. ACII 2009*. . 2009.
- [28] Arroyo, I., et al., Emotion Sensors go to School, in *Proceedings of 14th International Conference on Artificial Intelligence in Education2009, IOS Press: England*.
- [29] Dragon, T., et al., Viewing Student Affect and Learning through Classroom Observation and Physical Sensors. *Intelligent Tutoring Systems, B. Woolf, et al., Editors. 2008, Springer Berlin / Heidelberg*. p. 29-39.
- [30] Blanchard, E., P. Chalfoun and C. Frasson, Towards advanced Learner Modeling: discussions on quasi real-time adaptation with physiological data, in *7th IEEE conference on Advanced Learning Technologies : ICAALT 20072007: Niigata, Japan*.
- [31] Galán, F.C. and C.R. Beal, EEG Estimates of Engagement and Cognitive Workload Predict Math Problem Solving Outcomes, in *User Modeling, Adaptation, and Personalization, Springer, Editor 2012, Lecture Notes in Computer Science*. p. 51-62.
- [32] Chaouachi, M., I. Jraidi and C. Frasson, Modeling Mental Workload Using EEG Features for Intelligent Systems
User Modeling, Adaption and Personalization, J. Konstan, et al., Editors. 2011, Springer Berlin / Heidelberg. p. 50-61.
- [33] Scandura, J.M., *Problem Solving: A Structural/Process Approach with Instructional Applications*. 1977, New York: Academic Press.
- [34] Gagné, R., *The conditions of learning (4th edition)*. 1985: New York: Holt, Rinehart & Winston.
- [35] Reigeluth, C.M., The elaboration theory: Guidance for scope and sequence decisions., in *Instructional-Design Theories and Models: A New Paradigm of Instructional Theory. (Volume II)*. C.M. Reigeluth, Editor. 1999, Lawrence Erlbaum Assoc.: Hillsdale, NJ.
- [36] Merrill, M.D., Instructional strategies and learning styles : which takes precedence ?, in *Trends and Issues in instructional technology, R.A.R.J.V. Dempsey, Editor. 2002, Prentice Hall*.
- [37] Bruner, J.S., "The act of discovery". *Harvard Educational Review*, 1961. 31(1): p. 21–32.
- [38] Piaget, J., *The Constructivist approach*, ed. F.A.J. Piaget. 1980, Geneva.
-

- [39] Collins, A., J.S. Brown and S.E. Newman, Cognitive apprenticeship: Teaching the craft of reading, writing and mathematics (Technical Report No. 403), 1987, Centre for the Study of Reading, University of Illinois: BBN Laboratories, Cambridge, MA.
- [40] Barrows, H.S., Problem-based learning in medicine and beyond: A brief overview., in *New directions for teaching and learning*, no.68. Bringing problem-based learning to higher education: Theory and practice, L.G. Wilkerson, W.H., Editor. 1996, Jossey -Bass: San Francisco.
- [41] Watson, J., Psychology as the Behaviorist Views it. *Psychological Review*, 1913. 20: p. 158-177.
- [42] Skinner, B.F., *The behavior of Organisms: An Experimental Analysis*. 1938, New York: Appleton-Century.
- [43] Pavlov, I.P., *Conditioned Reflexes: An Investigation of the Physiological Activity of the Cerebral Cortex*, ed. G.V. Anrep. 1927, London: Oxford University Press.
- [44] Reynolds, G.S., *A primer of operant conditioning. (Rev ed)*. 1975, Oxford, England: Scott, Foresman. xiv, 155.
- [45] Baddeley, A.D., *Working memory, thought and action*. 2007, Oxford: Oxford University Press.
- [46] DeGelder, B., et al., Non-conscious recognition of affect in the absence of striate cortex. *Neuroreport*, 1999. 10(18): p. 3759-3763.
- [47] Muñoz-Merino, P.J. and C. Delgado Kloos, A software player for providing hints in problem-based learning according to a new specification. *Computer Applications in Engineering Education*, 2009.
- [48] Baars, B., *In the theater of consciousness*. 1997: Oxford University Press, New York.
- [49] Hans Christian, L. and E. Wolfgang, First Experiences with the Communication and Tutoring System (CATS), in CD-Proceedings of the 6th ICNE2004: Neu Châtel.
- [50] DeVaul, R.W., A. Pentland and V.R. Corey, The Memory Glasses: Subliminal vs. Overt Memory Support with Imperfect Information, in IEEE International Symposium on Wearable Computers2003, IEEE Computer Society: New York. p. 146-153.
- [51] Nunez, J.P. and F.D. Vincente, Unconscious learning. Conditioning to subliminal visual stimuli. *The Spanish Journal of Psychology*, 2004. 7(1): p. 15.
- [52] Watanabe, T., J.E. Nanez and S. Yuka, Perceptual learning without perception. *Nature*, 2001. 413: p. 5.
- [53] Dijksterhuis, A. and L.F. Nordgren, A Theory of Unconscious Thought. *Perspectives On Psychological Science*, 2006. 1(2): p. 14.
- [54] Dijksterhuis, A., Think different: The merits of unconscious thought in preference development and decision making. *Journal of Personality and Social Psychology*, 2004. 87.
- [55] Kouider, S. and S. Dehaene, Levels of processing during non-conscious perception: a critical review of visual masking. *Philosophical Transactions Of The Royal B Society*, 2007. 362(1481): p. 18.
- [56] Greenwald, A.G., New look 3: Unconscious cognition reclaimed. *American Psychologist*, 1992. 47: p. 766-779.
- [57] Kunde, W., A. Kiesel and J. Hoffmann, Conscious control over the content of unconscious cognition. *Cognition*, 2003. 88(2): p. 223-242.
- [58] Poppel, E., R. Held and D. Frost, Residual visual function after brain wounds involving the central visual pathways in man. *Nature*, 1973. 243(405): p. 295-296.
- [59] Naccache, L., *Le nouvel inconscient*. 2006: Odile Jacob Sciences.
- [60] Del Cul, A., S. Baillet and S. Dehaene, Brain Dynamics Underlying the Nonlinear Threshold for Access to Consciousness. *PLoS Biololgy*, 2007. 5(10): p. 2408-2423.
-

-
- [61] Dehaene, S., et al., Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature Neuroscience*, 2001. 4: p. 752-758.
- [62] Kouider, S., et al., Cerebral bases of subliminal and supraliminal priming during reading. *Cerebral Cortex*, 2007. 17: p. 2019-2029.
- [63] Ledoux, J., *The emotional brain - The Mysterious underpinnings of emotional life*. . 1996: Simon & Schuster paperbacks.
- [64] Greenwald, A.G., S.C. Draine and R.L. Abrams, Three cognitive markers of unconscious semantic activation. *Science*, 1996. 273: p. 1699-1702.
- [65] Meyer, D.E. and R.W. Schvaneveldt, Facilitation in recognizing pairs of words : evidence of dependence between retrieval operations. *Journal of Experimental Social Psychology*, 1971. 90(2): p. 227-234.
- [66] Allport, A., Attention and performance, D.S. Dornic, Editor. 1977. p. 505-534.
- [67] Marcel, A.J., Conscious and unconscious perception: experiments on visual masking and word recognition. *Cogn Psychol.*, 1983. 15(2): p. 197-237.
- [68] Fowler, C.A., et al., Lexical access with and without awareness. *Journal of Experimental Psychology General*, 1981. 110: p. 341-362.
- [69] Greenwald, A.G., New Look 3: reclaiming unconscious cognition. *American Psychologist*, 1992. 47: p. 766-779.
- [70] Schacter, D.L., Implicit memory: history and current status. *Journal of experimental psychology: learning, memory and cognition*, 1987. 13: p. 501-518.
- [71] Greenwald, A.D., S.C. Draine and R.L. Abrams, Three cognitive markers of unconscious semantic activation. *Science*, 1996. 273: p. 1699-1702.
- [72] Dehaene, S., et al., Imaging unconscious semantic priming. *Nature*, 1998. 395: p. 597-600.
- [73] Dehaene, S., et al., Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy. *Trends in cognitive sciences*, 2006. 10(5): p. 204-211.
- [74] Pétry, F., L'inconscient cognitif, in *Cerveau & Psycho2006*: France. p. 65-69.
- [75] Lleras, A. and J.T. Enns, Negative compatibility or object updating? A cautionary tale of mask-dependant priming. *Journal of Experimental Psychology General*, 2004. 133: p. 475-493.
- [76] Schlaghecken, F. and M. Eimer, Active masks and active inhibition: a comment on Lleras and Enns 2004 and on Verleger, Jaskowski, Aydemir, van der Lubbe, and Groen 2004. *Journal of experimental psychology ge*, 2006. 135: p. 484-494.
- [77] Gaillard, R., et al., Direct Intracranial, fMRI, and Lesion Evidence for the Causal Role of Left Inferotemporal Cortex in Reading. *Neuron*, 2006. 50: p. 191-204.
- [78] Devlin, J.T., et al. Morphology and the internal structure of words. in *Proceedings of the National Academy of Science*. 2004.
- [79] Wallace, F.L., J.M. Flaherty and G.A. Knezek, The Effect of Subliminal HELP Presentations on Learning a Text Editor. *Information Processing and Management*, 1991. 27(2/3): p. 7.
- [80] Schutte, P.C., Assessing the Effects of Momentary Priming on Memory Retention During an Interference Task, in *Computer Science2005*, Virginia Commonwealth University: Virginia. p. 103.
- [81] Shouse, E., Feeling, Emotion, Affect. *Journal of Media and Culture*, 2005. 8(6).
- [82] Isen, A.M., Positive affect and decision making, in *Handbook of emotions*. 2000.
- [83] Spering, M., D. Wagener and J. Funke, The role of emotions in complex problems solving. *Cognitive and Emotion*, 2005. 19.
- [84] Bechara, A., H. Damasio and A.R. Damasio, Emotion, Decision Making and the Orbitofrontal Cortex. *Cerebral Cortex, special issue: The Mysterious Orbitofrontal Cortex*, 2000. 10(3): p. 295-307.
-

- [85] Bechara, A., The role of emotion in decision-making: evidence from neurological patients with orbitofrontal damage. *Brain and Cognition*, 2004. 55(1): p. 30-40.
- [86] Idzihowski, C. and A. Baddeley, Fear and performance in novice parachutists. *Ergonomics*, 1987. 30: p. 1463-1474.
- [87] Pekrun, R., The Impact of Emotions on Learning and Achievement: Towards a Theory of Cognitive/Motivational Mediators. *Applied Psychology*, 2008. 41(4).
- [88] Bloom, B.S., *Bloom's Taxonomy*. 1994: University of Chicago Press.
- [89] Lisetti, C. and D. Schiano, Automatic Facial Expression Interpretation : Where Human-Computer Interaction, Artificial Intelligence and Cognitive Science Intersect. *Pragmatics and Cognition*, 2000. 81(1).
- [90] Goleman, D., *Emotional intelligence*. 1995, New York ; Toronto: Bantam Books. xiv, 352.
- [91] Nkambou, R., J. Bourdeau and R. Mizoguchi, eds. *Advances in Intelligent Tutoring Systems*. Studies in Computational Intelligence. Vol. 308. 2010, Springer. 508.
- [92] Ekman, P., W.V. Friesen and J.C. Hager, *The facial action coding system, 2nd edition*, ed. R.N. e-Book. 2002, London: Weidenfeld & Nicolson.
- [93] D'Mello, S., A. Graesser and R.W. Picard, Toward an Affect-Sensitive AutoTutor. *Intelligent Systems, IEEE*, 2007. 22(4): p. 53-61.
- [94] Conati, C. and H. Maclaren, Empirically building and evaluating a probabilistic model of user affect *User Modeling and User-Adapted Integration*, 2009. 19(3): p. 267-303.
- [95] D'Mello, S.K., N. Dowell and A.C. Graesser. Cohesion Relationships in Tutorial Dialogue as Predictors of Affective States. in Proceedings of the 14th International Conference on Artificial Intelligence in Education. 2009. Brighton, United Kingdom: IO Press.
- [96] Prendinger, H. and M. Ishizuka, The Empathic Companion: A Character-Based Interface That Addresses Users' Affective States. *Applied Artificial Intelligence*, 2005. 19((3-4)): p. 18.
- [97] McQuiggan, S. and J. Lester, Modeling and Evaluating Empathy in Embodied Companion Agents. *International Journal Of Human-Computer Studies*, 2007. 65(4): p. 12.
- [98] Mehrabian, A. and J. Russel, *An approach to environmental psychology*. 1974, Cambridge, MA: MIT Press.
- [99] Christie, I.C. and B.H. Friedman, Autonomic specificity of discrete emotion and dimensions of affective space: a multivariate approach. *International Journal of Psychophysiology*, 2004. 51(2): p. 143-153.
- [100] Greenwald, M., E.I. Cook and P. Lang, Affective judgment and psychophysiological response: dimensional covariation in the evaluation of pictorial stimuli. *Journal of Psychophysiology*, 1989. 3: p. 51-64.
- [101] Lang, P.J., The emotion probe: studies of motivation and attention. *American Psychologist*, 1995. 50(5): p. 14.
- [102] McQuiggan, S.W. and J.C. Lester, Modeling and Evaluating Empathy in Embodied Companion Agents. *International Journal Of Human-Computer Studies*, 2007. 65(4): p. 348-360.
- [103] Picard, R., E. Vyzas and J. Healey, Toward machine emotional intelligence: analysis of affective physiological state. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001. 23(10): p. 6.
- [104] Demos, J., *Getting Started With Neuro-Feedback*, ed. W.W.N.C. Inc. 2005.
- [105] Ley, R., An Introduction to the Psychophysiology of Breathing. *Biofeedback and Self-Regulation*, 1994. 19(2).
-

-
- [106] Mandryk, R.L., K.M. Inkpen and T.W. Calvert, Using Psychophysiological Techniques to Measure User Experience with Entertainment Technologies. *Behaviour and Information Technology (Special Issue on User Experience)*, 2006. 25(2): p. 17.
- [107] Criswell, E., *Biofeedback and somatics*. 1995, Novato, CA: Freeperson Press.
- [108] Del Cul, A., S. Baillet and S. Dehaene, Brain Dynamics Underlying the Nonlinear Threshold for Access to Consciousness. *PLoS Biology*, 2007. 5(10): p. 16.
- [109] Strahan, E.J., S.J. Spencer and M.P. Zanna, Subliminal priming and persuasion: Striking while the iron is hot. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2002. 6(38): p. 556-568.
- [110] Blanchard, E. and C. Frasson., Easy Creation of Game-like Learning Environments., in Workshop on teaching with robots and agents. In conjunction with ITS20062006: Jhongli, Taiwan.
- [111] Thought Technology Ltd. 2012; Available from: <http://www.thoughttechnology.com>.
- [112] Dijksterhuis, A. and L.F. Nordgren, A Theory of Unconscious Thought. *Perspectives On Psychological Science*, 2006. 1(2): p. 95-109.
- [113] Dijksterhuis, A., et al., Effects of subliminal priming of self and God on self-attribution of authorship for events. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2008. 44(1): p. 2-9.
- [114] Karremansa, J.C., W. Stroebe and J. Clausb, Beyond Vicary's fantasies: The impact of subliminal priming and brand choice. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2005. 42(6): p. 6.
- [115] Govier, E. and M. Pitts, The contextual disambiguation of a polysemous word in an unattended message. *British Journal of Psychology*, 1982. 73(4): p. 8.
- [116] Treisman, A.M., Verbal cues, language and meaning in selective attention. *American Journal of Psychology*, 1964. 77: p. 13.
- [117] Mitchell, J.P., et al., Directed remembering: subliminal cues alter nonconscious memory strategies. *Memory*, 2002. 10(5/6): p. 7.
- [118] Conati, C., Probabilistic of User's Emotions in Educational Games. *Journal of Applied Artificial Intelligence*, 2002. 16: p. 555-575.
- [119] Chalfoun, P. and C. Frasson, Optimal Affective Conditions for Subconscious Learning in a 3D Intelligent Tutoring System, in International conference on Human Computer Interactions International, HCI2009: San Diego, California, USA.
- [120] Levenson, R.W., Emotion and the autonomic nervous system: A prospectus for research on autonomic specificity, in Social Psychophysiology and Emotion: Theory and Clinical Applications H.L. Wagner, Editor. 1988, John Wiley & Sons: Hoboken, NJ. p. 17-42.
- [121] Lester, J., et al., The Persona Effect: Affective Impact of Animated Pedagogical Agents, in CHI1997: Atlanta, USA.
- [122] Lester, J., S. Towns and P. Fitzgerald, Achieving Affective Impact: Visual Emotive Communication in Lifelike Pedagogical Agents. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 1999. 10: p. 278-291.
- [123] Berger, H., Überdas Elektrenkephalogramm des Menschen. *Nova Acta Leopoldina*, 1929. 6: p. 171-309.
- [124] Jasper, H.H., The 10-20 Electrode System of the International Federation. *Electroencephalography Clinical Neurophysiology*, 1958. 10: p. 5.
- [125] Finke, A., A. Lenhardt and H. Ritter, The MindGame: A P300-based brain-computer interface game. *Neural Networks*, 2009. 22: p. 1329-1333.
- [126] Gray, H.M., et al., P300 as an index of attention to self-relevant stimuli. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2004. 40: p. 216-224.
-

- [127] Prinzel, L.J., F.G. Freeman and M.W. Scerbo, Human Factors. *Effects of a psychophysiological system for adaptive automation on performance, workload, and the event-related potential P300 component.*, 2003. 45: p. 13.
- [128] Donchin, E. and M.G.H. Choles, Is the P300 component a manifestation of cognitive updating? *The Behavioral and Brain Sciences*, 1988. 11: p. 357-427.
- [129] Luck, S.J., *An introduction to event-related potential technique*. Cognitive Neuroscience, ed. M.S. Gazzaniga. 2005, Cambridge: The MIT Press.
- [130] Donchin, E., G. McCarthy and M. Kutas, Electroencephalographic investigations of hemispheric specialization., in *Language and Hemispheric Specialization in Man: Cerebral Event-Related Potentials*, J.E. Desmedt, Editor. 1997, Basel: S. Karger. p. 212-243.
- [131] Gevins, A.S., et al., EEG patterns during 'cognitive' tasks. I. Methodology and analysis of complex behaviors. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1979. 47(6): p. 693-703.
- [132] Davidson, R.J., EEG measures of cerebral asymmetry: conceptual and methodological issues. *International Journal of neuroscience*, 1988. 39: p. 71-89.
- [133] Ehrlichman, H. and M.S. Weiner, EEG Asymmetry During Covert Mental Activity. *Psychophysiology*, 1980. 17(3): p. 228-235.
- [134] Irina M. Harris, et al., Selective right parietal lobe activation during mental rotation : A parametric PET study. *Brain*, 2000. 123(1): p. 65-73.
- [135] Hyungkyu, K., C. Jangsik and L. Eunjung, EEG Asymmetry Analysis of the Left and Right Brain Activities During Simple versus Complex Arithmetic Learning. *Journal of Neurotherapy*, 2009. 13: p. 109–116.
- [136] Engel, A.K. and W. Singer, Temporal binding and the neural correlates of sensory awareness. *Trends in cognitive sciences*, 2001. 5: p. 16-25.
- [137] Francisco Varela, et al., The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration *Nature Reviews*, 2001. 2: p. 229-239.
- [138] Jung-Beeman, M., et al., Neural activity when people solve verbal problem with insight. *PLoS Biology*, 2004. 2(4): p. 500-507.
- [139] Sandkühler, S. and J. Bhattacharya, Deconstructing insight: EEG correlates of Insightful Problem Solving. *PLOS One*, 2008. 3(1).
- [140] Gardner, H., *Intelligence Reframed: Multiple Intelligences for the 21st Century*. 1999, New York: Basic Books.
- [141] Saari, T., et al. Emotionally Loaded Mobile Multimedia Messaging. in 3rd International Conference on Entertainment Computing (ICEC). 2004. Eindhoven, Netherlands.
- [142] Chehimi, F., et al. An Interactive Table Supporting Mobile Phone Interaction and 3D Content. in UbiComp 2009. 2009. Florida, USA.
- [143] Schmidt, A., et al., Automotive user interfaces: human computer interaction in the car, in *Proceedings of the 28th of the international conference extended abstracts on Human factors in computing systems 2010*, ACM: Atlanta, Georgia, USA. p. 3177-3180.
- [144] Conati, C., Probabilistic assessment of user's emotions in educational games. *Applied Artificial Intelligence*, 2002. 16: p. 20.
- [145] Lisetti, C.L. and F. Nasoz, Using Noninvasive Wearable Computers to Recognize Human Emotions from Physiological Signals. *Journal on Applied Signal Processing*, 2004. 11: p. 15.
- [146] Quartz, S.R., Reason, emotion and decision-making: risk and reward computation with feeling. *Trends in Cognitive Sciences*, 2009. 13(5): p. 17.
- [147] Snow, R.E., L. Corno and D. Jackson, Individual differences in affective and cognitive functions., in *Handbook of Educational Psychology*, D.C.B.a.R.C. Calfee, Editor. 1996, Prentice Hall. p. 243-310.

-
- [148] Damasio, A., *Descartes Error - Emotion, Reason and the Human Brain*. 1994, New-York: Puttman Press.
- [149] Guilford, J.P. and R. Höpigner, *The Analysis of Intelligence*. 1971, New-York: McGraw-Hill Book Compagny.
- [150] Wu, Y. and X. Zhou, The P300 and reward valence, magnitude, and expectancy in outcome evaluation. *Brain Research*, 2009. 1286: p. 114-122.
- [151] Chalfoun, P. and C. Frasson, Subliminal priming enhances learning in a distant virtual 3D Intelligent Tutoring System. *IEEE Multidisciplinary Engineering Education Magazine : Special Issue on Intelligent Tutoring Systems*, 2008. 3(4): p. 125-130.
- [152] Dijksterhuis, A., et al., Effects of subliminal priming of self and God on self-attribution of authorship for events. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2008. 44: p. 7.
- [153] Hermans, D. and A. Spruyt, Affective Priming With Subliminally Presented Pictures. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 2003. 57(2): p. 97-114.
- [154] Chaouachi, M., et al., Affect and Mental Engagement: Towards Adaptability for Intelligent Systems, in The 23rd International FLAIRS Conference2010, AAAI Press: Florida, USA.
- [155] Chalfoun, P. and C. Frasson, Showing the positive influence of subliminal cues on learner's performance and intuition: an ERP study, in The 10th International Conference On Intelligent Tutoring Systems (ITS), J.K.a.J.M. Vincent Aleven, Editor 2010, Springer Verlag: Pittsburgh, USA. p. 288-290.
- [156] Jraidi, I. and C. Frasson. Subliminally Enhancing Self-Esteem: Impact on Learner Performance and Affective State. in Proceedings of the Tenth International Conference On Intelligent Tutoring Systems. 2010. Pittsburgh, USA.
- [157] Dehaene, S., et al., Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy. *Trends in cognitive science*, 2006. 10(5): p. 8.
- [158] Bosma, W. and E. André, Exploiting emotions to disambiguate dialogue acts., in Intelligent User Interfaces2004. p. 7.
- [159] D'Mello, S.K., et al. Integrating Affect Sensors in an Intelligent Tutoring System. in Affective Interactions: The Computer in the Affective Loop Workshop at 2005 International conference on Intelligent User Interfaces. 2005. New York, USA: AMC Press.
- [160] Stevens, R.H., T. Galloway and C. Berka, Exploring Neural Trajectories of Scientific Problem Solving Skill Acquisition, in Third International Conference on Augmented Cognition2007, Springer Berlin / Heidelberg: Beijing, China. p. 400-408.
- [161] Deutsch, J.A. and D. Deutsch, Comments on 'selective attention: perception or response?'. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1967. 19.
- [162] Pessiglione, M., et al., Subliminal Instrumental Conditioning Demonstrated in the Human Brain. *Neuron*, 2008. 59: p. 561-567.
- [163] Lowery, B.S., et al., Long-term effect of subliminal priming on academic performance. *Basic and applied social psychology*, 2007. 29(2): p. 151-157.
- [164] Van den Bussche, E., et al., The relation between consciousness and attention: An empirical study using the priming paradigm. *Consciousness and Cognition*, 2010. 19: p. 86-97.
- [165] Klimesch, W., EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, 1999. 29: p. 169-195.
- [166] De Smedt, B., R.H. Grabner and B. Studer, Oscillatory EEG correlates of arithmetic strategy use in addition and subtraction. *Exp Brain Res*, 2009. 195: p. 635-642.
- [167] Schutter, D.J.L.G. and J. Van Honk, Electrophysiological ratio markers for the balance between reward and punishment. *Cognitive brain research*, 2005. 24: p. 685-690.
-

- [168] Gray, J.A., *The Neuropsychology of Anxiety: an Enquiry into the Septo-Hippocampal System*. 1982, Oxford: Oxford University Press.
 - [169] Knyazev, G.G. and H.R. Slobodskaya, Personality trait of behavioral inhibition is associated with oscillatory systems reciprocal relationships. *Int. J. Psychophysiol.*, 2003. 48: p. 247–261.
 - [170] Pfurtscheller, G. and F.H. Lopes da Silva, Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin. Neurophysiol.*, 1999. 110: p. 1842–1857.
 - [171] Bowers, K.S., Intuition, in *Encyclopedia of Intelligence*, R.J. Sternberg, Editor. 1994, Macmillan: New York. p. 613–629.
 - [172] Chalfoun, P. and C. Frasson, Cognitive priming: assessing the use of non-conscious perception to enhance learner's reasoning ability, in *The 11th International Conference On Intelligent Tutoring Systems 2012*, Springer Verlag: Chania, Crete.
 - [173] Bresciani, P., et al., Tropos: An Agent-Oriented Software Development Methodology *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2004. 8(3): p. 203-236.
 - [174] GNU General Public License, version 2 (GPL-2.0). 2012; Available from: <http://opensource.org/licenses/gpl-2.0.php>.
 - [175] Jraidi, I., P. Chalfoun and C. Frasson. Implicit Strategies for Intelligent Tutoring Systems. in *The 11th International Conference On Intelligent Tutoring Systems (ITS 2012)*. 2012. Chania, Crete: Springer.
-