



Mémoire de stage Recherche

Master Informatique

Auteur :
Maxime DANIEL

Enseignant référent :
Pascal DESBARATS
Tuteur de stage :
Julien CASTET
Collaborateurs :
Jeremy FREY, Fabien LOTTE

14 juin 2015

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à Immersion et Inria pour m'avoir permis de réaliser un stage de cette qualité au sein de leurs établissements. Je remercie également Immersion et Inria pour leur accueil, le temps passé ensemble et le partage de leur expertise au quotidien.

Je tiens à remercier plus particulièrement mon maître de stage, Julien CASTET, Chef de projet de Recherche à Immersion, Fabien LOTTE, chargé de Recherche de l'équipe Potioc et Jeremy FREY Doctorant au sein de cette équipe avec qui j'ai beaucoup partagé.

Et enfin je remercie Pascal DESBARATS pour sa supervision sur le bon déroulement de ce stage.

Table des matières

Contexte	4
Introduction et Problématique	8
I Travaux réalisés : Solution SCOAL	11
1 Synchronisation multimodale en réseau local	12
1.1 Définition	13
1.2 Application	15
1.3 LabStreamingLayer(LSL) : Protocole de communication et de synchronisation en réseau local	16
1.4 Bilan	17
2 Archivage de données multimodales et Visualisation multimodale	18
2.1 GDFv2.1 : Archivage de données multimodales	18
2.2 OpenViBE : Visualisation multimodale	18
2.3 Bilan	20
II Travaux réalisés : Évaluation de la charge de travail, de l'attention, et de la reconnaissance d'erreur dans un environnement interactif par analyse EEG	22
3 Expérience utilisateur	23
3.1 Utilisateur	24
3.2 Interface	24
3.3 Contenu	24
3.4 Bilan	25
4 Système pour l'évaluation de la charge de travail, de l'attention, et de la reconnaissance d'erreur dans un environnement interactif par analyse EEG	26
4.1 Mécanismes d'induction de charge mentale de travail	28
4.2 Mécanismes de stimulation de l'attention	31
4.3 Mécanismes de stimulation de la reconnaissance d'erreur	33
4.4 Bilan	34
III Travaux en cours	35
5 Définition et Validation des niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel pour la création d'un protocole d'évaluation de la charge de travail, l'attention et	

la reconnaissance d'erreur par analyse EEG	36
5.1 Niveaux de difficulté valide de l'évènement de sélection du chemin	36
5.2 Niveaux de difficulté hypothétiques de l'évènement de changement d'orientation	37
5.3 Niveaux de difficulté hypothétiques de la vitesse de jeu	37
5.4 Nombre de phases de restitution et Niveaux de difficulté du nombre de phases d'apprentissage	37
5.5 Niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel	38
5.6 Validation des niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel	38
5.7 Bilan	39
Conclusion	40
Perspectives	41
A Électroencéphalographe (EEG)	49

Contexte

Dans le cadre de la deuxième et dernière année du Master Recherche informatique spécialité Image, Son, Vidéo parcours Image 3D et Réalité virtuelle de l'Université de Bordeaux¹, j'ai réalisé un stage Recherche d'une durée de six mois du 2 février 2015 au 31 juillet 2015 dans le département Recherche et Développement de la société Immersion² sous la tutelle de Julien CASTET, chef de projet Recherche. Ce stage était également sous la supervision de Pascal DESBARATS enseignant-chercheur à l'Université de Bordeaux et responsable de l'équipe Image et Son du LaBRI³.

La société Immersion est leader européen et acteur majeur international des technologies 3D immersives et collaboratives innovantes pour le monde de l'industrie et de la recherche. Elle conçoit et intègre des dispositifs d'affichage et d'interaction des plus simples aux plus complexes, utilisés pour tester, concevoir, simuler et valider en temps réel autour de maquette numérique. En effet, Immersion intègre des solutions d'affichage telles que des projecteurs (**cf. Figure 1a**), des casques de réalité virtuelle grand public (**cf. Figure 1b**) et professionnels (**cf. Figure 1c**), mais également des solutions d'interaction telles que des capteurs haptiques (**cf. Figure 2b**), des capteurs 3D (**cf. Figure 2a**), des capteurs de biofeedback (**cf. Figure 2c**) ou encore des gants de données (**cf. Figure 2d**).



(a) Barco F50



(b) Oculus VR K2



(c) Neo VR headset

Figure 1 – Casques de réalité virtuelle

1. <https://www.u-bordeaux.fr/> (dernière visite le 07/06/2015)

2. <http://www.immersion.fr/> (dernière visite le 07/06/2015)

3. <http://www.labri.fr/> (dernière visite le 07/06/2015)



(a) Senso



(b) Phantom V120 Duo



(c) Emotiv Epoch



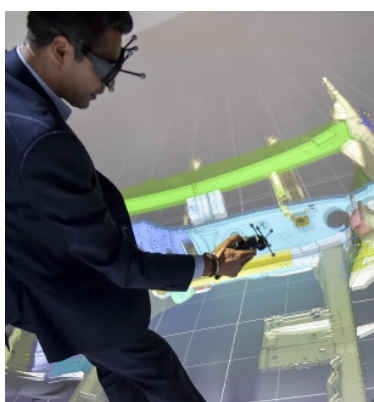
(d) Cyberglove III

Figure 2 – Capteurs et Gants de données

Immersion possède également ses propres solutions issues de son innovation telles que Cubtiiile (cf. **Figure 3a**), un cube interactif dédié à la manipulation d'objet 3D, Diiice (cf. **Figure 3b**), un environnement compact et immersif ou encore Meetiim (cf. **Figure 3c**), une table interactive dédiée au travail collaboratif.



(a) Cubtiiile



(b) Diiice



(c) Meetiim

Figure 3 – Solutions innovantes d'Immersion

Avec sa large gamme de produits, ses innovations et son expérience, Immersion est capable de concevoir

et d'intégrer des systèmes d'affichage et d'interaction intégrant une grande modalité de technologie pour ainsi obtenir des solutions complexes tels que des salles immersives (cf. **Figure 4**) :



Figure 4 – Salle immersive

Avec de telles solutions, Immersion offre à ses clients des outils de conception de maquettes numériques et de prototypes virtuels, mais également des solutions à la revue de projet et à la simulation pour l'évaluation des enjeux. Ce savoir-faire amène de nombreux secteurs à solliciter les services d'Immersion comme l'aéronautique, l'automobile, la construction navale, le transport, la défense, l'architecture, la construction, l'énergie, l'équipement industriel, l'éducation, ou encore la recherche.

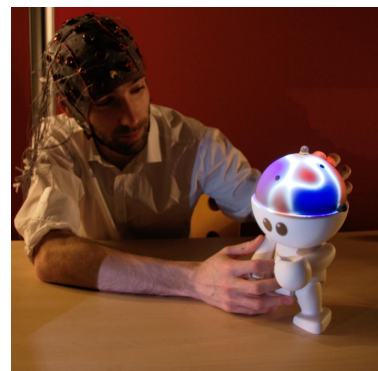
Dans le cadre de ce stage, j'ai été amené à travailler avec l'équipe POTIOC⁴ d'INRIA⁵. Potioc a pour objectif d'explorer de nouvelles approches qui enrichissent l'interaction au travers d'interfaces engageantes et motivantes ayant pour objectif final la stimulation de la créativité, de l'apprentissage, et/ou de l'amusement. Potioc a réalisé de nombreux projets tels que PapARt [1](cf. **Figure 5a**), une interface qui vise à aider à la création artistique en combinant le dessin classique papier/crayon avec des environnements 3D interactifs, ou encore Teegi[2] (cf. **Figure 5b**), une interface EEG (cf. **Annexe A**) tangible qui utilise comme support physique une marionnette sur laquelle l'activité cérébrale est affichée en temps réel et qui a pour objectif principal de donner aux utilisateurs débutants des outils de visualisation auxquels, d'habitude, seulement les experts ont accès.

4. <https://team.inria.fr/potioc/fr/> (dernière visite le 07/06/2015)

5. <http://www.inria.fr/> (dernière visite le 07/06/2015)



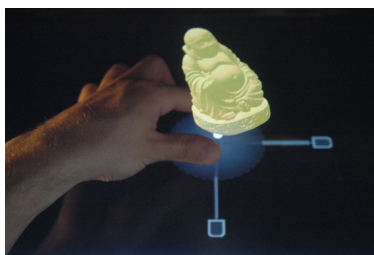
(a) PapARt



(b) Teegi

Figure 5 – Projet de l'équipe POTIOC

L'Inria est un partenaire majeur d'Immersion. Des projets ont donc eu lieu entre ces deux entités tels que Toucheo[3] (cf. **Figure 6a**), un système qui combine efficacement l'interaction multitouch et la visualisation 3D stéréoscopique.



(a) Toucheo

Figure 6 – Projet commun entre Potioc et Immersion

Introduction et Problématique

Avec l'apparition de nouvelles technologies destinées au grand public comme l'Oculus Rift (**cf. Figure 1b**), le casque de réalité virtuelle d'Oculus VR ⁶ ou encore la mise en place de projets comme HoloLens (**cf. Figure 7**), le casque de réalité augmentée de Microsoft ⁷, l'intérêt du grand public pour le domaine de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée s'amplifie.



Figure 7 – HoloLens de Microsoft ²

Au delà de ce phénomène récent, le monde professionnel est un utilisateur régulier des technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée depuis plusieurs années. En effet, ces technologies sont très présentes dans de nombreux secteurs professionnels tels que l'aéronautique, l'automobile, la construction navale, le transport, la défense, l'architecture, la construction, l'énergie, l'équipement industriel, l'éducation, ou encore la recherche [4]. Cependant, certains secteurs restent encore relativement étrangers à ces technologies comme, par exemple, le secteur de la santé. En effet, les capacités et applications des technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée sont peu connus de ce secteur. Depuis quelques années, ce point tend à changer et l'arrivée de projets de recherche médicale impliquant des solutions de réalité virtuelle en est un bon indicateur.

Le projet ANR ⁸ (SCOAL ⁹ (Sommeil, Cognition et Alzheimer) vise à comprendre les désordres du sommeil au stade prodromique ¹⁰ et leur contribution potentielle à la détérioration cognitive progressive caractéristique de la maladie d'Alzheimer. Afin de répondre à cette problématique, le projet SCOAL souhaite réaliser une étude sur une population composée de patients ayant des plaintes isolées de mémoire ou des troubles cognitifs légers, à fort risque de développer une démence. Les patients volontaires recrutés par le CMRR ¹¹ de Bordeaux seront évalués à l'inclusion et un an après. Les patients évalués devront effectuer des tests neuropsychologiques impliquant l'utilisation de méthode d'acquisition de signaux physiologiques ¹² au sein d'un environnement de réalité virtuelle capable de traquer les mouvement du patient (déplacement, rotation, etc.) mais également

6. <https://www.oculus.com/en-us/> (dernière visite le 07/06/2015)

7. [urlhttps://www.microsoft.com/fr-fr/default.aspx](https://www.microsoft.com/fr-fr/default.aspx) (dernière visite le 07/06/2015)

1. <https://www.oculus.com/> (dernière visite le 07/06/2015)

2. <http://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us> (dernière visite le 07/06/2015)

8. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/> (dernière visite le 07/06/2015)

9. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-11-MALZ-0005> (dernière visite le 07/06/2015)

10. désigne la période d'une maladie pendant laquelle un ensemble de symptômes avant-coureurs, généralement bénins, annoncent la survenue de la phase principale de cette maladie.

11. <http://www.imnc-bordeaux.org/38-cmrr.html> (dernière visite le 07/06/2015)

12. Un signal physiologique ou biosignal est un signal émanant d'un être vivant qui peut être mesuré et observé de manière continu.

de détecter les interactions (bouton, etc.) de ce dernier avec son environnement. L'environnement de réalité virtuelle réalise un tracking des mouvements et des interactions du patient à une fréquence d'échantillonnage régulière. On peut donc voir les données de l'environnement de réalité virtuelle comme une signal multicanal transmettant les informations relatives au mouvement (e.g. position, rotation) et les interactions (e.g., bouton pressé, bouton relâché) du patient.

Du fait de l'utilisation de cette technologie de réalité virtuelle, le projet Scoal émet le besoin de pouvoir synchroniser les données (i.e. le signal multicanal) de l'environnement de réalité virtuelle, les signaux physiologiques des tests neuropsychologiques et des événements (annotations, stimuli, etc.) mais également de pouvoir archiver et visualiser ces données. Ce stage s'inscrit dans l'effort réalisé par la société Immersion pour concevoir une réponse à ce besoin. Pour avancer dans un domaine de recherche très récent, Immersion bénéficie d'un partenaire privilégié spécialisé dans le domaine du Brain Computer Interface¹³ (BCI), l'équipe POTIOC d'Inria. Pour répondre aux besoins du projet Scoal, trois problématiques sont donc à prendre en compte (cf. **Figure 8**) :

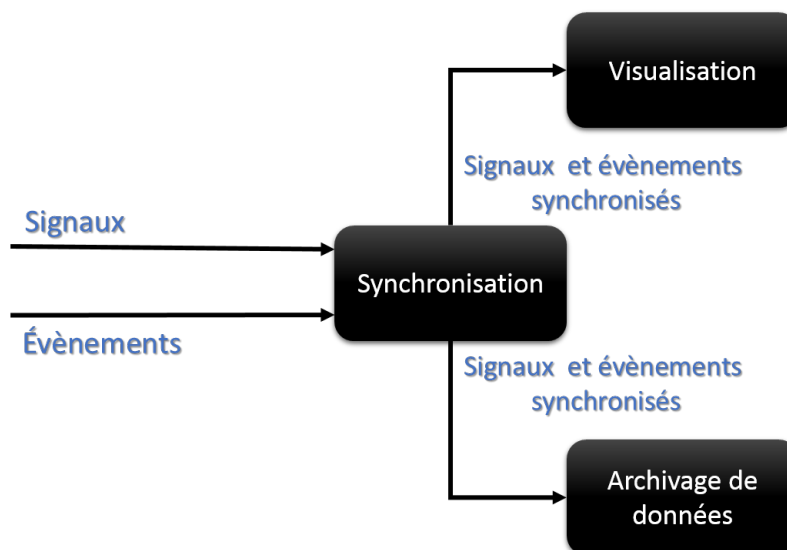


Figure 8 – SCOAL : Problématique

La première problématique est la synchronisation multimodale des signaux et des événements. Une contrainte s'ajoute à cette dernière qui est la nécessité d'utiliser un protocole de communication en réseau local afin de permettre à la solution Scoal de s'étendre sur un réseau local d'ordinateurs. En effet, étant donné l'amplitude de la solution recherchée, il peut être nécessaire d'utiliser un réseau d'ordinateurs afin de répartir la charge de travail. L'utilisation d'un protocole de communication en réseau local nous permettra d'acquérir les signaux et les événements avec un premier ordinateur (i.e. ordinateur dédié à l'acquisition) et d'envoyer ces données au reste du réseau (e.g. ordinateur dédié à l'archivage, ordinateur dédié à la visualisation). Il est donc nécessaire de rechercher un protocole de communication et de synchronisation en réseau local de signaux et d'événements :

Quelle protocole de communication et de synchronisation utilisé pour synchroniser les signaux et les événements en temps réel au sein d'un réseau local ? (1)

Puis, il faudra répondre aux deux problématiques d'archivage de données multimodales et de visualisation multimodale :

Comment archiver et visualiser les signaux et les événements ? (2)

13. <https://team.inria.fr/potioc/fr/scientific-subjects/bci-2/> (dernière visite le 07/06/2015)

Étant donné le contexte présenté par Scoal, il était également l'occasion de travailler sur des sujets qui animent, depuis longtemps, la collaboration entre Inria et Immersion. Un projet, en parallèle de Scoal, a donc pu avoir lieu. Ce projet se situe dans la continuité d'une dynamique commune entre POTIOC et Immersion qui vise à évaluer l'expérience utilisateur par analyse des signaux physiologiques. Avec une telle évaluation, l'utilisation classique des questionnaires d'évaluation serait évitée et nous serions à même d'évaluer en temps réel des interfaces utilisateurs (e.g., jeux vidéo, logiciels) ou encore des périphériques interactifs (e.g., clavier, tablette tactile, Cubtiiiile (**cf. Figure 3a**)) grâce à l'analyse des signaux physiologiques du sujet. Étant donné la complexité de cette problématique, ce projet vise à répondre à une problématique plus ciblée se plaçant dans la continuité des collaborations récentes réalisées entre Immersion et Inria [5]. Ce projet vise donc à évaluer la charge de travail, l'attention et la reconnaissance d'erreur d'un sujet dans un environnement interactif par analyse EEG (**cf. Annexe A**). Avec cette première évaluation partielle de l'expérience utilisateur, nous serons à même de dire qu'une interface utilisateur ou un périphérique interactif demande peu ou trop de ressources cognitives (i.e. charge mentale de travail) ou encore dire que telle partie de l'interface utilisateur ou du périphérique interactif attire plus l'attention qu'une autre. Mais la composante la plus intéressante reste l'évaluation de la reconnaissance d'erreur qui pourrait être capable de détecter des erreurs de l'interface utilisateur ou du périphérique interactif que le sujet aurait perçu consciemment ou inconsciemment telle qu'une interaction qui ne répond pas comme on l'aurait prévu.

Ce projet émet, tout comme le projet Scoal, le besoin de pourvoir synchroniser des signaux physiologiques (i.e. EEG) et des événements (i.e. annotations, stimuli, interactions avec l'environnement interactif, etc.) d'où la pertinence d'un tel projet :

Comment évaluer la charge de travail, l'attention et la reconnaissance d'erreur
d'un sujet dans un environnement interactif par analyse EEG ? (3)

Étant donné le temps imparti et la réelle complexité de ce projet, nous n'avons pas encore pu fournir une solution complète à ce dernier. Cependant, nous avons pu définir un système pour l'évaluation de la charge de travail, de l'attention et la reconnaissance d'erreur dans un environnement interactif par analyse EEG. Soit la problématique suivante :

Quelle système utiliser pour l'évaluation de la charge de travail, de l'attention
et de la reconnaissance d'erreur du sujet dans un environnement interactif par
analyse EEG ? (4)

Au travers de ce mémoire, nous allons tout d'abord répondre aux trois problématiques énoncées par le projet Scoal en fournissant une solution à la synchronisation multimodale en réseau local, et une solution à la visualisation multimodale et l'archivage de données multimodales. Puis, nous définirons ce qu'est l'expérience utilisateur afin de créer un système adapté à l'évaluation de la charge de travail, de l'attention et de la reconnaissance d'erreur d'un sujet dans un environnement interactif par analyse EEG qui illustre la pertinence de la solution Scoal dans ce contexte. Finalement, nous verrons les travaux en cours et nous conclurons sur les perspectives à donner au projet d'évaluation de la charge de travail, de l'attention et de la reconnaissance d'erreur d'un sujet dans un environnement interactif par analyse EEG.

Première partie

Travaux réalisés : Solution SCOAL

Chapitre 1

Synchronisation multimodale en réseau local

La synchronisation multimodale en réseau local est la fonctionnalité et la problématique centrale du projet Scoal. Cette fonctionnalité, indispensable à toutes les autres fonctionnalités, est notre priorité absolue.

Pour obtenir une telle solution nous allons tout d'abord définir et spécifier la synchronisation multimodale pour ainsi mieux comprendre cette problématique. Puis, Nous parcourons ensuite les différentes applications de la synchronisation multimodale afin d'identifier plus précisément le type de synchronisation recherché. Pour finir, nous étudierons LabStreaminLayer¹, la solution choisie, qui est un protocole de communication en réseau local dédié à la synchronisation de signaux et d'évènements.

1. <https://code.google.com/p/labstreaminglayer/> (dernière visite le 07/06/2015)

1.1 Définition

Les applications multimédia impliquent habituellement l'intégration de médias indépendants incluant les flux continus (e.g., audio, vidéo) et discrets (e.g., texte, données, image statique) envoyés par un ou plusieurs envoyeurs à un ou plusieurs récepteurs, ce qui peut amener à la lecture simultanée de plusieurs médias. Dû à la relation temporelle, spatiale, ou sémantique entre les unités média (e.i. MU, e.g. image, échantillon sonore) tels que les images d'un flux vidéo et les échantillons sonores d'un flux audio pour un film, un mécanisme précis de coordination et d'organisation dans le temps est nécessaire pour assurer une présentation ordonnée des MUs dans le temps. Un tel processus de coordination et d'organisation de la relation temporelle des différents flux média dans une présentation temps réel se réfère à la synchronisation multimodale.

La synchronisation multimodale est un mécanisme qui intervient sur quatre types d'objet [6] (cf. **Figure 1.1**) :

Flux Un flot de données continu ou discret (e.g., une caméra, un microphone, un capteur haptique).

Média Un ensemble de flux de même modalité (e.g., une vidéo stéréoscopique, un son stéréophonique).

Site Un ensemble de média (e.g., un film).

Session Un ensemble de site (e.g., une vidéo conférence).

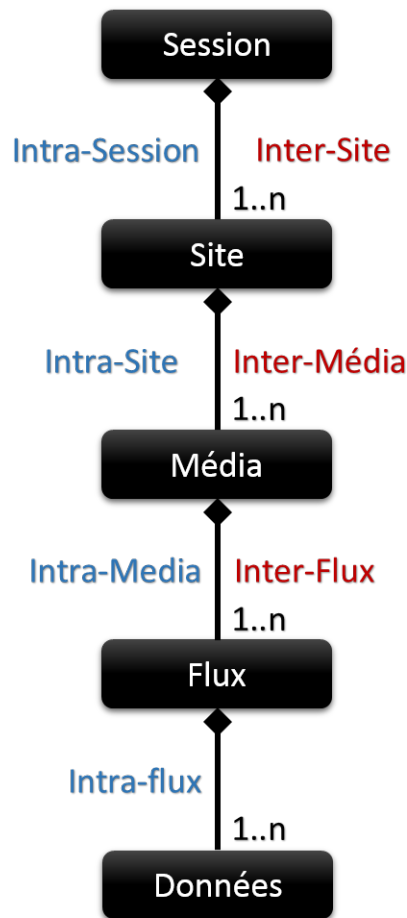


Figure 1.1 – niveaux de synchronisation

Il existe quatre niveaux de synchronisation possibles [6] :

Synchronisation intra-flux (cf. Figure 1.1)

Maintient de la relation temporelle entre chaque MU du flux. Une erreur à ce niveau peut causer une distorsion temporelle (e.g., saccade d'image, haussement du son).

Synchronisation intra-média (cf. Figure 1.1)

Maintient des dépendances temporelles entre les flux de même modalité d'un même média. Une erreur à ce niveau peut causer des distorsions lors de la présentation du média (e.g., décalage entre les deux flux vidéo d'une vidéo stéréoscopique).

Synchronisation intra-site (cf. Figure 1.1)

Maintient des dépendances temporelles entre les différents média d'un site. Une erreur à ce niveau peut causer des incohérences dans la présentation globale (e.g., décalage entre le flux vidéo et le flux audio d'un film).

Synchronisation intra-session (cf. Figure 1.1)

Synchronisation entre les sites d'une session. Soit il s'agit d'une synchronisation inter-receveur, soit d'une synchronisation inter-envoyeur.

La synchronisation inter-receveur, également appelée synchronisation de groupe, a été activement étudiée dans la communauté [7]. Elle décrit la synchronisation du site d'un même envoyeur (e.g., un serveur) avec le site de chaque receveurs (e.g., des clients) (cf. **Figure 1.2**). Une erreur de synchronisation à ce niveau peut causer une injustice. Par exemple, si certains sites reçoivent les MUs avec du délai, les receveurs des autres sites gagneraient des privilèges pour conduire une activité, alors que, au contraire, les receveurs de ces sites seraient désavantagés.

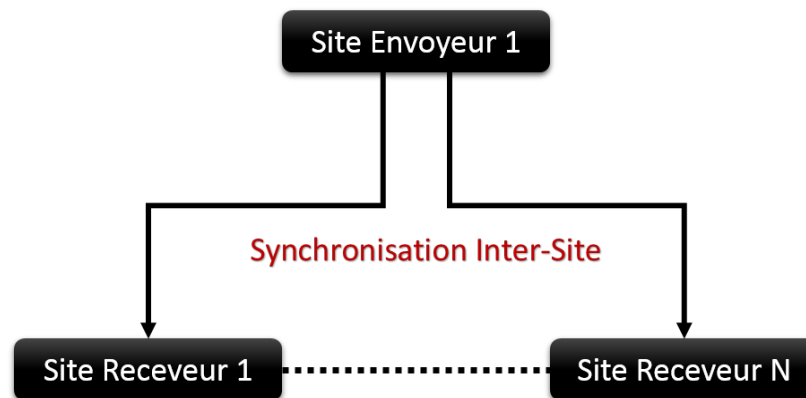


Figure 1.2 – Synchronisation intra-session : synchronisation inter-receveur

La synchronisation inter-envoyeur [8] est un nouveau besoin amené par des activités interactives et immersives. Cette synchronisation permet de synchroniser les sites venant d'un ensemble d'envoyeurs pour un seul et même receveur (**Fig. 1.3**). Une erreur de synchronisation à ce niveau peut amener à des confusions pour le receveur lors d'une activité de collaboration intense entre les envoyeurs.

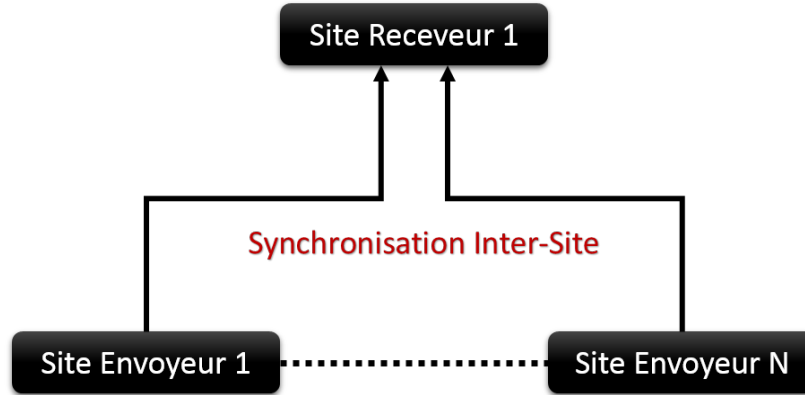


Figure 1.3 – Synchronisation intra-session : synchronisation inter-envoyeur

1.2 Application

La synchronisation multimodale est un mécanisme présent dans toutes les technologies nécessitant la présentation de médias de modalités différentes telles que la TV, le streaming, les jeux vidéo en ligne, les ordinateurs, les réseaux sociaux, les vidéos conférences ou les consoles de jeux. Les mécanismes de synchronisation les plus utilisés aujourd’hui sont la synchronisation intra-flux et la synchronisation inter-flux (ou intra-site).

La synchronisation intra-flux est indispensable pour n’importe quelle transmission ou présentation d’un flux synchrone. Par exemple, lors ce que la source d’un média capture une vidéo à 25 MUs par secondes (25fps^2) chaque MU doit être présenté pendant 40ms ($1000\text{ms}/25\text{ms}$).

La synchronisation inter-flux (ou intra-site) est indispensable pour la présentation de flux dès lors que l’on dispose de plus d’un de ces derniers. Un exemple de synchronisation inter-flux (ou intra-site), est la synchronisation entre la voix d’un présentateur et les mouvements de ses lèvres qui est également appelée synchronisation labiale ([9], [10]). Le playback ou encore le doublage sont des applications récurrentes de la synchronisation labiale. Un autre exemple innovant de synchronisation inter-flux (ou intra-site), est la synchronisation audiovisuelle olfactive qui correspond à la maintenance de la relation temporelle inter-media entre le flux d’odeur généré et le contenu audio-visuel associé afin de présenter un multimédia avec une modalité olfactive [11].

De nouveaux niveaux de synchronisation font leur apparition dû au besoin de certains secteurs. Par exemple, la synchronisation inter-receveur (ou synchronisation de groupe) [12] qui devient nécessaire dans de nombreuses applications comme l’e-learning qui nécessite une synchronisation à distance d’applications d’apprentissage. En effet, si un élève souhaite répondre ou poser des questions à propos d’un contenu, il est crucial que cet élève reçoive l’information au même moment que les autres. D’autres applications à la synchronisation inter-receveur sont les jeux multijoueur temps réel en réseau où de multiples médias tels que les entrées ordinateur (clavier, souris, etc.), la voix et la vidéo sont impliqués simultanément. Dans un tel scénario, les joueurs collaborent souvent entre eux et affrontent d’autres joueurs, lorsqu’un joueur est désavantagé par un délai de réception plus lent des MUs, l’injustice entre les joueurs se fait ressentir. ([13]-[14]). Le multimédia cluster-à-cluster ([15]-[16]) est également une application de la synchronisation de groupe. Il inclut des flux indépendants, mais sémantiquement liés (audio, vidéo, image, texte, etc.) envoyés de système appartenant à un ou plusieurs clusters (i.e. clusters envoyeurs) vers les systèmes d’autres clusters (i.e. clusters receveurs). Par exemple, un cluster envoyeur consistant en une collection d’appareils de capture (e.g., microphone, capteur haptique, caméra) et un cluster receveur étant une collection d’appareils d’affichage (e.g. haut-parleur, écran) et d’ordinateurs qui enregistrent et reproduisent les MUs reçus du cluster envoyeur. D’autres exemples du cluster-à-cluster sont les environnements collaboratifs assistés par ordinateur

2. *Frames per second* correspond au nombre d’images affichées par seconde sur un écran d’ordinateur.

[17]. La TV sociale est une nouvelle application de la synchronisation par groupe. La TV sociale permet à un ensemble de spectateurs de regarder des programmes TV indépendamment de leur localisation et du réseau, tout en permettant l'interaction avec d'autres services tels que les messageries instantanées ou les conférences audiovisuelles. Dans ces articles [18] [19], quelques applications de média streaming (IPTV, WebTV) fournissent une présentation d'expérience partagée synchronisée. Avec l'avancée des technologies interactives et immersives une application innovante de la synchronisation de groupe fait son apparition. La Télé-Immersion 3D (3DTI) [20] est une application avec laquelle des utilisateurs à des localisations différentes sont capables d'achever des collaborations réalistes dans un environnement virtuel conjoint. Quelques applications à cette nouvelle technologie sont les consultations médicales, l'éducation à distance, ou encore la collaboration pour le divertissement.

Au travers de ces applications, nous avons pu identifier les niveaux de synchronisation qui devront être effectués par la solution Scoal. Cette dernière devra réaliser une synchronisation intra-flux et une synchronisation inter-flux : une synchronisation intra-flux afin de respecter les fréquences d'échantillonnages des signaux et une synchronisation inter-flux afin de respecter les relations temporelles entre les signaux et les événements.

1.3 LabStreamingLayer(LSL) : Protocole de communication et de synchronisation en réseau local

Étant donné la nécessité d'utiliser un protocole de communication en réseau local dans la solution Scoal, nous avons recherché l'existence d'un protocole de communication capable de transporter des signaux et des événements tout en réalisant une synchronisation intra-flux et une synchronisation inter-flux. Nos recherches, nous ont amené à un unique protocole capable de transporter des signaux et des événements en réseau local tout en réalisant une synchronisation intra-flux et une synchronisation inter-flux, LabStreamingLayer³ (LSL). LSL réalise une synchronisation intra-flux [] afin de respecter la fréquence d'échantillonnage de chaque signal et une synchronisation inter-flux [21] (ou intra-site) afin de respecter les relations temporelles entre les signaux et les événements.

Concernant la validité de ce protocole à respecter la contrainte temps réel, LSL introduit une latence inférieure à la milliseconde [?] ce qui confirme sa capacité à transmettre les données en temps réel. Concernant la capacité de LSL à réaliser une synchronisation intra-flux et inter-flux valide, divers tests ([22],[23],[24]) ont été réalisés en combinant un EEG avec des médias de modalité différente (vidéo, audio,...) et ces tests ont tous démontré la validité de LSL à effectuer une synchronisation intra-flux et inter-flux valide.

3. <https://code.google.com/p/labstreaminglayer/> (dernière visite le 07/06/2015)

1.4 Bilan

Au cours de ce chapitre, nous avons défini et spécifié la problématique de synchronisation multimodale. Nous avons ensuite étudié des applications à cette dernière. L'étude de ces applications nous a permis d'identifier précisément les niveaux de synchronisation nécessaire à la synchronisation de signaux et d'évènements qui sont : une synchronisation intra-flux pour chaque signal et une synchronisation inter-flux entre les signaux et les évènements. À partir de ces informations, nous avons recherché un protocole de communication en réseau local capable de respecter ces contraintes pour obtenir LabStreamingLayer (**cf. Figure 1.4**), un protocole de communication en réseau local dédié à la synchronisation de signaux et d'évènements qui a démontré sa validité à réaliser une synchronisation intra-flux et inter-flux en temps réel.

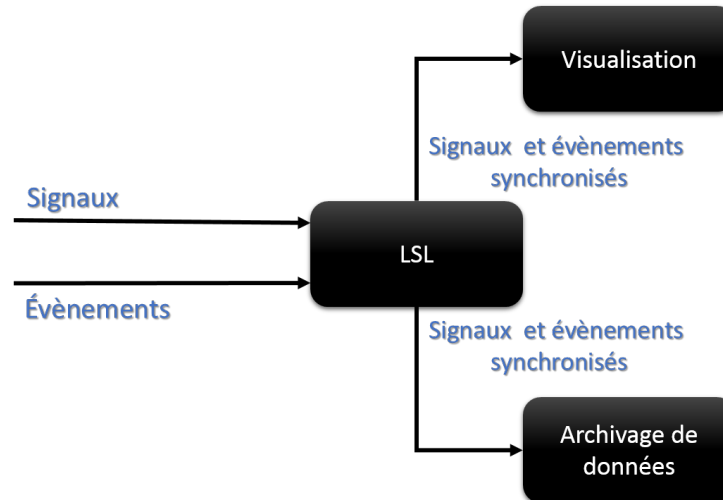


Figure 1.4 – SCOAL : LabStreamingLayer

Chapitre 2

Archivage de données multimodales et Visualisation multimodale

L’archivage de données multimodales est une fonctionnalité primordiale, elle permet la réutilisabilité des données. La visualisation est également indispensable, elle offre à l’utilisateur une perspective et une vision d’ensemble des signaux et des événements à chaque instant.

Dans ce chapitre, nous verrons, tout d’abord, GDF, une solution complète pour l’archivage de signaux physiologiques (ou non physiologiques) et d’évènements. Puis, nous verrons OpenViBE, une solution à la visualisation multimodale qui combine efficacement le protocole de synchronisation LabStreamingLayer (LSL) et le format de données GDF.

2.1 GDFv2.1 : Archivage de données multimodales

GDFv2.1 est le format de données le plus complet pour l’enregistrement de signaux physiologiques et d’évènements [25].

GDF (General Data Format) [26] est un format de données née du manque d’importantes fonctionnalités chez les autres format de données (e.g., enregistrement d’évènements, interruption d’enregistrement). Du fait qu’il n’était pas possible d’améliorer les formats existant (e.g, EDF[27]), GDF a été développé avec l’objectif d’intégrer les meilleures fonctionnalités des formats de données existants. Pour atteindre cette objectif des champs pour les informations du patient (sexe, age, etc.) sont inclus, la position et l’impédance des électrodes peuvent être enregistrées, des types de données différents (de *int8* à *float28*) sont supportées, des codes d’évènement prédéfinis sont utilisés (jusqu’à 255 type d’évènements , définissable par l’utilisateur, sont disponibles). Afin de supporter le contrôle de qualité et la détection de saturation, des informations concernant l’appareil d’enregistrement (manufacture, numéro de série, etc.), le technicien d’enregistrement, et la version du logiciel sont supportés. Et un mécanisme est en place pour l’intégration de nouvelles fonctionnalités.

2.2 OpenViBE : Visualisation multimodale

La visualisation multimodale est une fonctionnalité fondamentale. Elle offre une perspective et une vision d’ensemble de l’environnement à l’observateur sur le moment. Pour l’instant, nous disposons de LabStreamingLayer comme solution à la synchronisation multimodale et du format de données GDF comme solution à l’archivage de données multimodales. Nous avons donc recherché une solution nous permettant de visualiser les signaux et les événements mais également pouvant faire le pont entre ces deux technologies que sont LSL et GDF. Suite à nos recherche, nous avons obtenu OpenViBE¹[28], une solution qui répond à ces contraintes.

1. <http://openvibe.inria.fr/> (dernière visite le 07/06/2015)

OpenViBE est un logiciel destiné à l'utilisation, aux tests et à la création d'interface cerveau-ordinateur. Il peut être utilisé pour l'acquisition, le filtrage, le traitement, la classification et la visualisation des EEG en temps réel (cf. **Figure 2.1- 2.2**). OpenViBE accepte en entrée des signaux et des événements LSL, il peut donc être, plus globalement, utilisé pour l'acquisition, le filtrage, le traitement, la classification et la visualisation de signaux et d'événements en temps réel. OpenViBE offre également la possibilité de sauvegarder les signaux et les événements au format GDF[26], CSV[29] (seulement les signaux) et EDF[27].

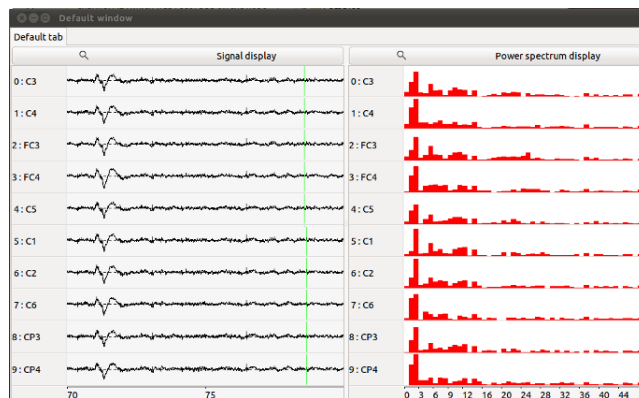


Figure 2.1 – Visualisation d'un EEG et de son spectre associé

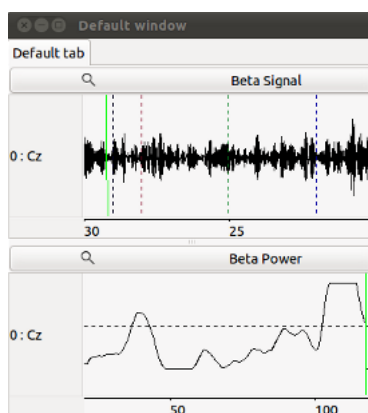


Figure 2.2 – Visualisation d'ondes Beta d'un EEG et d'événements (traits de couleur)

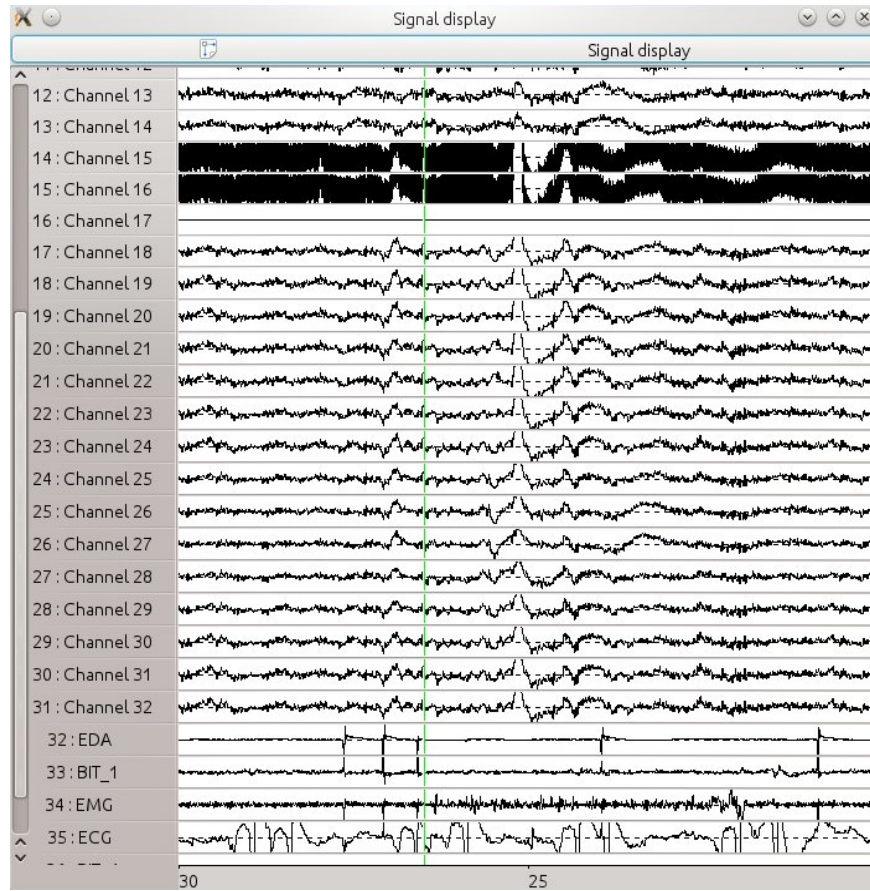


Figure 2.3 – Visualisation de signaux physiologiques (EEG, EMG, EDA...)

De part la capacité d'OpenViBE à pouvoir visualiser en temps réel des signaux et des événements et à pouvoir combiner LSL et GDF, OpenViBE est tout indiqué pour être intégré dans la solution Scoal comme solution à la visualisation multimodale temps réel.

2.3 Bilan

Au travers de ce chapitre, nous avons recherché une solution de visualisation de signaux et d'événements en temps réel capable de faire le pont entre le protocole de synchronisation LSL et le format de données GDF. Les résultats de nos recherches, on montré que le logiciel OpenViBE est une réponse valide à ces problématiques (cf. **Figure 2.4**).

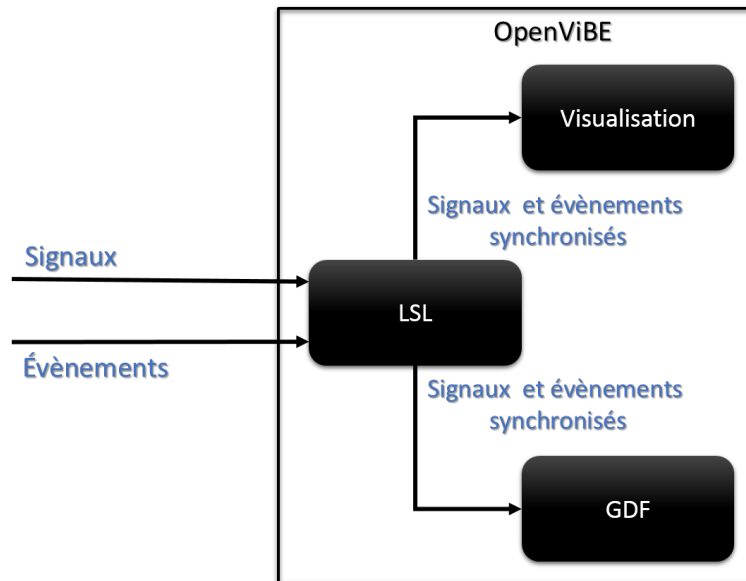


Figure 2.4 – SCOAL : LabStreamingLayer, GDF, OpenViBE

Deuxième partie

Travaux réalisés : Évaluation de la charge de travail, de l'attention, et de la reconnaissance d'erreur dans un environnement interactif par analyse EEG

Chapitre 3

Expérience utilisateur

L'expérience utilisateur est constituée de onze caractéristiques qui composent trois grandes entités toutes dépendantes les unes des autres [30] (cf. **Figure 3.1**).

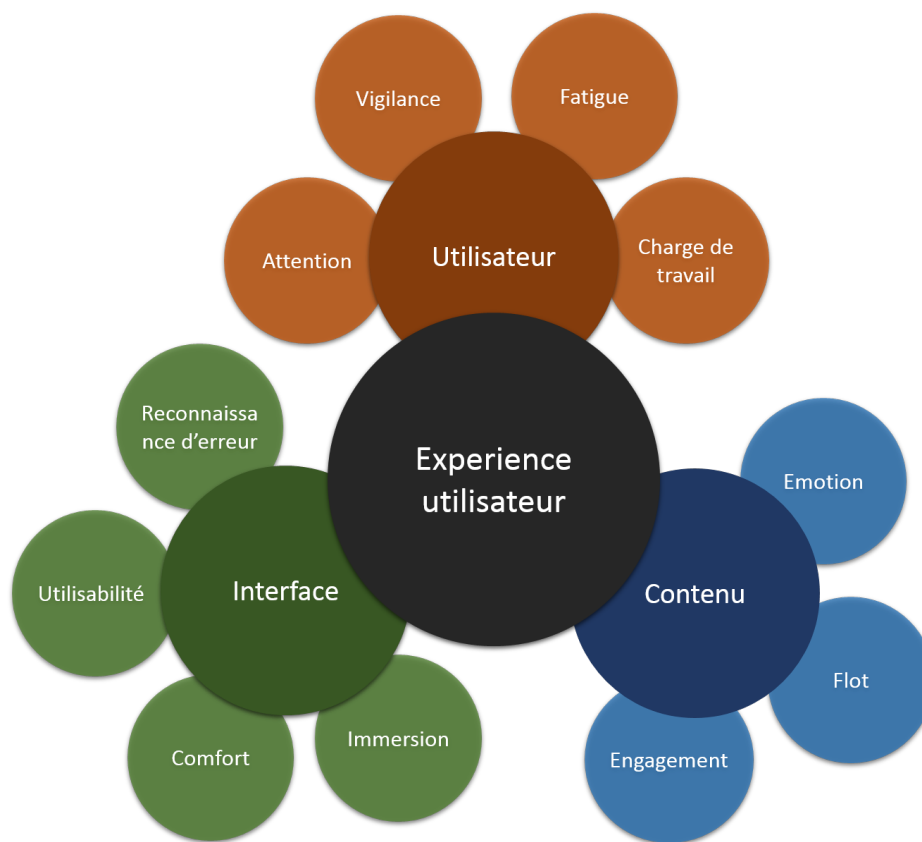


Figure 3.1 – Structure simplifiée de l'expérience utilisateur

Afin d'évaluer la charge de travail, l'attention et la reconnaissance d'erreur, il est primordial d'identifier ces trois caractéristiques. Pour se faire, nous allons définir chacune des entités Utilisateur, Interface, Contenu qui composent l'expérience utilisateur et leurs caractéristiques associées.

3.1 Utilisateur

L'attention, la vigilance, la fatigue et la charge de travail sont caractéristiques de l'Utilisateur. Ces trois caractéristiques nous permettent d'évaluer l'effet de l'environnement sur le sujet. L'attention, la vigilance et la fatigue sont étroitement liées et sont fréquemment mesurées ensemble.

L'attention est la capacité à concentrer des ressources cognitives sur une tâche spécifique. Une attention correcte permet d'ignorer les distractions. Une attention insuffisante engendre une difficulté ou une incapacité à effectuer une tâche. Et au contraire, une attention trop élevée peut empêcher le sujet à se désengager d'une tâche [31].

La vigilance est la capacité à percevoir des changements dans l'environnement. Ce qui correspond à une certaine allocation passive de ressources cognitives. La vigilance est en corrélation directe avec le niveau d'éveil et les performances cognitives du sujet [32].

La fatigue est l'état dans lequel les ressources cognitives du sujet sont épuisées. Si le niveau de vigilance ou d'attention causent un effort trop important à l'organisme, la fatigue augmente et les performances diminuent [33].

L'homme dispose de ressources limitées pour le traitement de l'information. Le ratio entre la capacité de traitement et les données venant de l'environnement détermine la charge de travail mentale. Cette dernière augmente selon que les ressources cognitives s'amenuisent, ou que la quantité d'information à traiter augmente. Si la charge de travail mentale devient trop élevée les performances du sujet diminuent, drastiquement à certain moment [34].

3.2 Interface

La reconnaissance d'erreur, l'utilisabilité, le confort et l'immersion sont caractéristiques de l'Interface. Ces trois caractéristiques nous permettent d'évaluer la qualité de l'interface à partir du ressenti du sujet.

La reconnaissance d'erreur est la situation qui se produit quand le sujet détecte, par lui-même, une erreur dans l'environnement quelle soit inhérente au sujet ou non [35].

L'utilisabilité se réfère à la facilité d'usage du système, qui est relatif à la vitesse, la précision et le taux d'erreur lors de l'accomplissement d'une tâche [36].

Le confort est la capacité du système à rendre les gestes et positions du sujet agréables ou désagréables. Le confort est étroitement lié à l'utilisabilité.

L'immersion se réfère à la capacité du système à simuler le plus fidèlement possible la réalité à l'aide d'un environnement multimodale [37].

3.3 Contenu

L'émotion, le flot et l'engagement caractérisent le Contenu. Ils nous permettent de juger de la qualité des données présentées à l'utilisateur par l'environnement à partir du ressenti de ce dernier.

L'émotion se réfère à une expérience psychologique complexe de l'état d'esprit du sujet. Psychologie et neuroscience ont démontré que les émotions sont connectées au raisonnement de haut niveau. Elles sont étroitement liées au processus de prise de décision [38].

Le flot Implique le challenge et/ou la créativité. Il s'agit d'un état dans lequel le sujet est totalement impliqué dans ce qu'il fait. Le flot se produit lorsque les compétences du sujet rencontrent un niveau suffisant de challenge. Un challenge trop important amène de l'anxiété, pour des compétences trop élevées par rapport au challenge, c'est l'ennui, et un trop peu des deux engendrent de l'apathie. Le challenge est lié à la charge de travail mentale. Par définition, le flot implique de l'engagement [39].

L'engagement est l'effort de l'utilisateur pour l'accomplissement de l'objectif d'une tâche. L'engagement croît lorsqu'il y a demande d'une tâche cognitive et décroît lors de l'accomplissement d'une tâche de vigilance monotone et inintéressante [40].

3.4 Bilan

Au travers de ce chapitre, nous avons défini l'expérience utilisateur et les caractéristiques qui la composent. De là, nous avons été à même d'identifier les caractéristiques de charge de travail, d'attention et de reconnaissance d'erreur au sein de l'expérience utilisateur (cf. **Figure 3.2**).

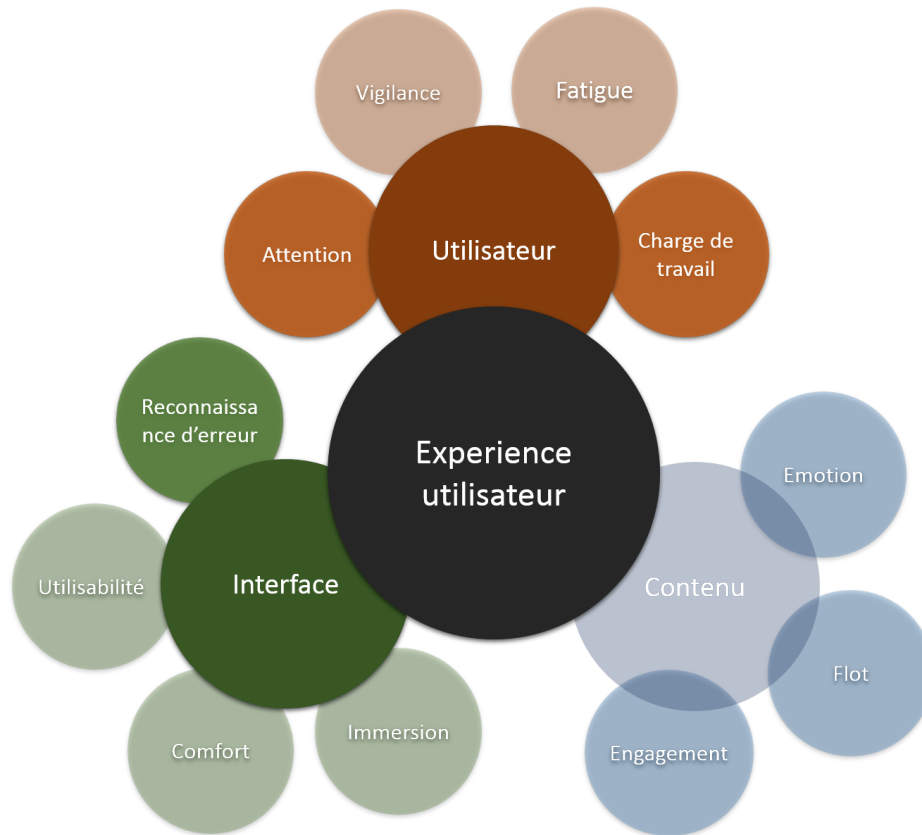


Figure 3.2 – Structure simplifiée de l'expérience utilisateur : Charge de travail, Attention, Reconnaissance d'erreur

Chapitre 4

Système pour l'évaluation de la charge de travail, de l'attention, et de la reconnaissance d'erreur dans un environnement interactif par analyse EEG

Afin d'évaluer la charge de travail, l'attention, et la reconnaissance d'erreur d'un individu dans un environnement interactif par analyse EEG, il est nécessaire de mettre en place un système capable d'acquérir les signaux cérébraux (**cf. EEG, Figure 4.1**). Le système devra également définir un environnement virtuel (**cf. Environnement virtuel, Figure 4.1**), capable d'induire de la charge de travail du sujet. Le contrôle de la charge de travail du sujet par l'environnement virtuel nous permettra de créer des conditions cibles ou le niveau de charge de travail induit par l'environnement virtuel sera connus. Nous pourrons alors comparer ce niveau de charge de travail avec le niveau de charge travail obtenu par l'analyse EEG pour, ainsi, valider ces résultats. Le système devra également être capable de stimuler l'attention et la reconnaissance d'erreur du sujet. Le contrôle de l'attention et de la reconnaissance d'erreur du sujet par l'environnement virtuel nous permettra de connaître le moment exacte ou les stimulations de l'attention et de la reconnaissance d'erreur auront eu lieu. Nous pourrons alors utiliser ces données lors de l'analyse EEG comme repère à la mesure de l'attention et de la reconnaissance d'erreur du sujet. Le système devra également fournir un périphérique interactif pour permettre au sujet d'interagir avec l'environnement virtuel (**cf. clavier, Figure 4.1**) et un périphérique capable de fournir un retour visuel de l'environnement virtuel au sujet (**cf. écran, Figure 4.1**). Enfin, le système devra offrir une synchronisation, un archivage et une visualisation des signaux (i.e. EEG) et des événements (interaction clavier, stimulation de l'attention, stimulation de la reconnaissance d'erreur, etc.) (**cf. solution Scoal, Figure 4.1**).

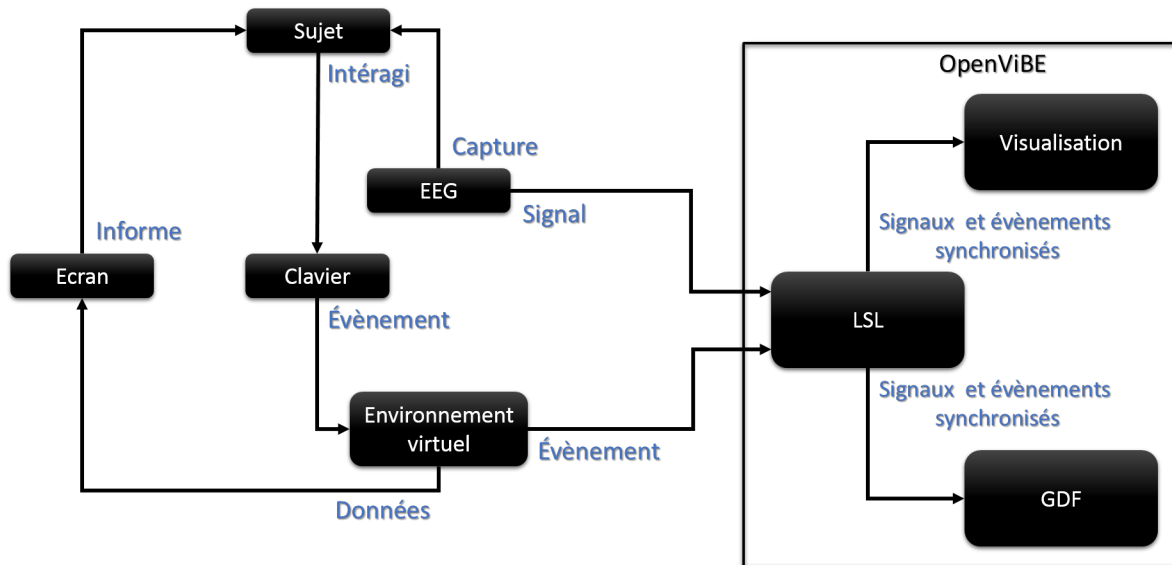


Figure 4.1 – Système pour l’évaluation de la charge de travail, de l’attention, et de la reconnaissance d’erreur dans un environnement interactif par analyse EEG

Lors de l’évaluation, l’environnement virtuel propose au sujet une tâche à réaliser. Afin que le sujet ne se désintéresse pas de celle-ci, il est nécessaire de fournir à ce dernier un environnement virtuel capable de maintenir son engagement. Le jeu vidéo semble être tout désigné pour répondre à ce besoin étant donné sa capacité à inciter l’utilisateur à s’engager dans la tâche qu’il lui est présentée. En effet, le jeu vidéo est utilisé dans le domaine de l’éducation afin de plus facilement inciter les étudiants à s’engager dans des tâches d’apprentissage (*“Serious Game”*) [41], [42]. En connaissance de cause, nous avons donc développé un jeu vidéo comme environnement virtuel de ce système et un objectif de jeu (i.e. une tâche) a été défini. Le sujet devra donc mémoriser un chemin lors d’une ou plusieurs phases d’apprentissage qu’il devra reproduire par la suite lors d’une ou plusieurs phase de restitution. Afin d’affecter la charge de travail du sujet et de stimuler l’attention et la reconnaissance d’erreur de ce dernier, des mécanismes ont été intégrés au jeu. Dans un premier temps, nous allons identifier les causes d’une variation de la charge de travail pour ensuite définir et justifier les mécanismes mis en place pour influencer sur cette dernière. Puis, nous ferons de même pour l’attention et la reconnaissance d’erreur.

4.1 Mécanismes d'induction de charge mentale de travail

La charge mentale de travail est un terme très général que l'on retrouve dans des études faisant varier la difficulté de cette caractéristique de différentes manières, telles que :

- le nombre d'objets à garder en mémoire.
- le nombre de tâches à réaliser en parallèle.
- la difficulté perceptive (e.g., perception visuelle en 3D).
- la pression temporelle.

Nous pouvons alors jouer sur ces quatre types de difficulté pour affecter la charge de travail du sujet. À partir de ces quatre types de difficulté, trois mécanismes ont été mis en place : l'évènement de sélection du chemin et le nombre de phase d'apprentissage pour le nombre d'objets à garder en mémoire, l'évènement de changement d'orientation pour le nombre de tâches à réaliser en parallèle et pour la difficulté perceptive, et la vitesse de jeu pour la pression temporelle.

Sélection du chemin

En s'inspirant du paradigme classique de mémorisation d'objets et de recherche en mémoire de Sternberg [43] qui implique une augmentation linéaire du temps de réaction des sujets avec le nombre d'objets à mémoriser [44],[45], le sujet devra mémoriser une série d'objets afin de mémoriser le chemin. En effet, au milieu de chaque section du chemin, un ensemble d'objets indiquant les directions possibles est affiché à l'écran (**cf. Figure 4.6**), c'est l'évènement de sélection de chemin. Pour sélectionner une direction le sujet contrôle les flèches du clavier qui représentent les quatre directions possibles (haut, bas, gauche, droite). Lors de la phase d'apprentissage, l'objet indiquant la bonne direction que nous appellerons objet du chemin, zoom et dézoom pour indiquer au sujet la bonne direction à sélectionner et donc à mémoriser, et un fil d'ariane guide spatialement le sujet en empruntant la bonne direction du chemin (**Fig. 4.2- 4.3**).

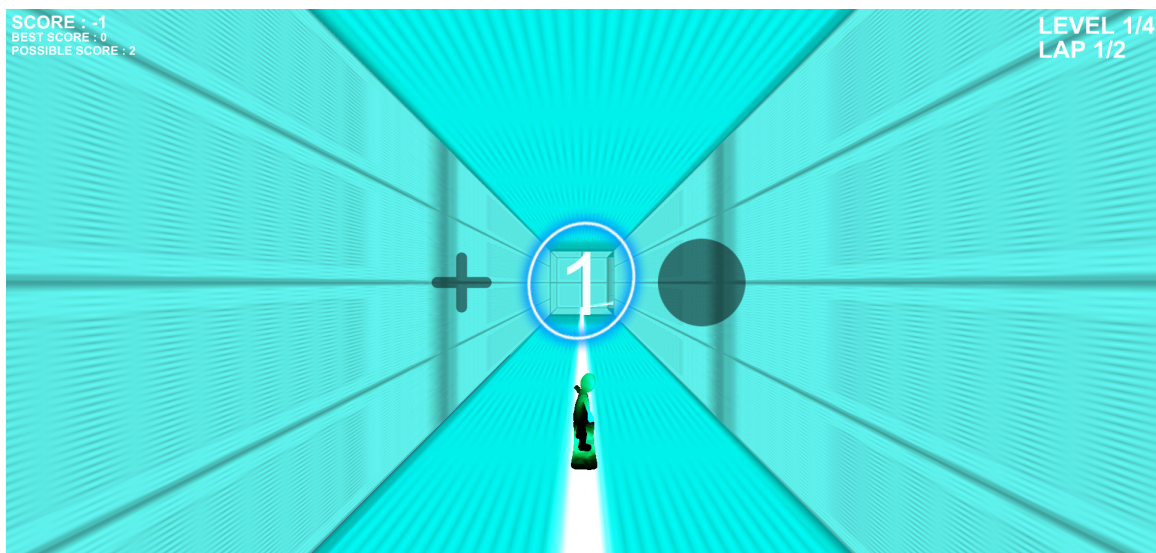


Figure 4.2 – Fil d'ariane et objet du chemin zoomé

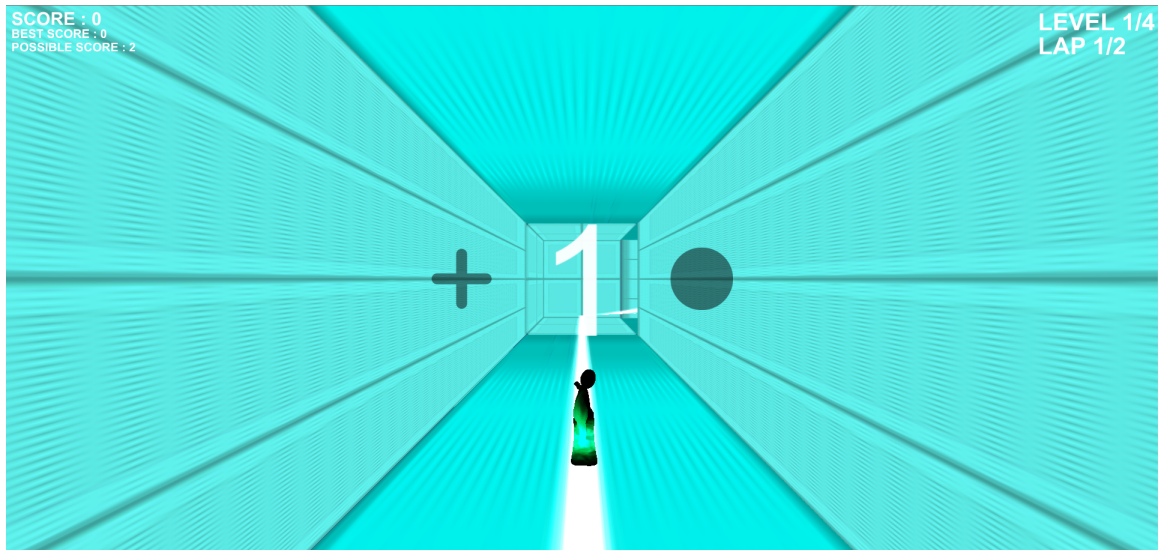


Figure 4.3 – Fil d’ariane et objet du chemin dézoomé

En utilisant un tel mécanisme d’après le paradigme de Sternberg, nous pouvons induire de la charge de travail en jouant sur la longueur du chemin à mémoriser.

Nombre de phase d’apprentissage

Le nombre de phase d’apprentissage, définit le nombre de fois que le sujet pourra parcourir le chemin pour l’apprendre. En utilisant le nombre de phase d’apprentissage, nous sommes à même d’influer sur le niveau de charge de travail. En effet, un grand nombre de phase d’apprentissage facilitera l’apprentissage du chemin par le sujet donc diminuera la charge de travail, au contraire d’un faible nombre de phase d’apprentissage qui demandera au sujet d’apprendre plus rapidement le chemin et donc augmentera la charge de travail [46].

Changement d’orientation

L’évènement ponctuelle de changement d’orientation, modifie l’orientation spatiale du personnage ce qui force le sujet à réaliser une tâche mentale de rotation spatiale afin de retrouver son orientation naturelle (**Fig. 4.6- 4.5**).

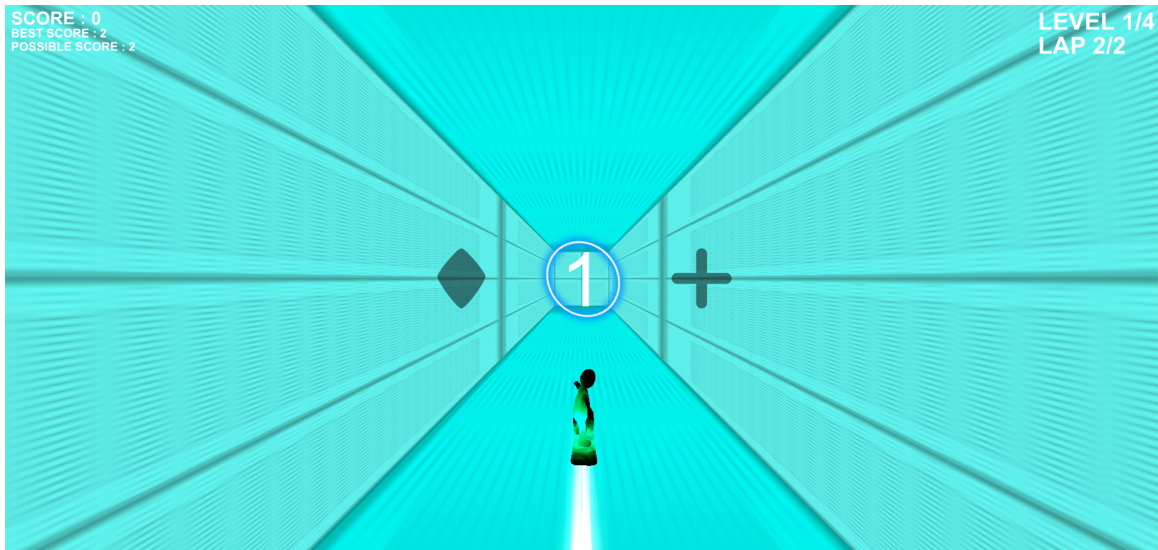


Figure 4.4 – Orientation du personnage avant évènement de changement d'orientation

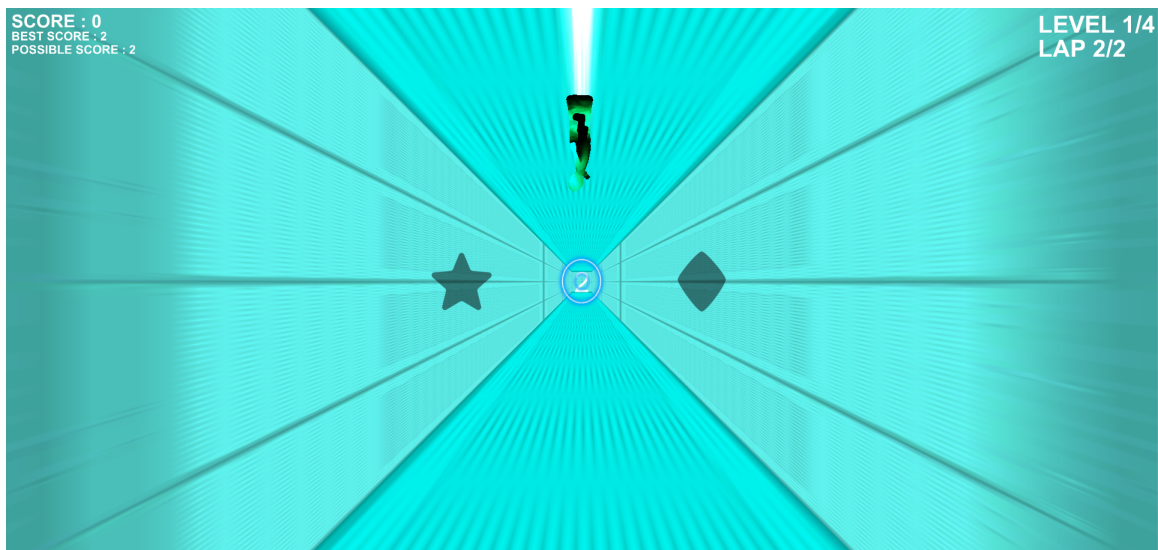


Figure 4.5 – Orientation du personnage après évènement de changement d'orientation

En utilisant l'évènement ponctuelle de changement d'orientation nous sommes également capable d'induire de la charge de travail au sujet. En effet, l'évènement ponctuelle de changement d'orientation force le sujet à réaliser une tâche mentale de rotation spatiale ce qui peut être assimiler à une rotation mentale qui induit de la charge de travail [47]. Sans compter, que l'évènement de changement d'orientation peut se produire en parallèle de l'évènement de sélection du chemin, ce qui ajoute une tâche supplémentaire au sujet et donc de la charge de travail.

Vitesse de jeu

La vitesse de jeu indique le temps que mets le sujet à traverser une section de chemin. On sait également que l'évènement de sélection de chemin se produit au milieu de chaque section. Une vitesse de jeu de 8 secondes signifie donc que le sujet traverse une section de chemin en 8 secondes et qu'il doit sélectionner

le prochain chemin en moins de 4 secondes. Si le sujet ne parvient pas à sélectionner un objet au bout de ces 4 secondes, une stimulation sonore et une stimulation visuelle sont générés et une réduction de son score est opérée.

En utilisant la vitesse de jeu nous sommes à même d'affecter la charge de travail induite au sujet. En effet, Une augmentation de la vitesse de jeu ajoute de la pression temporelle au sujet et donc induit de la charge de travail et, au contraire, une diminution de la vitesse de jeu retire de la pression temporelle au sujet et donc réduit la charge de travail.

4.2 Mécanismes de stimulation de l'attention

Une tâche fréquemment utilisée pour étudier l'attention est la tâche d'oddball. Cette dernière consiste à détecter un objet cible, en général rare présent dans 10% à 20% des essais, parmi une séquence d'objets distracteurs fréquents de 80% à 90% des essais [48], [49]. Plus l'objet cible est rare plus ses effets sur l'EEG seront amples et longs. En s'inspirant du paradigme d'oddball, deux mécanismes ont été mis en place : L'évènement de stimulation visuelle et l'évènement de stimulation auditive.

stimulation visuelle

La stimulation visuelle est un changement soudain de l'environnement (cf. **Figure 4.6- 4.7**).

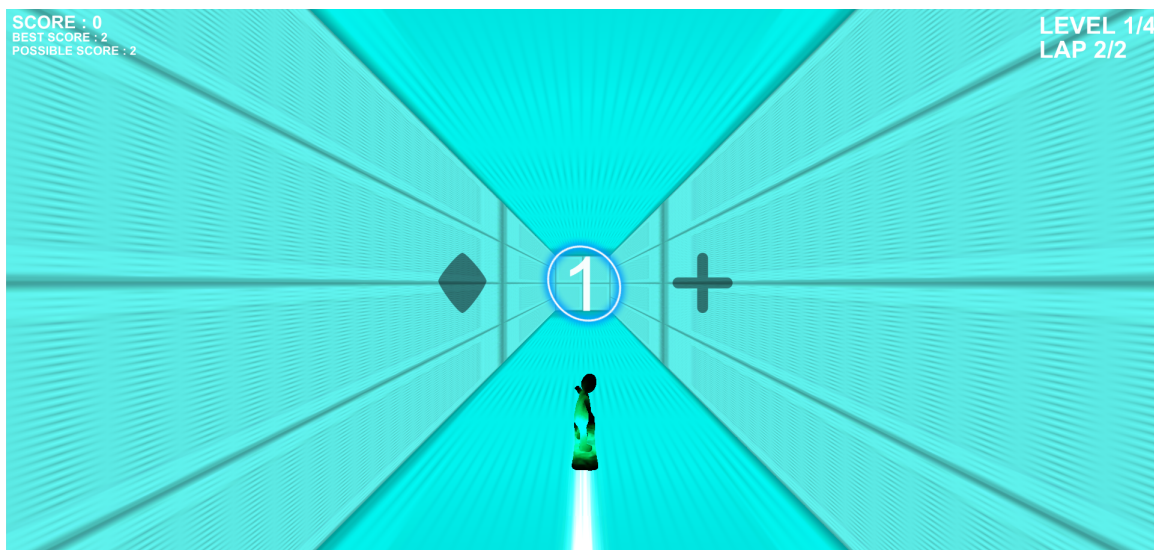


Figure 4.6 – Environnement avant évènement de stimulation visuelle

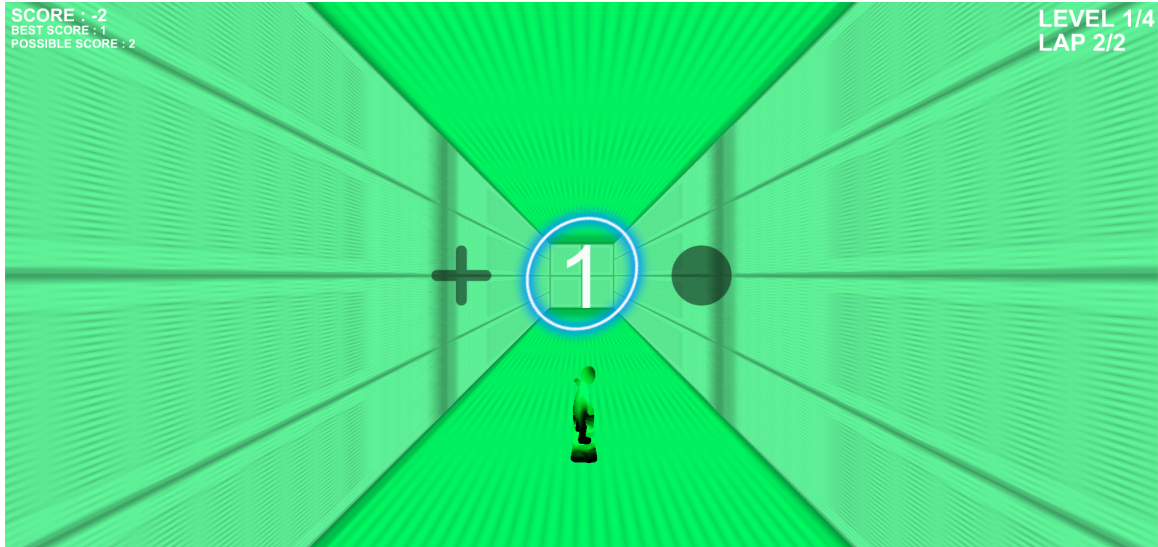


Figure 4.7 – Environnement après évènement de stimulation visuelle

En corrélation avec le paradigme d'oddball, l'environnement avant stimulation visuelle est un objet distracteur et la stimulation visuelle est un objet cible. La stimulation visuelle stimule donc l'attention du sujet.

stimulation auditive

Lors ce que le sujet travers le chemin qu'il sélectionne, il vient à la rencontre d'anneaux de couleur bleu (cf. **Figure 4.6**) qui génère un effet sonore grave. La stimulation auditive remplace cette effet sonore grave par un effet sonore aigu (cf. **Figure 4.8**).

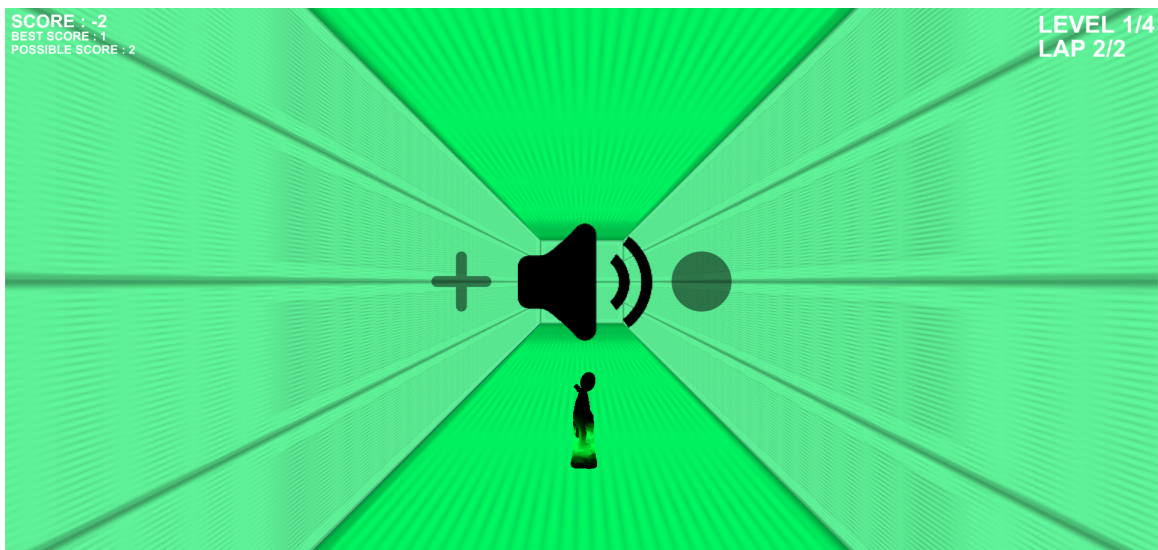


Figure 4.8 – Évènement de stimulation auditive

En corrélation avec le paradigme d'oddball, l'effet sonore grave est un objet distracteur auditif et l'effet sonore aigu est un objet cible auditif. L'effet sonore aigu stimule donc l'attention du sujet.

4.3 Mécanismes de stimulation de la reconnaissance d'erreur

Concernant la reconnaissance d'erreur, on distingue quatre types d'erreurs perceptibles avec l'EEG [50] :

- l'erreur de réponse qui occure lors ce que le sujet réalise avoir commis une faute.
- l'erreur d'interaction qui survient lorsqu'un système réagit de façon inattendue.
- l'erreur d'observation est produite par une tierce personne que l'on observe.
- l'erreur de feedback est mesurée alors qu'une sanction (récompense ou punition) diffère des prévisions.

À partir de ces quatre types d'erreurs, nous avons intégré deux mécanismes destinés à la reconnaissance d'erreur : l'évènement de sélection aléatoire du chemin qui vise à produire une erreur d'interaction et l'évènement de sélection erronée du chemin qui lui vise à produire une erreur de réponse.

sélection aléatoire du chemin

La sélection aléatoire du chemin, comme son nom l'indique, sélectionne un chemin autre que celui sélectionné par le sujet (cf. **Figure 4.9**) :



Figure 4.9 – Évènement de sélection aléatoire du chemin ou évènement de sélection erronée du chemin

En modifiant la sélection du sujet à son insu, une erreur d'interaction est créée ce qui déclenche une reconnaissance d'erreur d'interaction chez le sujet.

sélection erronée du chemin

La sélection erronée du chemin indique que le sujet s'est trompé de chemin en produisant une stimulation visuelle et sonore. Le sujet peut se tromper de deux manières, soit il choisit une direction sans objet (cf. **Figure 4.10**), soit il choisit une direction avec le mauvais objet (cf. **Figure 4.9**). Dans tous les cas, le sujet sera tout de même orienté vers le bon chemin mais une réduction de son score sera opérée :

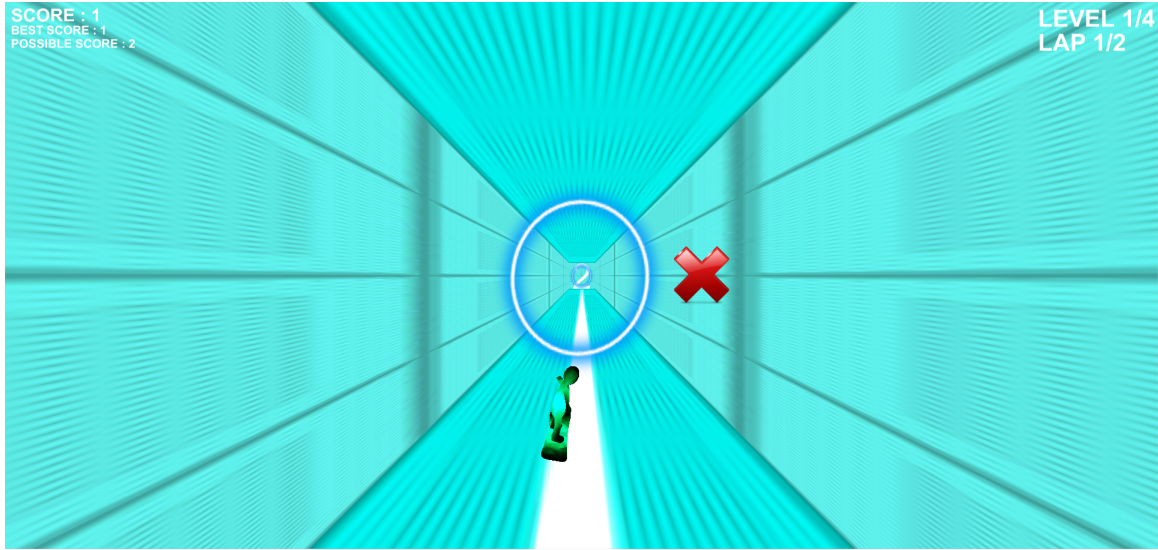


Figure 4.10 – Évènement de sélection erronée du chemin

En indiquant au sujet son erreur à la fois visuellement et auditivement, nous essayons d’induire une reconnaissance d’erreur de réponse chez ce dernier.

4.4 Bilan

Au travers de ce chapitre, nous avons défini un environnement virtuel capable d’influer sur la charge de travail, l’attention et la reconnaissance d’erreur d’un sujet. Pour arriver à ce résultat, nous avons recherché les causes d’une variation de la charge de travail, d’un changement d’attention et d’une reconnaissance d’erreur. Une fois les causes identifiées, nous avons été à même de construire des mécanismes capable de les reproduire. Un total de huit mécanismes ont été intégrées au jeu : la sélection du chemin, le nombre de phase d’apprentissage, la vitesse de jeu et le changement d’orientation pour influer sur la charge de travail du sujet, la stimulation visuelle et la stimulation auditive pour stimuler l’attention du sujet, et la sélection aléatoire du chemin et la sélection erronée du chemin pour induire une détection d’erreur chez le sujet. Il est maintenant nécessaire de définir les niveaux de difficulté (i.e. niveaux de charge de travail) de l’environnement virtuel qui seront utilisés pour induire un niveau connu de charge de travail au sujet mais également afin de valider le niveau de charge de travail obtenu par l’analyse EEG en le comparant avec ce dernier.

Troisième partie

Travaux en cours

Chapitre 5

Définition et Validation des niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel pour la création d'un protocole d'évaluation de la charge de travail, l'attention et la reconnaissance d'erreur par analyse EEG

Pour obtenir les niveaux de difficultés de l'environnement virtuel, il est tout d'abord nécessaire de connaître les niveaux de difficulté que chaque mécanisme dédié à la charge mentale de travail est capable de produire. Une fois, ces niveaux de difficulté identifiées, nous définirons les niveaux de difficulté de l'environnement virtuel qui seront des compositions d'un niveau de difficulté de chaque mécanisme. En faisant cela, nous diversifions les tâches que le sujet devra réaliser (e.g., mémorisation pour la sélection de chemin, rotation mentale pour le changement d'orientation, rapidité de réponse pour la vitesse de jeu) afin de créer des niveaux de difficulté engageants pour le sujet. Une fois les niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel identifiées, nous décrirons l'étude que nous réalisons aujourd'hui pour la validation de ces niveaux de difficulté.

5.1 Niveaux de difficulté valide de l'évènement de sélection du chemin

Pour connaître les niveaux de difficulté que l'évènement de sélection du chemin est capable de produire, une idée pourrait être d'utiliser l'empan mnésique limité (paradigme de nombre magique sept [51]) qui nous dit que l'homme est capable de mémoriser une séquence de 7 ± 2 objets. En se basant sur ce résultat, nous avons défini la plage de difficulté valide suivante (**cf. Figure 5.1**) :

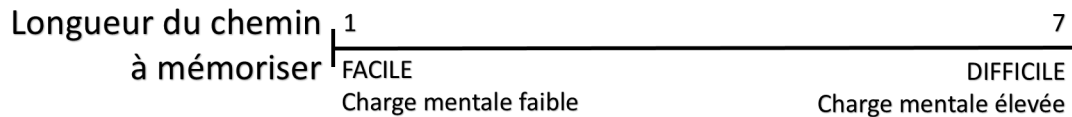


Figure 5.1 – Évènement de sélection du chemin : Plage de difficulté valide

5.2 Niveaux de difficulté hypothétiques de l'évènement de changement d'orientation

Concernant les niveaux de difficulté que peut produire ce mécanisme, nous avons joué sur la chance d'apparition d'un évènement de changement d'orientation. Nous avons donc défini deux niveaux de difficulté hypothétiques : un niveau de difficulté Facile (hypothèse charge de travail faible) où le sujet à 10% de chance qu'un évènement de changement d'orientation se produise lorsqu'il traverse un anneau de couleur et un niveau de difficulté Difficile (hypothèse charge de travail élevée) avec 100% de chance qu'un évènement de changement d'orientation se produise. On a donc la plage de difficulté hypothétique suivante (cf. **Figure 5.2**) :

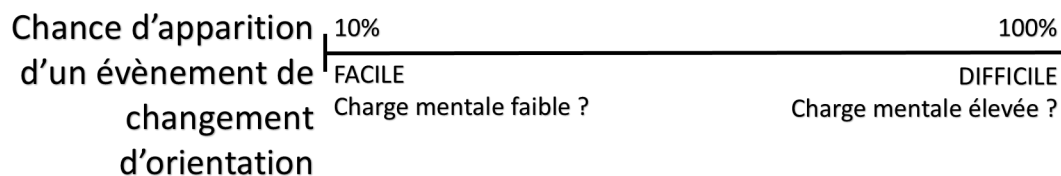


Figure 5.2 – Évènement de changement d'orientation : Plage de difficulté hypothétique

5.3 Niveaux de difficulté hypothétiques de la vitesse de jeu

Pour définir les niveaux de difficulté productibles par la vitesse de jeu, nous avons défini deux niveaux de difficulté hypothétiques : un niveau de difficulté Facile (hypothèse charge de travail faible) où la vitesse de jeu est de 8 secondes et un niveau de difficulté Difficile (hypothèse charge de travail élevée) avec une vitesse de jeu de 2 secondes. On a donc la plage de difficulté hypothétique suivante (cf. **Figure 5.3**) :

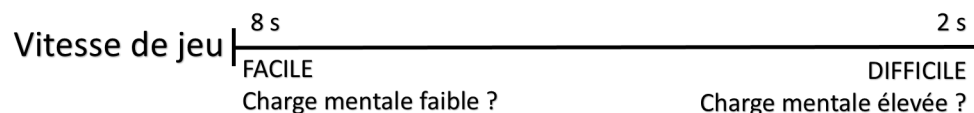


Figure 5.3 – Vitesse de jeu : Plage de difficulté hypothétique

5.4 Nombre de phases de restitution et Niveaux de difficulté du nombre de phases d'apprentissage

Le nombre de phase d'apprentissage et le nombre de phase de répétition doivent rester constants et à la même valeur peu importe le niveau de difficulté de l'environnement virtuel afin d'offrir une distribution

équitable des phases d'apprentissage et des phases de restitution ce qui nous permettra de réaliser des évaluations sur le même nombre de phase d'apprentissage que de phase de reproduction. Nous avons donc fixé arbitrairement le niveau de difficulté du nombre de phase d'apprentissage et du nombre de phase de répétition à 3.

5.5 Niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel

Maintenant que nous connaissons les niveaux de difficulté de chaque mécanisme dédié à la charge mentale de travail, nous pouvons réaliser une composition de ces derniers pour obtenir les niveaux de difficulté de l'environnement virtuel. Le danger en combinant le niveaux de difficulté de chaque mécanisme est d'obtenir un niveau de difficulté induisant une niveau beaucoup plus élevé de charge de travail qu'attendu. Par exemple, si l'on combine un chemin de longueur 7 à mémoriser (e.i. charge mentale de travail élevée) à une vitesse de jeux de 2 secondes (e.i. charge mentale de travail élevée), on obtient un niveau de difficulté impossible où l'utilisateur sera incapable de reproduire une seule fois le bon chemin. il donc va être nécessaire de déterminer à quelle niveau de difficulté de l'environnement virtuel la charge mental de travail du sujet devient trop élevée (i.e. surcharge mentale). En tenant compte de ce fait, nous avons défini cinq niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel (cf. **Figure 5.4**) :

Nombre de phase d'apprentissage et de restitution	3	3	3	3
Longueur du chemin à mémoriser	1	3	5	7
Chance d'apparition d'un évènement de changement d'orientation	10%	40%	70%	100%
Vitesse de jeu	8 s	6 s	4 s	2 s
	FACILE Charge mentale faible ?	MOYEN Charge mentale moyenne ?	DIFFICILE Charge mentale Élevée ?	IMPOSSIBLE Surcharge mentale ?

Figure 5.4 – Niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel

5.6 Validation des niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel

Une fois les niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel définis, il est nécessaire de les valider. Pour y parvenir, nous avons démarré une étude sur une population restreinte (5-10 sujets). Cette étude consiste à faire tester les cinq niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel dans un ordre aléatoire (e.g, difficile, moyen, impossible, facile) afin de contrebalancer un certain effet d'apprentissage

d'une augmentation linéaire du niveau de difficulté (e.g, facile, moyen, difficile, impossible). À chaque fin de test d'un niveau de difficulté, le sujet doit répondre au questionnaire standard NASA TLX [52]. Le questionnaire NASA TLX nous fournit un indice sur le niveau de charge de travail induit par le niveau de difficulté. Si le niveau de charge de travail indiqué par l'indice est approximativement le même que le niveau de charge de travail hypothétique induit par le niveau de difficulté hypothétique, ce dernier sera alors validé sinon il faudra redéfinir ce dernier.

5.7 Bilan

Au travers de ce chapitre, nous avons défini une ensemble de niveaux de difficulté hypothétiques pour l'environnement virtuel. Cette ensemble de niveaux de difficulté a été construit à partir des niveaux de difficulté des mécanismes d'induction de la charge de travail (valides pour certains, hypothétiques pour d'autres). Puis finalement, nous avons décrit l'étude entreprise (toujours en cours) pour la validation des niveaux de difficulté hypothétiques de l'environnement virtuel.

Conclusion

Dans le cadre du projet ANR SCOAL, ce stage a permis la réalisation d'une solution à la synchronisation multimodale, l'archivage de données multimodales et la visualisation multimodale. Cette solution intègre les technologies suivantes : LabStreamingLayer pour la synchronisation multimodale, le format de données GDF pour l'archivage de données multimodales et OpenViBE pour la visualisation multimodale. À l'issue de ce premier effort de recherche, un prototype (**cf. Figure 4.1**) a donc été mis en œuvre pour illustrer la pertinence des choix réalisés. Afin de valider ce prototype, nous nous sommes intéressé à l'évaluation de la charge de travail, l'attention, et la reconnaissance d'erreur d'un sujet dans un environnement interactif par analyse EEG. Un environnement virtuel a été construit au sein de ce système prenant la forme d'un jeu vidéo afin d'engager le sujet dans la tâche à réaliser et disposant de mécanismes capables d'induire de la charge de travail et de stimuler l'attention et la reconnaissance d'erreur du sujet. Puis, nous avons cherché à définir les niveaux de difficulté (i.e. niveaux de charge de travail) que l'environnement virtuel est capable de produire. La définition des niveaux de difficulté obtenus étant hypothétique il est nécessaire de valider cette dernière. Afin d'atteindre cet objectif, nous réalisons, à la date indiquée sur ce document, une étude sur une population restreinte utilisant le questionnaire NASA TLX [52] afin de valider ou modifier la définition des niveaux de difficulté de l'environnement virtuel.

Perspectives

À ce jour, nous disposons d'un système intégrant la solution SCOAL, destiné à l'évaluation de la charge de travail, de l'attention, de la reconnaissance d'erreur dans un environnement interactif par analyse EEG. Ce système dispose d'un environnement virtuel de type jeu vidéo capable d'induire de la charge de travail et de stimuler l'attention et la reconnaissance d'erreur. Des niveaux de difficulté de l'environnement virtuel sont également définis et sont en cours de validation.

Une fois les niveaux de difficulté de l'environnement virtuel validés par le NASA TLX, nous serons à même de vérifier la cohérence du niveau de charge de travail obtenu par l'analyse EEG du sujet. En effet, si l'on connaît le niveau de charge de travail induit au sujet par le niveau de difficulté de l'environnement virtuel, nous pourrions comparer ce niveau de charge de travail avec le niveau de charge de travail obtenu lors de l'analyse EEG. Cette comparaison nous permettra alors de vérifier la cohérence des résultats obtenus de l'analyse EEG. Les niveaux de difficulté de l'environnement virtuel validés, nous tenterons d'intégrer les mécanismes destinés à l'attention et la reconnaissance d'erreur au sein de ces niveaux de difficulté.

Concernant l'intégration des mécanismes destinés à l'attention, qui sont les suivants : la stimulation visuelle et la stimulation sonore. Une idée est de s'inspirer du paradigme d'oddball [48], [49], qui utilise une fréquence d'apparition des objets cibles de 10% que l'on pourra appliquer à la fréquence d'apparition de la stimulation visuelle et de la stimulation sonore qui auront donc 10% de chance de se produire lors ce que le sujet traverse un anneau de couleur bleu. De cette façon, nous pourrions intégrer la stimulation visuelle et la stimulation sonore dans tout les niveaux de difficulté étant donné que leur fréquence d'apparition est constante (10%). Si nous émettons l'hypothèse que les niveaux de difficulté de l'environnement virtuel que nous avons précédemment définis (**cf. Figure 5.4**) sont valides, nous obtenons les niveaux de difficulté suivants intégrant les mécanismes de stimulation de l'attention (**cf. Figure 5.5**) :

Chance d'apparition d'une stimulation visuelle	10%	10%	10%	10%
Chance d'apparition d'une stimulation auditive	10%	10%	10%	10%
Nombre de phase d'apprentissage et de restitution	3	3	3	3
Longueur du chemin à mémoriser	1	3	5	7
Chance d'apparition d'un évènement de changement d'orientation	10%	40%	70%	100%
Vitesse de jeu	8 s	6 s	4 s	2 s
	FACILE Charge mentale faible	MOYEN Charge mentale moyenne	DIFFICILE Charge mentale Élevée	IMPOSSIBLE Surcharge mentale

Figure 5.5 – Niveaux de difficulté de l'environnement virtuel avec stimulation visuelle et sonore

Concernant l'intégration des mécanismes destinés à la reconnaissance d'erreur, qui sont : la sélection erronée du chemin et la sélection aléatoire du chemin. La sélection erronée du chemin est un mécanisme intrinsèque au sujet, c'est-à-dire qu'on ne peut pas définir la fréquence d'apparition de la sélection erronée du chemin étant donné qu'elle dépend du moment où le sujet commet une erreur. La sélection aléatoire du chemin vise à produire une erreur d'interaction. L'utilisation de l'erreur d'interaction reste encore nouvelle dans le domaine de la BCI et peu de travaux ont été effectués sur cette erreur. Il faudra donc réaliser des tests afin de déterminer à quelle fréquence ou instant cet événement devra se produire pour que l'erreur d'interaction soit perceptible lors de l'analyse EEG. Ces tests se feront en parallèle d'un état de l'art sur l'analyse EEG. À partir de cet état de l'art et des niveaux de difficulté de l'environnement intégrant les mécanismes de stimulation de l'attention et de la reconnaissance d'erreur, il faudra réaliser des méthodes d'analyse EEG et un protocole de tests pour l'évaluation de la charge de travail, de l'attention et de la reconnaissance par. Puis, nous appliquerons ce protocole sur une population afin de valider les résultats obtenus des méthodes d'analyse EEG. Finalement, nous serons à même d'évaluer la charge de travail, l'attention et la reconnaissance d'erreur d'un sujet dans un environnement immersif par analyse EEG.

Avec un tel outil d'évaluation, de nombreux projets pourront voir le jour tels que :

Évaluation de stratégies de jeu : Navigation spatiale vs. Mémorisation d'objets

Afin d'apprendre le chemin, le sujet doit mémoriser une séquence d'objets. Cependant, une autre stratégie de jeu est possible. En effet, l'environnement virtuel utilisé étant un jeu vidéo 3D, il est possible de mémoriser spatialement un chemin comme le montre certaines études sur les singes que

nous essayerons d'adapter au contexte [53]. De ce fait, nous pourrions confronter ces deux stratégies et étudier leur performances et limites respectives.

Évaluation de difficulté : Pression temporelle vs. Difficulté perceptive

Nous pourrions confronter la difficulté de vitesse de jeu avec la difficulté de changement d'orientation pour, par exemple, voir si l'utilisateur est plus en difficulté pour reproduire le chemin quand la pression temporelle est forte que lors ce que les changements d'orientation sont constamment présents.

Évaluation d'interface utilisateur

Avec une telle évaluation, l'utilisation classique des questionnaires d'évaluation serait évitée et nous serions à même de dire qu'une interface utilisateur demande peu ou trop de ressources cognitives ou encore dire que telle partie de l'interface attire plus l'attention qu'une autre. Mais la composante la plus intéressante pour cette application reste l'évaluation de la reconnaissance d'erreur qui pourrait être capable de détecter des erreurs dans l'interface utilisateur que le sujet aurait perçu consciemment ou inconsciemment comme, par exemple, un bouton qui ne répond pas comme on l'aurait prévu [30].

Évaluation de périphériques interactifs

Avec un tel outil d'évaluation, nous serions capable de confronter des périphériques interactifs afin de déterminer que telle périphérique demande plus ou moins de ressources cognitives qu'un autre pour telle interaction ou encore dire que telle interaction avec tel périphérique interactif est détecté comme une erreur par le sujet [30].

Interface auto-corrective

Avec cet outil d'évaluation, nous serions à même de détecter des interactions dans l'interface que l'utilisateur aurait perçu consciemment ou inconsciemment erronées. De là, nous pourrions, par exemple, demander à l'utilisateur de redéfinir cette interaction afin de créer une interface plus intuitive et donc plus adaptée à ce dernier [54].

L'évolution logique de cet outil d'évaluation serait l'évaluation complète de l'expérience utilisateur par analyse EEG mais pas uniquement par analyse EEG. Il pourrait également être intéressant d'analyser d'autres signaux physiologiques (rythme cardiaque, conductance cutanée, activité oculaire, etc.) afin d'apporter des informations supplémentaires pour l'évaluation de l'expérience utilisateur. En s'inspirant de la définition de l'expérience utilisateur et en disposant d'un outil d'évaluation capable d'évaluer cette dernière, nous serions à même de juger de la qualité d'un produit en un coup d'oeil grâce à des graphiques synthétisant l'expérience utilisateur tel que celui-ci (cf. **Figure 5.6**) :

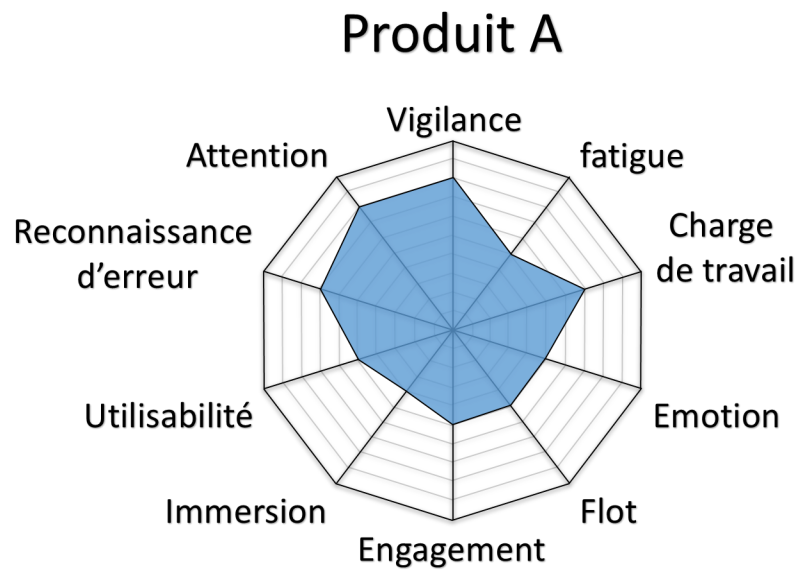


Figure 5.6 – Évaluation de l'expérience utilisateur pour un produit A

Bibliographie

- [1] Jérémy Laviolle and Martin Hachet. PapARt : interactive 3D graphics and multi-touch augmented paper for artistic creation. In *3D User Interfaces (3DUI), 2012 IEEE Symposium on*, pages 3 – 6, Costa Mesa, CA, United States, March 2012. IEEE.
- [2] Jérémy Frey, Renaud Gervais, Stéphanie Fleck, Fabien Lotte, and Martin Hachet. Teegi : Tangible EEG Interface. In *UIST-ACM User Interface Software and Technology Symposium*, Honolulu, United States, October 2014. ACM.
- [3] Martin Hachet, Benoit Bossavit, Aurélie Cohé, and Jean-Baptiste de la Rivière. Toucheo : Multitouch and stereo combined in a seamless workspace. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pages 587–592, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [4] Jacek Jankowski and Martin Hachet. Advances in Interaction with 3D Environments. *Computer Graphics Forum*, page 31, 2014.
- [5] Dennis Wobrock, Jérémy Frey, Delphine Graeff, Jean-Baptiste de la Rivière, Julien Castet, and Fabien Lotte. Continuous Mental Effort Evaluation during 3D Object Manipulation Tasks based on Brain and Physiological Signals. In *INTERACT*, Bamberg, Germany, September 2015.
- [6] Zixia Huang, Klara Nahrstedt, and Ralf Steinmetz. Evolution of temporal multimedia synchronization principles : A historical viewpoint. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 9(1s) :34 :1–34 :23, October 2013.
- [7] G. Blakowski and R. Steinmetz. A media synchronization survey : reference model, specification, and case studies. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 14(1) :5–35, Jan 1996.
- [8] Fernando Boronat, Jaime Lloret, and Miguel García. Multimedia group and inter-stream synchronization techniques : A comparative study. *Information Systems*, 34(1) :108 – 131, 2009.
- [9] Milton Chen. A low-latency lip-synchronized videoconferencing system. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '03*, pages 465–471, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [10] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and H. Ogawa. A comparison of media synchronization quality among reactive control schemes. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 1, pages 77–84 vol.1, 2001.
- [11] O.A. Ademoye and G. Ghinea. Synchronization of olfaction-enhanced multimedia. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 11(3) :561–565, April 2009.
- [12] Mario Montagud, Fernando Boronat, Hans Stokking, and Ray van Brandenburg. Inter-destination multimedia synchronization : schemes, use cases and standardization. *Multimedia Systems*, 18(6) :459–482, 2012.
- [13] C. Diot and L. Gautier. A distributed architecture for multiplayer interactive applications on the internet. *Network, IEEE*, 13(4) :6–15, Jul 1999.

- [14] M. Rocchetti, S. Ferretti, and Claudio E. Palazzi. The brave new world of multiplayer online games : Synchronization issues with smart solutions. In *Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008 11th IEEE International Symposium on*, pages 587–592, May 2008.
- [15] David E. Ott and Ketan Mayer-Patel. An open architecture for transport-level protocol coordination in distributed multimedia applications. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 3(3), August 2007.
- [16] F. Boronat, M. Montagud, and V. Vidal. Smooth control of adaptive media playout to acquire idms in cluster-based applications. In *Local Computer Networks (LCN), 2011 IEEE 36th Conference on*, pages 613–621, Oct 2011.
- [17] Sung-Jin Kim, Falko Kuester, and K.H.(Kane) Kim. A global timestamp-based approach to enhanced data consistency and fairness in collaborative virtual environments. *Multimedia Systems*, 10(3) :220–229, 2005.
- [18] Ishan Vaishnavi, Pablo Cesar, Dick Bulterman, Oliver Friedrich, Simon Gunkel, and David Geerts. From iptv to synchronous shared experiences challenges in design : Distributed media synchronization. *Signal Processing : Image Communication*, 26(7) :370–377, 2011.
- [19] Pablo Cesar, Dick C. A. Bulterman, Jack Jansen, David Geerts, Hendrik Knoche, and William Seager. Fragment, tag, enrich, and send : Enhancing social sharing of video. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 5(3) :19 :1–19 :27, August 2009.
- [20] Zixia Huang, Wanmin Wu, Klara Nahrstedt, Raoul Rivas, and Ahsan Arefin. Synccast : Synchronized dissemination in multi-site interactive 3d tele-immersion. In *Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Multimedia Systems, MMSys '11*, pages 69–80, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [21] Matthew Grivich. Timesynchronisation : Anatomy of the lsl time synchronisation. <https://code.google.com/p/labstreaminglayer/wiki/TimeSynchronization>, 2014 (dernière visite le 07/06/2015).
- [22] Matthew Grivich. Screen synchronization. <http://sccn.ucsd.edu/~mgrivich/ScreenSynchronization.html>, 2014 (dernière visite le 07/06/2015).
- [23] Matthew Grivich. Video synchronization. <http://sccn.ucsd.edu/~mgrivich/VideoSynchronization.html>, 2014 (dernière visite le 07/06/2015).
- [24] Matthew Grivich. Audio synchronization. <http://sccn.ucsd.edu/~mgrivich/AudioSynchronization.html>, 2013 (dernière visite le 07/06/2015).
- [25] A. Schlögl. An overview on data formats for biomedical signals. In Olaf Dössel and WolfgangC. Schlegel, editors, *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany*, volume 25/4 of *IFMBE Proceedings*, pages 1557–1560. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [26] Alois Schlögl. GDF - A general dataformat for BIOSIGNALS. *CoRR*, abs/cs/0608052, 2006.
- [27] Bob Kemp, Alpo Värri, Agostinho C. Rosa, Kim D. Nielsen, and John Gade. A simple format for exchange of digitized polygraphic recordings. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82(5) :391 – 393, 1992.
- [28] Yann Renard, Fabien Lotte, Guillaume Gibert, Marco Congedo, Emmanuel Maby, Vincent Delannoy, Olivier Bertrand, and Anatole Lécuyer. Openvibe : an open-source software platform to design, test, and use brain-computer interfaces in real and virtual environments. *Presence : teleoperators and virtual environments*, 19(1) :35–53, 2010.
- [29] Yakov Shafranovich. Common format and mime type for comma-separated values (csv) files. 2005.

- [30] Jérémy Frey, Christian Mühl, Fabien Lotte, and Martin Hachet. Review of the use of electroencephalography as an evaluation method for human-computer interaction. *CoRR*, abs/1311.2222, 2013.
- [31] J. Matias Kivikangas, Guillaume Chanel, Ben Cowley, Inger Ekman, Mikko Salminen, Simo Järvelä, and Niklas Ravaja. A review of the use of psychophysiological methods in game research. *Journal of Gaming Virtual Worlds*, 3(3) :181–199, 2011-09-13T00 :00 :00.
- [32] B.S. Oken, M.C. Salinsky, and S.M. Elsas. Vigilance, alertness, or sustained attention : physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117(9) :1885 – 1901, 2006.
- [33] Maarten A.S. Boksem, Theo F. Meijman, and Monique M. Lorist. Effects of mental fatigue on attention : An {ERP} study. *Cognitive Brain Research*, 25(1) :107 – 116, 2005.
- [34] M. A. Just, P. A. Carpenter, and A. Miyake. Neuroindices of cognitive workload : Neuroimaging, pupillometric and event-related potential studies of brain work. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4 :56–88, 2003.
- [35] Sander Nieuwenhuis, K. Richard Ridderinkhof, Jos Blom, Guido P.H. Band, and Albert Kok. Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors : Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38(5) :752–760, 2001.
- [36] Doug A Bowman, Joseph L Gabbard, and Deborah Hix. A survey of usability evaluation in virtual environments : classification and comparison of methods. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4) :404–424, 2002.
- [37] Mel Slater, Beau Lotto, Maria Marta Arnold, and María Victoria Sánchez-Vives. How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement. *Anuario de Psicología*, 2009, vol. 40, p. 193-210, 2009.
- [38] Antonio Damasio. *Descartes’ error : Emotion, reason and the human brain*. Random House, 2008.
- [39] Lennart E. Nacke and Craig A. Lindley. Affective ludology, flow and immersion in a first- person shooter : Measurement of player experience. *CoRR*, abs/1004.0248, 2010.
- [40] Gerald Matthews, Sian E Campbell, Shona Falconer, Lucy A Joyner, Jane Huggins, Kirby Gilliland, Rebecca Grier, and Joel S Warm. Fundamental dimensions of subjective state in performance settings : task engagement, distress, and worry. *Emotion*, 2(4) :315, 2002.
- [41] Marc Prensky. Computer games and learning : Digital game-based learning. *Handbook of computer game studies*, 18 :97–122, 2005.
- [42] Diana G Oblinger. The next generation of educational engagement. *Journal of interactive media in education*, 2004(1) :Art–10, 2004.
- [43] Saul Sternberg. High-speed scanning in human memory. *Science*, 153(3736) :652–654, 1966.
- [44] SAUL STERNBERG. Memory-scanning : Mental processes revealed by reaction-time experiments. *American Scientist*, 57(4) :pp. 421–457, 1969.
- [45] H. Karin Gomarús, Monika Althaus, Albertus A. Wijers, and Ruud B. Minderaa. The effects of memory load and stimulus relevance on the {EEG} during a visual selective memory search task : An {ERP} and erd/ers study. *Clinical Neurophysiology*, 117(4) :871 – 884, 2006.
- [46] John Sweller, Jeroen J.G. van Merriënboer, and Fred G.W.C. Paas. Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10(3) :251–296, 1998.
- [47] Marcel Adam Just, Patricia A Carpenter, Mandy Maguire, Vaibhav Diwadkar, and Stephanie McMains. Mental rotation of objects retrieved from memory : a functional mri study of spatial processing. *Journal of Experimental Psychology : General*, 130(3) :493, 2001.

- [48] David Friedman, Yael M. Cykowicz, and Helen Gaeta. The novelty p3 : an event-related brain potential (erp) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, 25(4) :355 – 373, 2001.
- [49] Albert Kok. On the utility of p3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 38(3) :557–577, 2001.
- [50] P.W. Ferrez and J. del R.Millan. Error-related eeg potentials generated during simulated brain x2013;computer interaction. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 55(3) :923–929, March 2008.
- [51] George A Miller. The magical number seven, plus or minus two : some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2) :81, 1956.
- [52] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, volume 52 of *Advances in Psychology*, pages 139 – 183. North-Holland, 1988.
- [53] Stephanie Etienne, Martin Guthrie, Michel Goillandeau, Tho Hai Nguyen, Hugues Orignac, Christian Gross, and Thomas Boraud. Easy rider : Monkeys learn to drive a wheelchair to navigate through a complex maze. *PLoS ONE*, 9(5) :e96275, 05 2014.
- [54] Felix Putze, Christoph Amma, and Tanja Schultz. Design and evaluation of a self-correcting gesture interface based on error potentials from eeg. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pages 3375–3384, New York, NY, USA, 2015. ACM.

Annexe A

Électroencéphalographie (EEG)

Dans les différentes zones du cerveau, l'influx nerveux fonctionne en relative cohérence et de façon rythmique : les neurones s'activent ensemble, comme une pulsation, puis se calment, puis s'activent de nouveau. Grâce à de petites électrodes placées sur le cuir chevelu et reliées à un électroencéphalographe (EEG) (**cf. Figure A.1**), on obtient un ensemble de signaux électriques également appelé signaux cérébraux.



Figure A.1 – Electroencéphalographie ¹

1. http://recherche.parisdescartes.fr/LaboratoireMemoireCognition_esl/Moyens-Techniques/EEG-Platform (dernière visite le 07/06/2015)