

Université de Montréal

***Virtual Sophrologist* : Un système de formation de
relaxation par neurofeedback en réalité virtuelle**

par Gu Guoxin

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

Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en informatique

Mars, 2018

© Gu Guoxin, 2018

Résumé

Les techniques de relaxation peuvent nous soulager du stress, de l'anxiété, de la douleur et des maladies. De nombreux chercheurs parviennent à détendre des participants par diverses méthodes. Cependant, peu de chercheurs s'intéressent à la capacité de relaxation, comme la vitesse à se détendre. Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est d'aider les gens à se détendre plus rapidement. Nous avons développé un système de formation de relaxation par le neurofeedback en réalité virtuelle, nommé *Virtual Sophrologist*, qui plonge les utilisateurs dans des environnements fantastiques par un casque de réalité virtuelle, guide les utilisateurs à suivre les instructions de sophrologie par une voix féminine et montre des rétroactions en temps réel, qui sont traduites à partir des scores de méditation collectés par un casque d'EEG. Afin d'évaluer ce système, nous avons mené une expérience avec 6 participants pendant un mois (8 séances de formation) et recueilli leurs données subjectives (l'auto-évaluation par un questionnaire) et les données objectives (par l'EEG) pour mesurer le niveau psychologique et calculer l'intervalle de temps à la relaxation qu'ils ont pris pour atteindre le maximum du score de méditation. Les résultats montrent une diminution du score d'anxiété et de dépression au point de vue psychologique, une diminution de l'intervalle de temps à la relaxation et une augmentation du maximum du score de méditation. Par conséquent, notre système est utile comme outil de formation pour les utilisateurs qui veulent se détendre rapidement et profondément quand ils en ont besoin.

Mots-clés : Sophrologie, Entraînement autogène, Réalité virtuelle, Neurofeedback, Biofeedback, EEG.

Abstract

Relaxation techniques can relieve us from stress, anxiety, pain, and diseases. Many researchers succeed in relaxing subjects by various methods. However, few are concerned about the ability of relaxation. Hence, the main goal of this study is to help people relax faster. We developed a virtual reality neurofeedback relaxation training system, called Virtual Sophrologist, which immerses users in fantastic environments by a Virtual Reality headset, guides users to follow the Sophrology instructions by a female voice, and displays feedback in real time, which is translated from the Meditation Score collected by EEG. To evaluate this system, we recruited 6 subjects to participate in our 8-session relaxation training and collected their subjective data (by self-report) and objective data (by an EEG headset) to measure the psychological level and to calculate the Time Interval to Relaxation that they took to reach the maximum Meditation Score. The results show decreases in Anxiety and Depression Score from the psychological level, a decrease in Time Interval to Relaxation and an increase in the maximum Meditation Score. Therefore, our system will be useful as a training tool for users who need or want to experience a fast and deep relaxation, whenever they need.

Keywords: Sophrology, Autogenic training, Virtual reality, Neurofeedback, Biofeedback, EEG.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des sigles.....	xii
Remerciements.....	xiv
Chapitre 1 : Introduction.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Motivations.....	3
1.3 Objectif de recherche.....	5
1.4 Organisation du mémoire.....	5
Chapitre 2 : Techniques et moyens de relaxation.....	7
2.1 Les techniques de relaxation.....	7
2.1.1 Introduction.....	7
2.1.2 L'entraînement autogène.....	10
2.1.3 La sophrologie.....	11
2.2 Réalité virtuelle.....	12
2.2.1 Du visiocasque à la réalité virtuelle.....	13
2.2.2 Immersion et présence.....	14
2.2.3 Casques.....	15
2.2.4 Les moteurs de jeu.....	17
2.2.5 Applications.....	20
2.3 Mesure cérébrale.....	20
2.3.1 EEG (Électroencéphalographie).....	21
2.3.2 Du point de vue de l'émotion.....	23
2.3.3 Le système international 10/20.....	24
2.3.4 Casques d'EEG.....	25

Chapitre 3 : Relaxation par neurofeedback en réalité virtuelle	26
3.1 Neurofeedback	26
3.1.1 Du biofeedback au neurofeedback	26
3.1.2 Trois types du neurofeedback	27
3.2 Approches courantes	29
3.2.1 Relaxation à l'aide de la réalité virtuelle	29
3.2.2 Relaxation par le biofeedback en réalité virtuelle	31
3.2.3 Relaxation par le neurofeedback	32
3.2.4 Relaxation par le neurofeedback dans la réalité virtuelle	33
3.3 Le système <i>Virtual Sophrologist 1.0</i>	35
3.3.1 Environnements dans la réalité virtuelle	37
3.3.2 Instructions de sophrologie	39
3.3.3 Rétroaction d'EEG	40
Chapitre 4 : Expérience, résultats et amélioration	45
4.1 Consentement	45
4.2 Critères	45
4.3 Métrique d'évaluation	46
4.3.1 Les scores d'EADH	46
4.3.2 L'intervalle de temps à la relaxation (IR)	47
4.4 Résultats	48
4.4.1 Les scores d'EADH	49
4.4.2 IR	50
4.4.3 Discussions	54
4.5 Le système <i>Virtual Sophrologist 2.0</i>	54
4.5.1 L'instrument de mesure cérébrale	55
4.5.2 Processeur	57
4.5.3 L'utilisateur	57
Chapitre 5 : Conclusion	60
Bibliographie	63
Annexe I : Consentement	69
Annexe II : Échelle d'anxiété et de dépression en milieu hospitalier (EADH)	71

Annexe III : Article publié..... 72

Liste des tableaux

Tableau I. Liste des casques de réalité virtuelle disponibles en version commerciale et leurs spécifications.....	15
Tableau II. Les plateformes supportées par Unity.....	18
Tableau III. Les cinq bandes de fréquence d'EEG et ses états mentaux et émotionnels correspondants	21
Tableau IV. Comparaison de casques d'EEG	25
Tableau V. Quatre types de scores affectifs du kit de développement logiciel d'Emotiv et leur interprétations, basé sur de nombreuses expériences	41
Tableau VI. Règles de traduction (en anglais)	42
Tableau VII. Moyenne, écart-type et gamme des EADH-A et des EADH-D pendant trois séances de recueil.....	49
Tableau VIII. Améliorations de scores affectifs	55

Liste des figures

Figure 1. Les trois phases du stress, figure tirée de (Chalvin 2010).....	2
Figure 2. Moyenne et variance des niveaux du sentiment de présence de l'expérience de Kosunen et al. pour un groupe utilisant le neurofeedback et un casque de réalité virtuelle (Neurofeedback), un groupe utilisant un casque de réalité virtuelle (Head Mounted Display) et un groupe utilisant un écran (Screen). Figure tirée de (Kosunen et al. 2016).	5
Figure 3. L'ordre du relâchement des groupes musculaires dans la technique de relaxation RPM fondée par Edmund Jacobson.....	8
Figure 4. Des composants dans une boucle de biofeedback.....	9
Figure 5. Alfonso Caycedo a différencié la conscience par trois états (la conscience pathologique, la conscience ordinaire et la conscience sophronique) et trois niveaux (le niveau de veille, le niveau soproliminal et le niveau de sommeil).....	11
Figure 6. Les différences entre RV (un environnement complètement virtuel), RA (une superposition d'objets virtuels sur le monde réel) et RM (pas une superposition simple, l'objet virtuel prend en compte les objets du monde réel). Figure tirée de (Magic Leap).	13
Figure 7. L'interface de Unity par défaut comprend cinq fenêtres : la fenêtre du projet (The Project Window) contenant les dossiers et les fichiers du projet, la fenêtre de la scène (The Scene Window), la fenêtre de l'hierarchie (The Hierarchy Window) contenant tous les objets de la scène, la fenêtre de l'inspecteur (The Inspector Window) contenant les paramètres d'un objet et la barre d'outils (The Toolbar). Figure tirée de (Unity 2017).....	18
Figure 8. L'interface de l'Unreal Engine 4 par défaut comprend : des éditeurs d'objets, des navigateurs (le navigateur de projet et le navigateur de contenu) et des outils. Figure tirée de (Engine 2017).....	19
Figure 9. Comparaison entre les méthodes de mesure cérébrale (EEG/ERP, MEG, fNIRS/TCDS, PET et fMRI/DTI) sur la résolution spatiale (Spatial Resolution, la précision d'une mesure par rapport à l'espace), la résolution temporelle (Temporal Resolution, la précision d'une mesure par rapport au temps) et le degré d'immobilité (Degree of immobility). Figure tirée de (iMotions 2015).	22

Figure 10. Circuits cérébraux pour l'émotion comprend une série de connexions de l'hypothalamus (Hypothalamus) au thalamus antérieur (Anterior thalamus) et cortex cingulaire (Cingulate cortex) et la sortie du cortex cingulaire (Cingulate cortex, intégration des signaux) vers l'hippocampe (Hippocampal formation) puis vers l'hypothalamus (Hypothalamus), figure tirée de (Kolb, Whishaw 2003)..... 23

Figure 11. Le système international 10/20 pour l'emplacement des électrodes lors d'un EEG. Les lettres F, T, P, O, A et Fp désignent respectivement les lobes frontal, temporal, pariétal, occipital, de l'oreille et des sites polaires frontaux. La lettre C consiste à identifier le centre du crâne. Les nombres pairs (2, 4, 6, 8) se réfèrent aux positions des électrodes sur l'hémisphère droit, tandis que les nombres impairs (1, 3, 5, 7) se rapportent à ceux de l'hémisphère gauche. La lettre z (zéro) représente une électrode placée sur la ligne médiane. Figure tirée de (Alarcao, Fonseca 2017) 24

Figure 12. Neuroptimal, exemple d'un système emballé de formation cérébrale, figure tirée de (Co. 2017). 28

Figure 13. LoRETA neurofeedback à la maison avec l'assistance d'un clinicien. Une séance coûte au moins £135. Figure tirée de (Brainworks 2017)..... 29

Figure 14. Moyenne et variance des scores de méditation de l'expérience de Perhakaran et al. pour 15 participants utilisant un visiocasque (VRT) et les 15 autres utilisant l'imagerie guidée (IMAGINARY). Figure tirée de (Perhakaran et al. 2016)..... 30

Figure 15. Dispositif de l'expérience de Gromala et al, incluant une visionneuse de réalité virtuelle et deux petits capteurs de la réponse galvanique de la peau dans le but de réduire la douleur. Figure tirée de (Gromala et al. 2015)..... 31

Figure 16. Moyenne des niveaux de la douleur (Average Pain Levels) pour 7 participants utilisant une visionneuse de réalité virtuelle (VR) et 6 autres utilisant la piste audio (Control) avant l'expérience (Before) et après l'expérience (After). Figure de (Gromala et al. 2015).... 32

Figure 17. Dispositif du système SOLAR développé dans le but d'apprendre la méditation. SOLAR retourne visuellement le score de méditation du casque d'EEG Emotiv EPOC par l'opacité de la silhouette sur l'écran. Figure tirée de (Prpa et al. 2015). 33

Figure 18. Moyenne et variance des profondeurs de méditation de l'expérience de Kosunen et al. pour un groupe utilisant le neurofeedback et un casque de réalité virtuelle (Neurofeedback), un

groupe utilisant un casque de réalité virtuelle (Head Mounted Display) et un groupe utilisant un écran (Screen). Figure tirée de (Kosunen et al. 2016).	34
Figure 19.L'interface utilisateur de notre système <i>Virtual Sophrologist</i> , incluant trois éléments : (1) une instruction de sophrologie (Instruction), (2) une rétroaction d'EEG (Rétroaction) et (3) un environnements virtuel.....	35
Figure 20.Architecture du système <i>Virtual Sophrologist 1.0</i> , basée sur la boucle de neurofeedback. La mesure cérébrale donne le score de méditation de l'utilisateur à l'application sur le smartphone. Le processeur dans cette application traduit le score de méditation en une rétroaction. Et l'utilisateur s'immerge dans un environnements virtuel, guidé par des instructions de sophrologie et des rétroactions en temps réel.	36
Figure 21.Scène « Seaside » de notre environnement, une vue aubord de mer. Il y a une montagne derrière et le soleil dans le ciel. Cette scène inspire la fiabilité et la tranquillité.	37
Figure 22.Scène « Japanese Garden » de notre environnement, une vue dans un jardin japonais. Il y a une rivière, un pont, des plantes et le soleil.....	38
Figure 23.Scène « Waterfall » de notre environnement, une vue de la chute dans la montagne. Il y a aussi un lac à gauche et le soleil dans le ciel bleu.	38
Figure 24.Le plugin <i>RTVoice</i> peut convertir le texte en parole (Text to speak), le prononcer par la voix choisie de l'appareil (Voices) et même générer le spectre (Spectrum). Figure tirée de (Crosstales 2016).	39
Figure 25.Le casque Emotiv EPOC, qui contient des électrodes et un dongle USB, mesure les activités cérébrales. Figure tirée de (Poulsen,Krøgholt 2013).....	40
Figure 26.Une capture d'écran du logiciel d'Emotiv, qui montre les 14 ondes et la qualité de connexion (Contact Quality) et offre le téléchargement des données.	41
Figure 27.Dispositif du système. L'utilisateur porte un casque d'EEG Emotiv EPOC et un casque de la réalité virtuelle Samsung Gear VR. L'EPOC mesure les activités cérébrales de l'utilisateur et les transmet à son logiciel. Nous recueillons le score de méditation par notre projet « Serveur » dans Unity sur l'ordinateur. Le score de méditation est envoyé à l'application au smartphone. L'application le traduit en une rétroaction et la montre à l'utilisateur. Il s'immerge dans un environnement virtuel par le Gear VR et suit l'instruction de sophrologie et la rétroaction.....	43

Figure 28. IR dans le cas où le participant atteint le score de méditation de 0,6667. Dans cet exemple, le maximum du score de méditation (Meditation Score) du participant est de 0,6667 et il est atteint après 279,273 seconds (IR) pour la première fois. 47

Figure 29. IR dans le cas où le participant n’atteint pas le score de méditation de 0,6667. Dans cet exemple, le maximum du score de méditation du participant est de 0,5917 et il est atteint après 506,051 seconds. 48

Figure 30. La variation des moyennes de EADH-A et EADH-D pendant trois séances de recueil. Nous constatons une diminution pour EADH-D (5,67 – 4,50 – 4,17) et pour EADH-A (8,33 – 6,33 – 6,33). 49

Figure 31. Moyenne d’IR pour tous les participants, une diminution d’IR pour 3 participants qui ont atteint le score de méditation de 0,6667 (de 541,768s à 330,286s) et une augmentation d’IR pour 3 autres qui n’ont jamais atteint le score de méditation de 0,6667 (de 323,637s à 641,569s). 50

Figure 32. Un exemple du score de méditation d’un participant. Dans cet exemple, le participant n’a pas atteint le score de méditation de 0,6667 jusqu’à la 5^{ème} séance. L’IR diminue avec la diminution du maximum du score de méditation, en comparant la 1^{ère} séance avec la 2^{ème} séance. L’IR s’accroît avec l’augmentation du maximum du score de méditation, en comparant la 2^{ème} séance avec la 3^{ème} séance. Particulièrement, quand le participant a atteint de 0,6667 dans la 5^{ème} séance, la 6^{ème} séance et la 7^{ème} séance, l’IR diminue. 51

Figure 33. Les raisons de l’augmentation de l’IR : 68,75% de l’augmentation de l’IR est liée à l’accroissement du maximum du score de méditation, 25% est liée à la condition physique et mentale (avoir un rhume), et 6% est liée à l’inattention. 52

Figure 34. Augmentation des maximums du score de méditation pour tous les groupes. 53

Figure 35. Architecture du système *Virtual Sophrologist 2.0*, basée sur l’architecture de la version *1.0*. La mesure cérébrale donne aussi le score de frustration et le score de concentration de l’utilisateur en plus du score de méditation à l’application sur le smartphone. Le nombre des règles de traduction augmente. Une révision a été ajoutée au début et un résumé à la fin de chaque séance. 55

Figure 36. Visualisation des trois scores au projet « Serveur ». Les trois flèches indiquent respectivement les trois scores en temps réel. La couleur du « vert » au « rouge » pour le score de frustration (Frustration) présente un score de 0 à 1, de l’état confortable à l’état

inconfortable. La couleur du « rouge » au « vert » pour le score de concentration (Focus) présente un score de 0 à 1, de l'état inattentif à l'état attentif. La couleur du « rouge » au « vert » pour le score de méditation (Meditation) présente un score de 0 à 1, de l'état stressé à l'état détendu.....	56
Figure 37.Nouvelles règles de traduction (en anglais)	57
Figure 38.Scène « Login » permet à l'utilisateur de créer un compte (Register) ou se connecter à son dossier (Log In) en tapant avec un clavier virtuel.	58
Figure 39.Scène « Review » permet à l'utilisateur de se souvenir le résultat précédant et de choisir l'environnement qu'il veut.....	58
Figure 40.Scène « Summary » offre un résumé d'IR de toutes les séances précédentes à l'utilisateur.	59
Figure 41.Nouveau dispositif du système. Le changement par rapport au système 1.0 : Nous recueillons trois scores et les visualisons par notre projet « Serveur » dans Unity sur l'ordinateur. Ces scores sont envoyés à l'application. Le nombre des règles de traduction augmente.	59
Figure 42.Prédiction de la taille du marché de l'application de la réalité virtuelle et la réalité augmentée pour différents cas d'utilisation en 2025. Figure tirée de (Richter 2016).....	60

Liste des sigles

RPM : la relaxation progressive des muscles

ECG : Électrocardiographie

EEG : Électroencéphalographie

MEG : Magnétoencéphalographie

EMG : Électromyographie

RV : la réalité virtuelle

RA : la réalité augmentée

RM : la réalité mixte

IRMf : l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

TDAH : le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité

UDP : user datagram protocol (anglais)

IR : l'intervalle de temps à la relaxation

EADH : l'échelle d'anxiété et de dépression en milieu hospitalier

EADH-A : le score d'anxiété de l'échelle d'anxiété et de dépression en milieu hospitalier

EADH-D : le score de dépression de l'échelle d'anxiété et de dépression en milieu hospitalier

À mon mari, l'homme de ma vie, tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égal et ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

À ma mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour, mon respect et toute la considération pour les sacrifices que tu as consentis depuis ma naissance. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur et de santé.

À mon père et ma tante pour leur amour infini et leur soutien inconditionnel.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à tous ceux qui m'ont aidé au cours des deux dernières années.

Tout d'abord, je remercie sincèrement mon directeur de recherche, M. Claude Frasson, de m'avoir donné l'opportunité de participer à une recherche intéressante. Sa grande expérience, sa patience, ses encouragements et son financement ont contribué à la rédaction de ce mémoire.

Deuxièmement, mes remerciements vont au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada - Subventions de recherche et développement coopérative (CRSNG-RDC) et à M. Yan Cyr, président de la compagnie Beam Me Up Games pour leur support financier.

Enfin, je dois mes plus sincères remerciements à ma famille, amis et collègues de l'université pour leur présence, encouragements et conseils.

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Contexte

Selon Statistique Canada¹, 6,7 millions de Canadiens de 15 ans et plus se sentaient assez ou extrêmement stressés dans leur vie quotidienne en 2014. Et, depuis 2003, les femmes souffraient du stress plus que les hommes. Les personnes de 35 à 54 ans avaient les taux de stress les plus élevés. La proportion de personnes stressées au Québec (26,2%) était supérieure à la moyenne nationale (23%).

Le stress est plus grave dans le monde, comme une épidémie mondiale². Même au Japon, le taux de stress atteint 60%. Les États-Unis et la France partagent la même proportion (40%). En Europe, le stress est plus sérieux que les autres problèmes de santé, comme les problèmes de sommeil, anxiété, irritabilité, maux de tête et maladies cardiaques.

Les sources de stress sont diverses, citant comme exemples : le travail, les problèmes financiers, la famille, la contrainte de temps, la santé, etc.³ En effet, toutes ces sources sont dues à divers changements de la vie courante, parce que tout changement comprend une demande à laquelle nous devons nous adapter. La façon dont nous percevons le changement détermine les effets du stress. La perception positive est idéale, alors que la perception négative peut déclencher un bouleversement dans notre structure psychique et somatique.

Par exemple, notre fréquence cardiaque et notre pression sanguine augmenteront, notre transpiration augmentera, nos mains et nos pieds deviendront froids, parfois notre ouïe et notre vision seront aiguisées, etc. Cet ensemble des moyens physiologiques et psychologiques qui est mis en œuvre pour nous adapter à un événement est nommé le stress (Selye 1956). Selon la théorie du syndrome général d'adaptation de Selye, le stress consiste en trois phases :

¹ <https://www.statcan.gc.ca/pub/82-625-x/2015001/article/14188-fra.htm>

² <http://magazine.thebusylifestyle.com/2017/09/15/stress-statistics-worldwide/>

³ <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=fra&retrLang=fra&id=1050510&pattern=&stByVal=1&p1=1&p2=31&tabMode=dataTable&csid=>



Figure 1. Les trois phases du stress, figure tirée de (Chalvin 2010).

1. Réaction d'alarme (quelques minutes à 24 heures) : quand l'organisme ne s'adapte pas un agent stressant, il va réagir par une phase de choc (un état de souffrance généralisé mais supportable, comme l'hypovolémie, l'hypoglycémie, etc.) et par une phase contre-choc (une réaction de se ressaisir pour éviter la situation pathogène, comme une augmentation de pression artérielle, une augmentation du tonus musculaire, etc.).
2. Phase de résistance : quand l'agent stressant se prolonge, l'organisme va continuer la phase contre-choc.
3. Phase d'épuisement : l'organisme ne peut plus s'adapter au stimulus provoqué par l'agent stressant.

Même si le stress a ses effets positifs (la phase d'alarme peut améliorer l'acquisition et/ou l'expression d'immunoprotecteur (Dhabhar 2014)), la phase d'épuisement peut mener à l'épuisement de l'organisme, de graves troubles et maladies et même à la mort (Selye 1956). De nombreux chercheurs ont montré les effets de la continuation de stress, incluant l'endommagement de l'hippocampe dans les cerveaux de rongeurs (Sapolsky 1996), des effets biochimiques nocifs, de l'anxiété, de la dépression (McEwen et al. 2012), etc. De plus, ces modifications biochimiques dans l'organisme affaiblissent le système immunitaire (Dhabhar

2014) et créent ainsi un terrain propice à la maladie, comme la cardiopathie, les maladies intestinales, l'herpès, etc.

Comme notre vie consiste en des changements, le stress est inévitable. Heureusement, le stress peut être positif (quand il est faible et temporaire) ou négatif (quand il est intense et durable) et il est possible de changer un stress négatif en un stress positif. Aussi, nous pouvons nous détendre à l'aide de techniques de relaxation pour libérer les effets de stress ou échapper temporairement au stress. Beaucoup de chercheurs ont prouvé que la relaxation peut soulager la douleur (Kabat-Zinn 1982), améliorer l'immunité (Gruzelier 2002), réduire l'anxiété (Manzoni et al. 2008), etc.

1.2 Motivations

Plusieurs médecins et psychologues ont contribué à de multiples techniques de relaxation, telles que la relaxation progressive des muscles, l'hypnose, l'entraînement autogène, la sophrologie, etc. Au début, ils ont évalué l'efficacité de ces techniques par des moyens subjectifs (des questionnaires psychologiques) puis avec des moyens objectifs (des activités physiologiques : la fréquence de respiration, la fréquence cardiaque, etc.). Avec l'évolution de la science et de la technologie, ils ont essayé des mesures plus précises et plus profondes. Ils ont mesuré la tension des muscles par l'électrocardiographie (ECG), les signaux électriques résultant de l'activité cérébrale par l'électroencéphalographie (EEG), les signaux magnétiques résultant de l'activité cérébrale par la magnétoencéphalographie (MEG), etc.

Ensuite, après la découverte du circuit de la récompense (Olds, Milner 1954) (un système encourageant à répéter les expériences plaisantes), les chercheurs ont trouvé que montrer ces résultats physiologiques aux individus en temps réel peut les aider à se détendre. Alors, le biofeedback (la rétroaction biologique) est compté comme une technique de relaxation. Spécialement, quand les résultats physiologiques sont mesurés par l'EEG, cela s'appelle le neurofeedback. Dans le but de rendre les autres techniques de relaxation plus efficaces, les chercheurs ont commencé à les utiliser avec le biofeedback ou le neurofeedback. Par exemple, un groupe de l'Université Simon Fraser a conçu un environnement de neurofeedback pour aider les participants à apprendre la méditation (Prpa et al. 2015).

En parallèle, les chercheurs ne cessent jamais d'améliorer les techniques de relaxation existantes en employant les nouvelles technologies, notamment la réalité virtuelle. L'imagerie guidée est une technique de relaxation qui est limitée par la capacité de visualisation mentale de l'individu. Mais la réalité virtuelle peut plonger directement les utilisateurs dans un environnement virtuel magnifique, grâce à ses deux caractéristiques : l'immersion et le sentiment de présence. Cela développe la thérapie par réalité virtuelle, qui fait partie des psychothérapies cognitivo-comportementale. (Perhakaran et al. 2016) ont prouvé que l'effet de la méditation en employant un visiocasque est meilleur que celui utilisant la technique imaginaire.

Puisque le neurofeedback et la réalité virtuelle contribuent à la relaxation, la combinaison du neurofeedback avec la réalité virtuelle vaut la peine que nous l'examinons. Certains chercheurs ont prouvé l'efficacité de cette combinaison, par exemple : (Kosunen et al. 2016) ont introduit un système de méditation de neurofeedback en réalité virtuelle, *RelaWorld*. Ils ont mené une expérience en trois groupes : le groupe de *RelaWorld* (avec neurofeedback et réalité virtuelle) « Neurofeedback », le groupe sans neurofeedback mais avec réalité virtuelle « Head Mounted Display » et le groupe sans réalité virtuelle sans neurofeedback « Screen ». Le groupe de *RelaWorld* a eu les meilleurs résultats sur le niveau de la relaxation, sur le niveau du sentiment de présence ou sur la concentration, etc. La Figure 2, tirée de leur article, confirme que la réalité virtuelle peut vraiment offrir le sentiment de présence (« Head Mounted Display » par rapport à « Screen »). Ils ont aussi trouvé que le neurofeedback peut améliorer le sentiment de présence en réalité virtuelle (« Neurofeedback » par rapport à « Head Mounted Display »).

Il faut noter que la plupart des recherches se sont concentrées sur le fait que les participants se sentent détendus ou pas. En d'autres termes, toutes les métriques d'évaluation sont basées sur le niveau de la relaxation. Cependant, affrontant le monde qui change de plus en plus vite, ce dont nous avons besoin est une capacité importante, la capacité de relaxation, pour nous adapter aux conditions nouvelles. Cette capacité détermine la capacité de gestion du stress puis la capacité de gestion de l'émotion. À notre connaissance, aucun chercheur ne s'est intéressé à la capacité de relaxation, incluant la vitesse de se détendre, la capacité de se détendre n'importe où, etc.

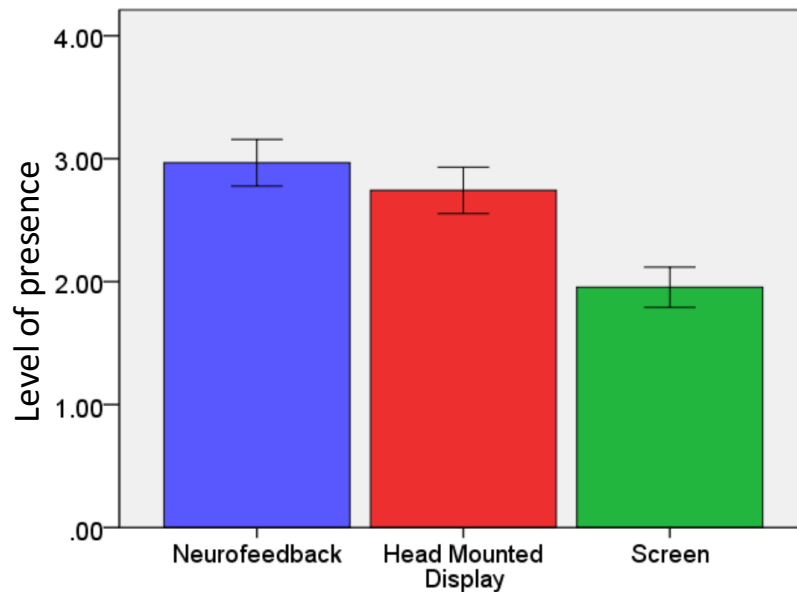


Figure 2. Moyenne et variance des niveaux du sentiment de présence de l'expérience de Kosunen et al. pour un groupe utilisant le neurofeedback et un casque de réalité virtuelle (Neurofeedback), un groupe utilisant un casque de réalité virtuelle (Head Mounted Display) et un groupe utilisant un écran (Screen). Figure tirée de (Kosunen et al. 2016).

1.3 Objectif de recherche

Par conséquent, nous nous intéressons à trouver une méthode de relaxation permettant aux usagers de la pratiquer en réalité virtuelle avec le neurofeedback dans le but de leur permettre non seulement de se sentir détendus, mais aussi de renforcer leurs capacités de relaxation, surtout la capacité de se détendre rapidement. En bref, le but principal de cette étude est d'aider les gens à se détendre plus rapidement par le neurofeedback en réalité virtuelle.

1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire se compose de 5 chapitres. Il débutera par des introductions des techniques que nous avons employées dans notre système dans le chapitre 2. Le chapitre 3 introduira le neurofeedback et les approches courantes à la relaxation et finalement, la première version de notre système, nommé *Virtual Sophrologist 1.0*. Le chapitre 4 décrira l'expérience que nous avons réalisée avec 6 participants pendant 8 séances de formation,

exposera les résultats obtenus pour évaluer et montrer les effets de notre système, et présentera la version avancée de notre système. Ce mémoire se conclut avec chapitre 5, qui expose les contributions de notre recherche et les attentes des recherches futures.

Chapitre 2 : Techniques et moyens de relaxation

Ce chapitre présente les techniques que nous avons utilisées dans notre système, soit les techniques de relaxation (l'entraînement autogène et surtout la sophrologie), la réalité virtuelle, la mesure cérébrale (l'EEG en particulier), incluant leurs définitions, fonctions, histoires brèves, et applications.

2.1 Les techniques de relaxation

À partir des années 70, les techniques de relaxation ont démontré leurs effets positifs tant au niveau physique qu'émotionnel. Elles pouvaient générer une diminution de la fréquence respiratoire et cardiaque, de la tension artérielle et musculaire, et du niveau d'alerte (Benson et al. 1974).

Face au stress, les chercheurs nous offrent diverses techniques de relaxation, telles que le travail respiratoire, la relaxation progressive des muscles, l'imagerie guidée, la méditation, le biofeedback, l'hypnose, l'entraînement autogène, la sophrologie, etc.

2.1.1 Introduction

Le travail respiratoire est au cœur des multiples techniques de relaxation. Il vise à rétablir un rythme ventilatoire normal en contrôlant l'intensité de la respiration. Par exemple, la cohérence cardiaque (Elliott 2005) consiste à effectuer inspiration-expiration toutes les 10 secondes pendant 5 minutes. Inspiration et expiration s'alternent toutes les 5 secondes sans pause. Ou un autre processus de respiration profonde : inspirez en comptant, « Un », expirez en comptant, « Un, Deux », puis augmentez la durée, mais toujours continuez à expirer à un compte mental qui est deux fois plus long qu'inspirer, inspirez en comptant, « Un, Deux », expirez en comptant, « Un, Deux, Trois, Quatre », jusqu'à six comptes pour inspirer et douze comptes pour expirer.

La relaxation progressive des muscles (RPM) désigne des exercices pour relâcher le groupe de muscles dans le but de la détente mentale. Datant de 1928, son fondateur Edmund Jacobson découvre la présence d'une impulsion électrique vers les muscles (Jacobsen 1929).

Elle est trop faible pour mettre en œuvre le mouvement, mais suffisante pour activer le système nerveux. De plus, il a expérimenté que la tension et l'effort étaient toujours accompagnés d'un raccourcissement des fibres musculaires et la réduction du tonus musculaire diminue l'activité du système nerveux. Puisque l'activation émotionnelle est incompatible avec le relâchement musculaire, l'apprentissage du relâchement musculaire peut être utilisé pour éviter l'activation émotionnelle. La RPM nous demande d'induire une tension spécifique à un groupe de muscles, maintenir cette tension pendant environ 5 secondes, puis relâcher la tension. Le relâchement musculaire se fait souvent des pieds au front, comme présenté sur la Figure 3. Par exemple : « Tendez les muscles de vos pieds en recourbant vos orteils. Relâchez », « Serrez les muscles de vos cuisses. Relâchez », « Plissez le front en remontant les sourcils. Relâchez ». La RPM est considérée comme la base du biofeedback, l'entraînement autogène et la sophrologie.

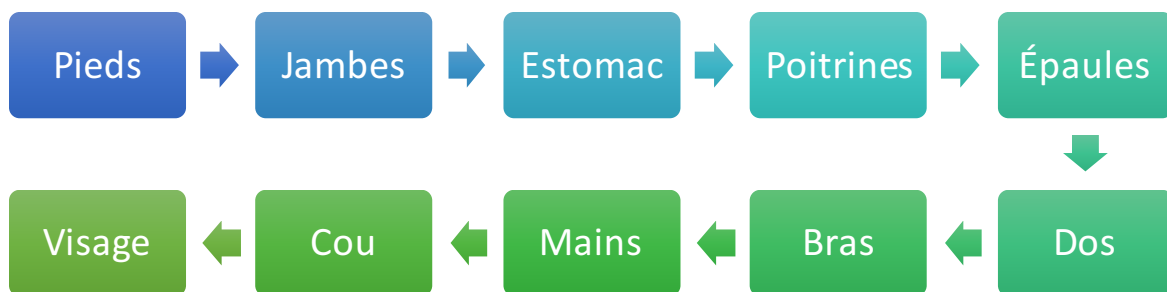


Figure 3. L'ordre du relâchement des groupes musculaires dans la technique de relaxation RPM fondée par Edmund Jacobson.

L'imagerie guidée consiste à visualiser mentalement des scènes calmes et paisibles. Par exemple : « Imaginez un endroit où vous aimeriez aller », « vous aimez cet endroit et vous vous y sentez bien », « regardez les couleurs qui vous entourent, les textures », etc.

La méditation est une pratique mentale de pensée avec une grande concentration d'esprit dans le but de produire une paix intérieure, des états de conscience modifiés, la vacuité de l'esprit, etc. Les techniques de méditation sont diverses par leur foyer d'attention : le souffle, la visualisation, la vacuité, etc. Elle est aussi au cœur de nombreuses pratiques spirituelles, comme le yoga.

Le yoga signifie « unité » en sanscrit. Il est constitué d'une série de méthodes pour atteindre l'harmonie physique, psychique et spirituelle, y compris la méthode de position, la méthode de respiration, la méthode de méditation, etc. Le 1^{er} décembre 2016, il a été classé par l'UNESCO comme patrimoine culturel immatériel. Il existe cinq voies majeures de yoga : l'hatha-yoga (l'exercice du positionnement du corps), le raja-yoga (l'exercice physique et mental parallèle, avec la méditation), le jnana-yoga (yoga du savoir), le bhakti-yoga (yoga de la piété), et le karma-yoga (yoga d'action).

Le biofeedback ou la rétroaction biologique est un ensemble de techniques, qui peut être utilisé pour apprendre à contrôler les fonctions organiques. La Figure 4 montre que, dans une boucle de biofeedback, il faut un instrument précis pour mesurer l'activité physiologique, un processeur pour traduire des changements physiologiques en rétroaction audiovisuelle, et un utilisateur pour recevoir cette information. L'activité physiologique peut être l'activité cardiaque qui est mesurée par l'électrocardiographie (ECG), la tension des muscles qui est mesurée par l'électromyographie (EMG), les signaux électriques résultant de l'activité cérébrale qui sont mesurés par l'électroencéphalographie (EEG), les signaux magnétiques résultant de l'activité cérébrale qui sont mesurés par la magnétoencéphalographie (MEG), etc.

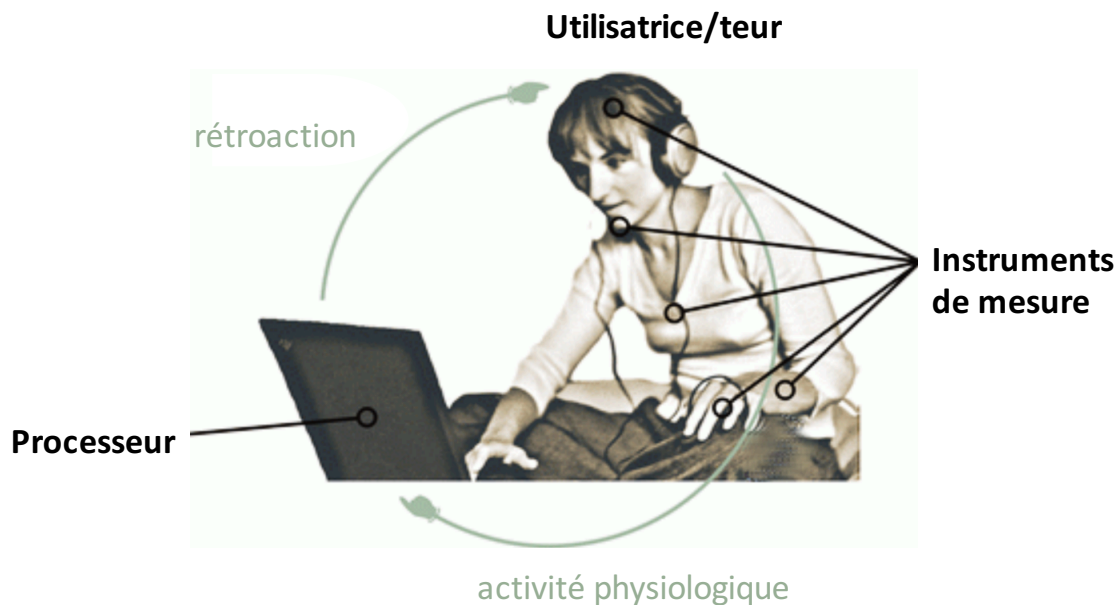


Figure 4. Des composants dans une boucle de biofeedback

L'hypnose est un terme qui consiste en une racine grecque « Hupnos » (sommeil) et une racine anglaise « osis » (état), donc il désigne un état de sommeil profond (en fait, un état de conscience). Dans cet état, une personne (le participant) est guidée par un autre (l'hypnotiseur) pour répondre aux suggestions de changements dans l'expérience subjective, altération de la perception, de la sensation, de l'émotion, de la pensée ou du comportement. L'hypnotiseur peut être le participant lui-même, cela s'appelle **l'autohypnose**.

2.1.2 L'entraînement autogène

En 1932, le psychiatre allemand Johann Heinrich Schultz (Schultz 1932) a proposé une technique de relaxation basée sur l'autohypnose et la méditation, l'entraînement autogène (Heller 2012). Il a présumé que le lien corps-esprit était inconscient mais contrôlable. Et il a aussi combiné certains principes médicaux de son temps, en particulier : la **pesanteur** est liée à une tendance à l'allongement de nos muscles extenseurs et la **chaleur** résulte d'un plus grand débit de sang. Par conséquent, l'entraînement autogène débute par « Je suis calme, tout-à-fait calme », se compose de cinq phases cruciales suivantes, et finit par « Mon front est froid. Je suis calme ».

1. **Pesanteur** : « Mon bras droit est lourd, de plus en plus lourd »
2. **Chaleur** : « Mon bras est lourd et chaud »
3. **Cœur** : « Mon rythme cardiaque est calme et stable »
4. **Respiration** : « Ma respiration est suprêmement calme »
5. **Organe** : « Mon estomac est doux et chaud »

Pour le pratiquer, il faut agir « phase par phase », c.-à-d. acquérir parfaitement une phase avant de passer à la suivante. Et c'est la position allongée que nous avons besoin de prendre.

Aujourd'hui, l'entraînement autogène reste largement utilisé dans le domaine de la gestion du stress ou du contrôle de l'anxiété.

2.1.3 La sophrologie

Inspiré de l'entraînement autogène, Alfonso Caycedo a élaboré une technique, la sophrologie, qui vise à l'harmonie du corps et esprit (Caycedo 1964). Il l'a nommée « sophrologie » à partir de racines grecques antiques : « Sos » (bien portant, harmonie), « Phren » (conscience, esprit) et « Logos » (étude). De plus, « sophrologie » est un terme opposé à la « schizophrénie » : « schi » (rupture), « Sos » et « Phren ».

Contrairement à l'entraînement autogène qui porte le corps-esprit inconscient, la sophrologie est tout-à-fait une étude de la conscience. Alfonso Caycedo a différencié la conscience par trois états et trois niveaux, comme montrés sur la Figure 5.

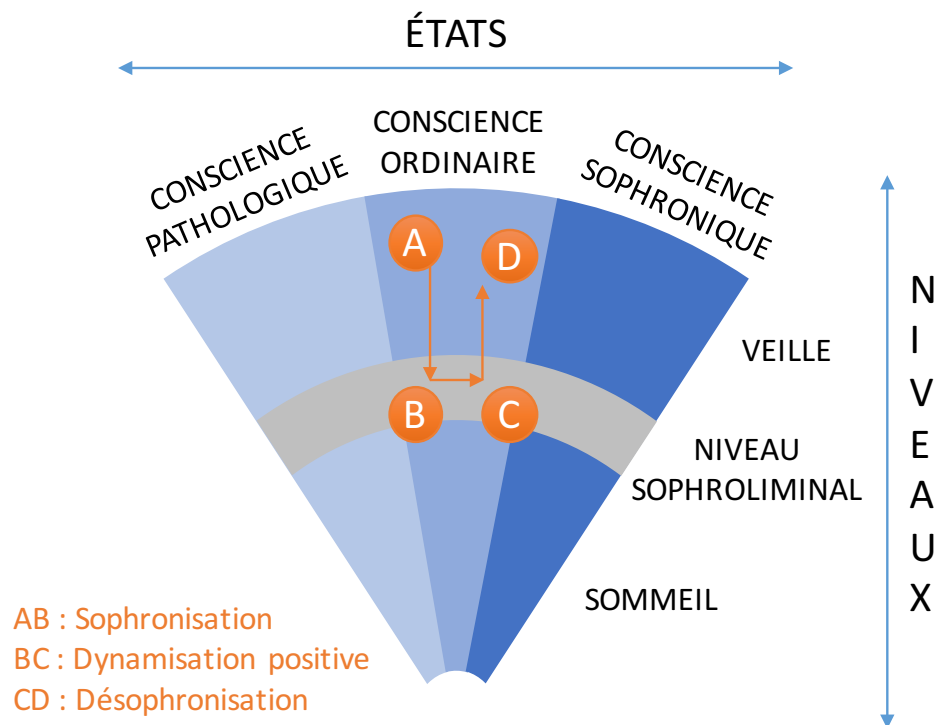


Figure 5. Alfonso Caycedo a différencié la conscience par trois états (la conscience pathologique, la conscience ordinaire et la conscience sophronique) et trois niveaux (le niveau de veille, le niveau sophroliminal et le niveau de sommeil).

- Les trois états sont :
 - La conscience pathologique : soit détériorée par la psychose ou physique
 - La conscience ordinaire

- La conscience sophronique : nous donne un état de bien-être et d'harmonie biologique, psychologique et sociologique, étant une intégration existentielle positive
- Les trois niveaux sont :
 - Le niveau de veille
 - Le niveau sophroliminal : où les sentiments du corps sont mieux perçus et intégrés, permet la dynamisation des structures de conscience d'être plus facile et plus efficace. La formation de la sophrologie vise à découvrir et conquérir la conscience sophronique utilisant cette dynamisation positive.
 - Le niveau de sommeil

La formation de la sophrologie peut être complétée debout ou en position assise, avec les yeux ouverts ou fermés. Elle consiste à contempler nos corps, la perception de la gravitation et le déplacement du schéma du corps dans le but de renforcer la présence du corps dans la conscience et le schéma du corps.

De nos jours, la sophrologie a été largement utilisée dans les affaires, le sport, les écoles, les universités, les relations, les hôpitaux et même l'accouchement. Par exemple, en réduisant le stress périnatal, la sophrologie fonctionne mieux que l'anesthésie péridurale (Suzuki et al. 2012). En répétant les instructions de sophrologie, les gens éprouvent généralement un sommeil plus réparateur, une meilleure concentration, moins de soucis, une confiance en soi accrue (Dyé 2014) et un sentiment de bonheur intérieur, comme le dit Caycedo : "La sophrologie est une étude de vivre" (Sophrology).

2.2 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle (RV) est une technologie qui vise à immerger un utilisateur dans un environnement complètement virtuel en simulant sa présence à travers un casque de réalité virtuelle. Il faut la différencier de la réalité augmentée et la réalité mixte.

La réalité augmentée (RA) désigne la superposition d'objets virtuels sur le monde réel en temps réel. Elle fonctionne souvent sur des smartphones ou des tablettes. Le jeu populaire Pokémon Go est un exemple connu de la réalité augmentée.

La réalité mixte (RM) est une évolution de la réalité augmentée, permettant au monde virtuel de comprendre le monde réel dans le but d'offrir une expérience complète, à l'aide du casque avec des lentilles transparentes, comme l'Hololens de Microsoft. La Figure 6 nous donne une illustration intuitive des différences entre les trois concepts.

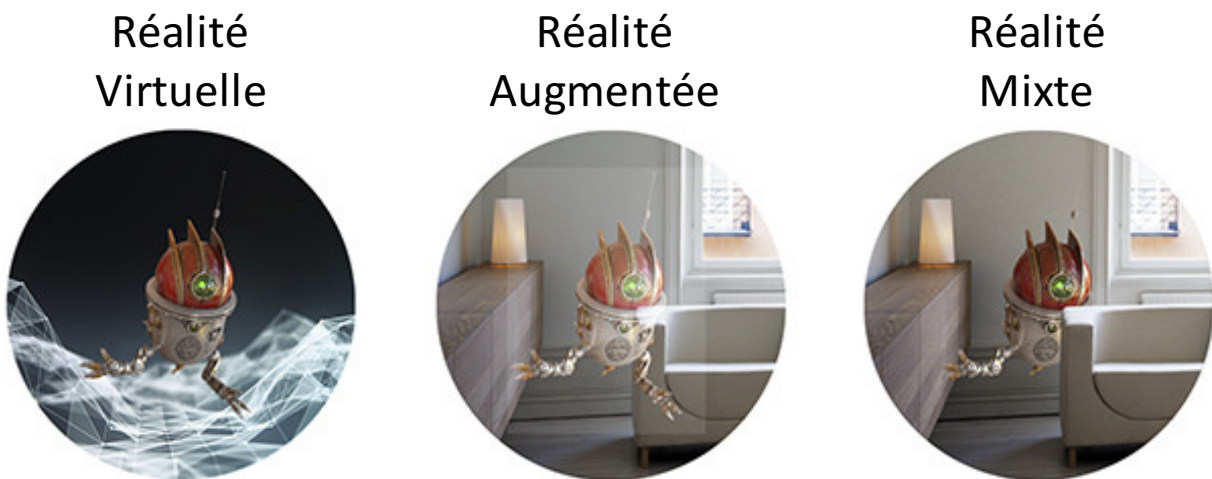


Figure 6. Les différences entre RV (un environnement complètement virtuel), RA (une superposition d'objets virtuels sur le monde réel) et RM (pas une superposition simple, l'objet virtuel prend en compte les objets du monde réel). Figure tirée de (Magic Leap).

2.2.1 Du visiocasque à la réalité virtuelle

Depuis la proposition de la réalité virtuelle dans les années 60 (Sutherland 1965), le rêve du cyberspace est de donner aux gens les expériences sensorielles d'un espace ou d'un environnement virtuel. Ce rêve a été vigoureusement poursuivi par les pionniers dans le domaine et il se réalise lentement mais régulièrement (Oh,Bailenson 2017). Bien qu'Ivan Sunderland (Sutherland 1968) ait construit le premier système visiocasque en 1968, la réalité virtuelle est devenue populaire à partir de 1989, l'année où le terme « réalité virtuelle » a été inventé par Jaron Lanier (Conn et al. 1989). Ensuite, il a fallu environ trois décennies pour rendre les casques de réalité virtuelle portables et abordables et les amener du laboratoire à la maison, tels que Samsung Gear, HTC Vive et Oculus Rift.

2.2.2 Immersion et présence

L' « immersion » et la « présence » sont deux concepts clés en réalité virtuelle. Le niveau d'immersion peut influencer le sentiment de présence (Slater, Wilbur 1997).

L'immersion désigne la capacité technologique du système de réalité virtuelle à offrir une expérience convaincante qui éloigne l'utilisateur de la réalité physique. Elle consiste en l'illusion inclusive, étendue, environnante, vivante de la réalité, l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel, l'intrigue convaincante (Slater, Wilbur 1997). Plus précisément :

1. L'inclusion consiste à exclure la réalité physique. Les signaux qui rappellent à l'utilisateur la présence d'un dispositif technologique, tel que la faible fréquence d'affichage, réduisent l'inclusion d'un système.
2. L'étendue d'un système est la gamme de modalités sensorielles (c.-à-d., la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût, le toucher) qu'il peut accommoder.
3. L'espace virtuel environnant dépend du champ de vision. Plus le champ de vision est grand, plus l'environnement virtuel est panoramique.
4. La vivacité s'appuie sur la résolution et la fidélité d'une modalité spécifique et elle est liée à la richesse de l'environnement.
5. L'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel dépend du niveau de suivi du système, du taux de mise à jour, etc. Les mouvements physiques de l'utilisateur et les informations affichées dans la réalité virtuelle doivent correspondre.
6. L'intrigue désigne la capacité du système à présenter un scénario qui attire l'utilisateur dans un monde virtuel autonome dans lequel cet utilisateur peut participer activement.

La présence est une expérience psychologique subjective. Elle comprend trois dimensions importantes :

1. La téléprésence : le sentiment d'être physiquement transporté dans l'espace virtuel. C.-à-d., les utilisateurs devraient être présents dans le monde virtuel, mais absents du monde physique.
2. La présence sociale : le sentiment d'être avec une autre personne pendant l'interaction.
3. La présence à soi : l'étendue avec laquelle les utilisateurs perçoivent leur soi virtuel comme leur soi réel à partir de trois niveaux (de corps, d'émotion et d'identité) (Ratan,Hasler 2010).

Grâce à l'avancement de la technologie, l'amélioration de l'immersion donne un meilleur sentiment de présence pour les utilisateurs (Oh,Bailenson 2017).

2.2.3 Casques

En 2016, beaucoup de casques de réalité virtuelle en version commerciale sont apparus sur le marché. Il existe deux types de casques :



- Des casques réalisés pour les smartphones :
 - Des casques en carton, par exemple le Cardboard de Google
 - Des casques à support rigide, par exemple le Gear VR de Samsung
- Des casques conçus intrinsèquement pour la réalité virtuelle, par exemple l'Oculus Rift, l'HTC Vive, le PlayStation VR de Sony, etc.

Selon la description de l'immersion qui a un effet sur la présence dans la section 2.2.2, nous listons les casques et leurs spécifications importantes dans le Tableau I.

Tableau I. Liste des casques de réalité virtuelle disponibles en version commerciale et leurs spécifications

Casques	Photo	Écran	Fréquence d'affichage	Champ de vision

<p>le Cardboard de Google</p>	 <p>Figure tirée de (Google 2016).</p>	<p>En fonction du smartphone</p>	<p>En fonction du smartphone</p>	<p>90°</p>
<p>le Gear VR de Samsung (2015, blanc)</p>	 <p>Figure tirée de (Samsung Gear VR4 vs Gear VR3 2016).</p>	<p>2560 × 1440 px (1080 × 1200 px par œil)</p>	<p>60Hz</p>	<p>96°</p>
<p>l'Oculus Rift</p>	 <p>Figure tirée de (Oculus 2016).</p>	<p>2160 × 1200 px (1080 × 1200 px par écran)</p>	<p>90Hz</p>	<p>110°</p>

l'HTC Vive	 <p>Figure tirée de (HTC 2017).</p>	2160 × 1200 px (1080 × 1200 px par écran)	90Hz	110°
le PlayStation VR de Sony	 <p>Figure tirée de (Sony 2016).</p>	1920 × 1080 px (960 × 1080 px par œil)	90Hz ou 120Hz	100°

2.2.4 Les moteurs de jeu

De nos jours, l'usage le plus populaire de la réalité virtuelle est dans l'industrie du jeu vidéo. Donc, nous appelons souvent la plateforme de développement d'applications de réalité virtuelle par le moteur de jeu (en anglais : game engine). Il existe environ 11 moteurs de jeu, incluant *Unity*⁴, *Unreal Engine 4*⁵, *AppGameKit VR*, *libGDX*, *CryEngine*, *Urho 3D*, *Autofesk Maya*, *CopperCube*, *ApertusVR*, *Torque3D* et *Skyline*.

⁴ <https://unity3d.com/>

⁵ <https://www.unrealengine.com/>

Unity

Unity est le plus populaire et le plus puissant, car il est un moteur multi-plateforme (le Tableau II énumère les plateformes supportées) et il offre un large choix de ressources. Son langage de programmation est C# (ne supporte plus JavaScript) et la Figure 7 montre son interface.

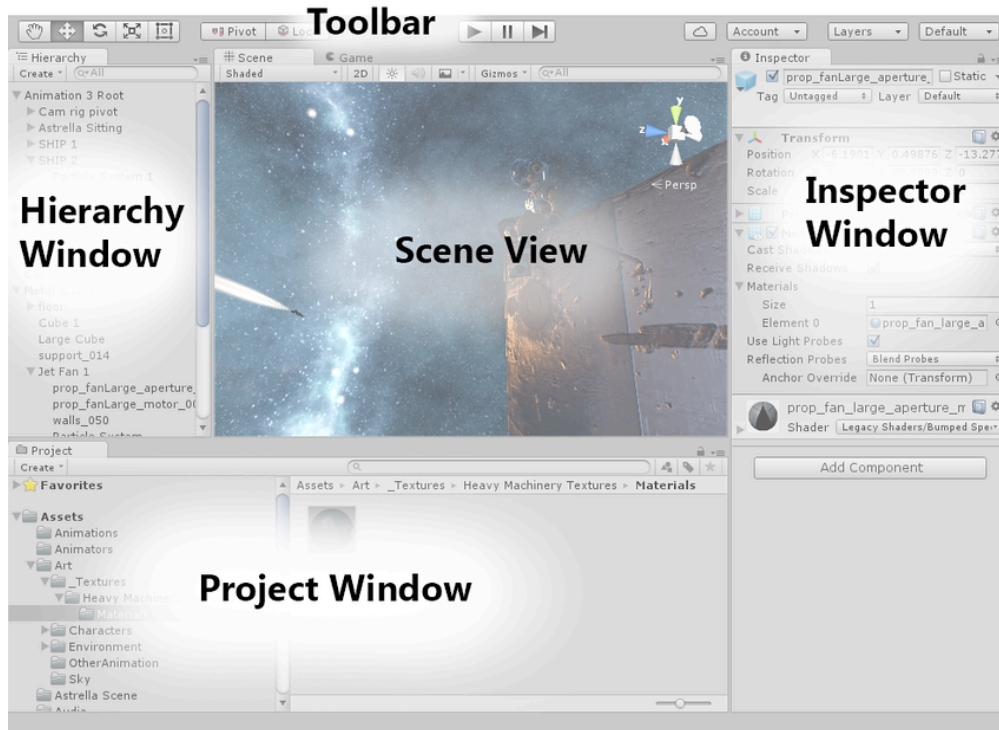


Figure 7. L'interface de Unity par défaut comprend cinq fenêtres : la fenêtre du projet (The Project Window) contenant les dossiers et les fichiers du projet, la fenêtre de la scène (The Scene Window), la fenêtre de l'hierarchie (The Hierarchy Window) contenant tous les objets de la scène, la fenêtre de l'inspecteur (The Inspector Window) contenant les paramètres d'un objet et la barre d'outils (The Toolbar). Figure tirée de (Unity 2017).

Tableau II. Les plateformes supportées par Unity

Bureau	Windows, OSX, Linux
Réalité virtuelle	Gear VR, Oculus Rift, Google Cardboard, Google Daydream, Steam VR, HTC Vive

Smartphone	Windows Phone, iOS, Android, BlackBerry 10, Tizen
Console	Xbox 360, Xbox One, Wii U, PlayStation 3, PlayStation 4, PlayStation Vita, Nintendo Switch, Nintendo 3DS
TV	Android TV, Apple TV, Samsung Smart TV
Autre	WebGL

Unreal Engine 4

Unreal Engine 4 est aussi excellent grâce à une compilation rapide pour une itération rapide, un accès complet au code source et un mode de script visuel très pratique (de plus, il permet la programmation en C++). La Figure 8 expose son interface.



Figure 8. L'interface de l'Unreal Engine 4 par défaut comprend : des éditeurs d'objets, des navigateurs (le navigateur de projet et le navigateur de contenu) et des outils. Figure tirée de (Engine 2017).

2.2.5 Applications

Sauf le domaine du jeu vidéo, l'industrie des soins de santé est une autre application importante de la réalité virtuelle. La réalité virtuelle a d'abord été utilisée en médecine en 1993 pour traiter les troubles de santé mentale (Wiederhold 2006). Elle a ensuite été largement acceptée par la communauté médicale, car elle permet (Wiederhold 2006):

- d'améliorer la thérapie d'exposition pour traiter les troubles anxieux, les phobies, le trouble de stress post-traumatique, les troubles des conduites alimentaires et l'obésité, le tabagisme, etc.
- d'améliorer la thérapie de distraction pour réduire la douleur des procédures dentaires, des effets secondaires liés à la chimiothérapie, des brûlures graves, de l'accouchement, etc.
- de devenir un outil de diagnostic, de médecine, de réadaptation physique et cognitive, de planification chirurgicale et de performance, de prévention des maladies physiques et émotionnelles.

En particulier, en réalité virtuelle, nous pouvons simuler de nombreuses situations qu'il est difficile de contrôler dans la vie réelle, sans coût excessif, et traiter les patients de manière manipulable dans un environnement sûr.

De ce fait, la réalité virtuelle est considérée comme un outil prometteur avec lequel il vaut la peine d'explorer de nombreuses applications thérapeutiques précieuses pour le traitement médical, la médecine préventive, les interventions chirurgicales, la réadaptation, l'éducation et la formation médicales (Wiederhold 2006).

2.3 Mesure cérébrale

Il existe de 86 à 100 milliards de cellules, nommées neurones, dans le cerveau, interconnectées étroitement via des synapses, qui propagent des informations à travers les neurones ou empêchent le passage de l'information d'un neurone à l'autre. Toute activité synaptique génère une impulsion électrique subtile. L'explosion d'un seul neurone est trop petite pour être remarquée, mais celle d'un petit groupe de neurones (environ 1 000 ou plus)


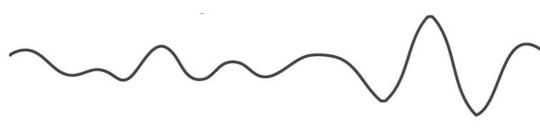
en même temps peut générer un champ électrique assez fort pour se propager à travers les tissus, les os et le crâne et être mesuré sur la surface de la tête. En 1924, Hans Berger a enregistré le champ électrique du cerveau humain et l'a appelé Électroencéphalographie (EEG) (Berger 1924).




2.3.1 EEG (Électroencéphalographie)

L'EEG mesure les activités spontanées sur le cuir chevelu ou sur la surface du cerveau. Précisément, les signaux électriques sont captés et amplifiés à partir de régions de matière grise. L'EEG ne représente pas une tension absolue, mais toujours une augmentation ou une diminution relative de l'électricité à l'emplacement spécifique. Bien que les changements se produisent très rapidement, l'EEG nous permet d'obtenir un aperçu du moment précis du traitement du cerveau avec une très haute résolution (jusqu'à 1 milliseconde).

L'amplitude de l'EEG est d'environ 100 μV (microvolt) sur le cuir chevelu, tandis qu'elle est de 1 à 2 mV (millivolt) sur la surface du cerveau (Malmivuo, Plonsey 1996). La bande passante de l'EEG est très large et s'étend des fréquences infra-basse d'une fraction de mHz à plusieurs centaines de Hz. Les mesures pour les fréquences très basses et très hautes sont difficiles, souvent contaminées par le bruit, donc la plupart des applications d'EEG mettent l'accent sur la gamme la plus facilement accessible de 1 à 48 Hz. Dans cette gamme, les chercheurs distinguent cinq bandes différentes comme présentées dans le Tableau III.

Tableau III. Les cinq bandes de fréquence d'EEG et ses états mentaux et émotionnels correspondants

Nom d'onde	Fréquence	Onde (dans une seconde)	État mental et émotionnel
Delta	0.5-4 Hz		en sommeil et en pathologie
Thêta	4-8 Hz		la méditation et l'excitation

Alpha	8-13 Hz		éveillé avec les yeux fermés
Bêta	13-30 Hz		la concentration, l'alerte élevée et l'anxiété
Gamma	> 30 Hz		lié à la cognition

Au cours des neuf dernières décennies, l'EEG a été largement utilisée dans les domaines médicaux et de la recherche⁶. Bien qu'il existe d'autres méthodes différentes pour mesurer les activités du cerveau, telles que la magnétoencéphalographie (MEG) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), l'EEG est la solution la plus polyvalente et la plus rentable, comme présenté sur la Figure 9.

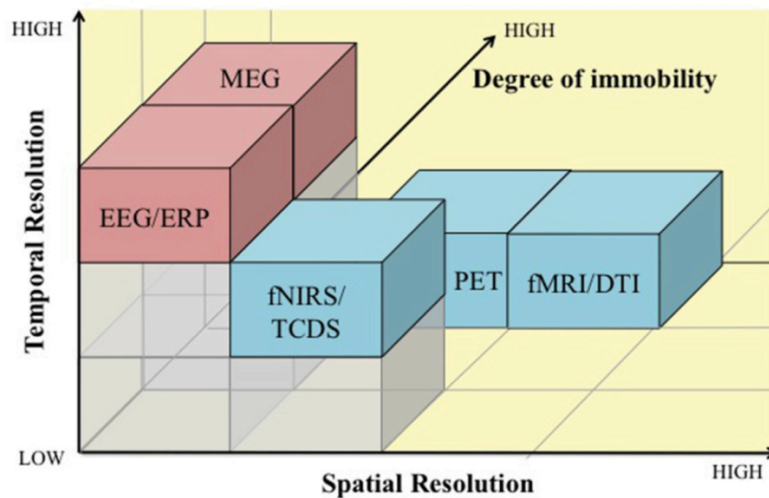


Figure 9. Comparaison entre les méthodes de mesure cérébrale (EEG/ERP, MEG, fNIRS/TCDS, PET et fMRI/DTI) sur la résolution spatiale (Spatial Resolution, la précision d'une mesure par rapport à l'espace), la résolution temporelle (Temporal Resolution, la précision d'une mesure par rapport au temps) et le degré d'immobilité (Degree of immobility). Figure tirée de (iMotions 2015).

⁶ <https://en.wikipedia.org/wiki/Electroencephalography>

2.3.2 Du point de vue de l'émotion

Le terme « émotion » a été défini comme l'expérience d'un ensemble de changements corporels qui se produisent en réponse à des stimulus émotifs par James en 1884 (James 1884). Cela a été contesté par Cannon et Bard qui ont argumenté que l'hypothalamus est la région du cerveau qui est impliquée dans la réponse émotionnelle aux stimulus (Cannon 1927). Basé sur ces théories, le circuit de Papez a été proposé en 1937, incluant une série de connexions de l'hypothalamus au thalamus antérieur et cortex cingulaire et la sortie du cortex cingulaire vers l'hippocampe puis vers l'hypothalamus après une intégration des signaux au cortex cingulaire (Papez 1937). (MacLean 1949) a souligné l'importance du lobe temporal dans l'émotion dans son système limbique qui jouait un rôle crucial à interpréter des mécanismes cérébraux émotionnels jusqu'aux années 1980. Puis le lieu du mécanisme émotionnel s'est étendu de l'hypothalamus au système limbique et à l'ensemble du système nerveux central à tous les niveaux, du cortex préfrontal à la moelle épinière (voir la Figure 10). Les systèmes limbiques originaux, tels que l'hippocampe et le corps papillaire, se sont révélés plus importants pour les processus cognitifs que les processus émotionnels, dont l'amygdale est le cœur du mécanisme émotionnel (LeDoux 1992). (Kolb,Whishaw 2003) ont souligné que l'amygdale et le cortex préfrontal sont importants pour comprendre la nature d'une expérience émotionnelle.

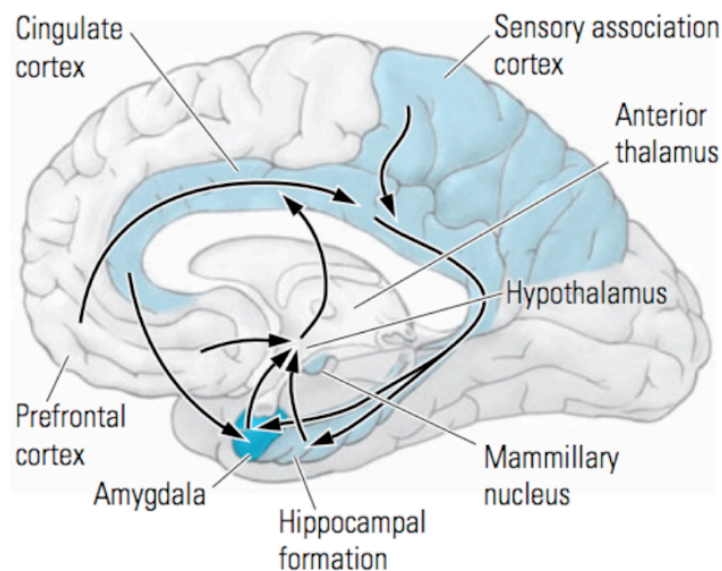


Figure 10. Circuits cérébraux pour l'émotion comprend une série de connexions de l'hypothalamus (Hypothalamus) au thalamus antérieur (Anterior thalamus) et cortex

cingulaire (Cingulate cortex) et la sortie du cortex cingulaire (Cingulate cortex, intégration des signaux) vers l'hippocampe (Hippocampal formation) puis vers l'hypothalamus (Hypothalamus), figure tirée de (Kolb,Whishaw 2003)

2.3.3 Le système international 10/20

La plupart des EEG sont non invasifs, plaçant les électrodes sur le cuir chevelu par le système international 10/20, qui standardise l'emplacement des électrodes dans le but de comparer les participants au fil du temps ou avec les autres. Le système international 10/20 est basé sur la relation entre l'emplacement d'une électrode et la zone sous-jacente du cortex cérébral. Le « 10 » et le « 20 » représentent les distances entre les électrodes adjacentes, soient 10% ou 20% de la distance totale avant-arrière ou droite-gauche du crâne, comme montré sur la Figure 11.

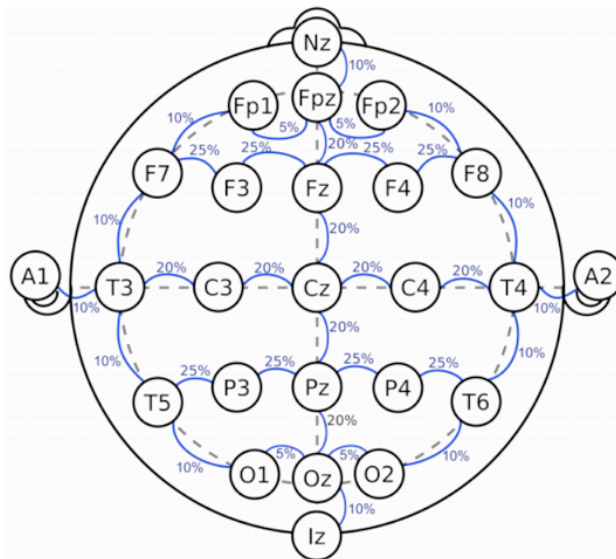


Figure 11. Le système international 10/20 pour l'emplacement des électrodes lors d'un EEG. Les lettres F, T, P, O, A et Fp désignent respectivement les lobes frontal, temporal, pariétal, occipital, de l'oreille et des sites polaires frontaux. La lettre C consiste à identifier le centre du crâne. Les nombres pairs (2, 4, 6, 8) se réfèrent aux positions des électrodes sur l'hémisphère droit, tandis que les nombres impairs (1, 3, 5, 7) se rapportent à ceux de l'hémisphère gauche. La lettre z (zéro) représente une électrode placée sur la ligne médiane. Figure tirée de (Alarcao,Fonseca 2017)

2.3.4 Casques d'EEG

Il existe beaucoup de casques d'EEG de prix très bas (1 000\$ ou moins) à prix très élevés (25 000\$ ou plus). Le prix dépend souvent du nombre de canaux sur le casque. Nous présentons quatre de ces casques dans le Tableau IV.

Tableau IV. Comparaison de casques d'EEG

	NeuroSky MindWave Mobile	Muse	Emotiv EPOC	OpenBCI Cyton Board
Nombre de canaux	1	4	14	8
Taux d'échantillonnage	512Hz	220Hz	128Hz	250Hz
Communication	Bluetooth	Bluetooth	Sans fil propriétaire	Radio Bluetooth / RFDuino radio
Temps de fonctionnement	8 heures	5 heures	12 heures	24 heures
Poids	90g	61g	125g	260g
Stockage à bord			Non	Oui
Accéléromètre			Oui	Oui

Chapitre 3 : Relaxation par neurofeedback en réalité virtuelle

Ce chapitre débute par le neurofeedback, présente des approches courantes de relaxation, ainsi que leurs effets, leurs contributions et leurs limites. Ce chapitre présente aussi en détail notre système de formation de relaxation par le neurofeedback en réalité virtuelle, *Virtual Sophrologist*, qui vise à former les usagers à se détendre plus rapidement, incluant ses composants, son principe et ses dispositifs.

3.1 Neurofeedback

J'ai mentionné trois composants cruciaux d'une boucle de biofeedback dans la section 2.1.1 : l'instrument, le processeur et l'utilisateur. Quand l'instrument est remplacé par les équipements de mesure de l'activité cérébrale, comme l'EEG, la MEG, l'IRMf, cela devient le neurofeedback. Simplement, le neurofeedback est un moyen d'entraîner l'activité cérébrale en utilisant principalement l'EEG comme instrument et en montrant la rétroaction à travers de la vidéo ou du son.

3.1.1 Du biofeedback au neurofeedback

L'EEG a été utilisé dans un système de biofeedback à partir des années 1960 (Voronin,Sokolov 1960). Joe Kamiya découvrit que les gens pouvaient apprendre à modifier leur activité cérébrale en utilisant un simple système de récompense (Kamiya 1969). Dans la même période, Barry Sterman a réussi une expérience du rythme cérébral (sensorimotor rhythm en anglais) chez les chats (Sterman et al. 1969). Ceux-ci ont appris à contrôler leurs ondes cérébrales en obtenant une boulette de nourriture chaque fois qu'ils ont obéi. Cette formation leur a donné des cerveaux ultra-stables, qui peuvent éviter la crise d'épilepsie. De ce fait, Sterman a examiné la formation avec les humains et a eu des résultats durables : 60% de ses participants ont réduit leur niveau d'épilepsie, la réduction a varié de 20% à 100%. Cinquante ans plus tard, le neurofeedback faisait toujours partie du programme d'entraînement des astronautes pour contrôler leurs rythmes cérébraux (Technology 2013).

Le neurofeedback était en marge de la science jusqu'à la fin des années 1980, puis il a été utilisé pour diminuer les troubles du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH, en anglais : attention deficit hyperactivity disorder ADHD) (Lubar et al. 1995). Puis, l'efficacité du neurofeedback a été prouvée dans divers cas, comme la réduction de la douleur (Christopher deCharms et al. 2005), l'amélioration de la performance des athlètes professionnels (Dupee, Werthner 2011), l'amélioration des résultats des apprenants dans les systèmes tutoriels intelligents (en anglais : intelligent tutoring system) (Chaouachi et al. 2015), etc.

3.1.2 Trois types du neurofeedback

Les systèmes de neurofeedback se composent de simples machines de concentration jusqu'à des réseaux de capteurs complets avec une capacité d'imagerie cérébrale profonde. Ils se répartissent en trois grandes catégories :

- Systèmes de neurofeedback de marque : Neuroptimal, Brain State et EEGinfo
- Neurofeedback traditionnel (Neurofeedback d'EEG)
- Neurofeedback de 3D (Neurofeedback de QEEG LoRETA)

Systèmes de neurofeedback de marque

Les systèmes de neurofeedback de marque désignent des systèmes emballés de formation cérébrale, tels que Neuroptimal⁷ (voir la Figure 12), Brain State⁸ et EEGinfo⁹, etc.

Ils utilisent des protocoles pré-construits de formation et des fonctions intégrées. Il est donc difficile de cibler des objectifs ou des problèmes particuliers avec ces systèmes. D'un autre côté, la formation requise du nouveau personnel est limitée, l'équipement (l'EEG à double capteur) est peu coûteux, et ils sont généralement efficaces.

⁷ <https://neuroptimal.com/>

⁸ <https://brainstatetech.com/>

⁹ <http://www.eeginfo.com/>



Figure 12. Neuroptimal, exemple d'un système emballé de formation cérébrale, figure tirée de (Co. 2017).

Neurofeedback traditionnel

Le neurofeedback traditionnel, soit le neurofeedback d'EEG, comme présenté au début de la section 3.1, est utilisé depuis des décennies avec beaucoup de succès.

Grâce à sa flexibilité et son efficacité, un thérapeute qualifié peut faire tout ce qu'un système de marque peut faire. De plus, avec une gamme complète d'équipements et d'approches de la formation cérébrale, le clinicien peut entraîner l'activité cérébrale et adapter correctement cette formation à l'individu. Néanmoins, il est vraiment difficile de trouver un bon clinicien avec la plus grande spécialité dans le but de maximiser l'efficacité du système.

Neurofeedback de 3D

Le neurofeedback de 3D étend les capacités du neurofeedback en utilisant un capuchon à 19 capteurs, la prochaine génération d'outils d'imagerie cérébrale de 3D, une base de données de recherche médicale (Z-score) et une imagerie de source cérébrale profonde (LoRETA, Low Resolution Electromagnetic Tomography en anglais).



Figure 13. LoRETA neurofeedback à la maison avec l'assistance d'un clinicien. Une séance coûte au moins £135. Figure tirée de (Brainworks 2017).

Alors le clinicien peut voir exactement ce qui se passe dans tout le cerveau en tout temps, et entraîner ensemble n'importe quel nombre de zones, entraîner directement des réseaux cérébraux entiers, cibler l'activité électrique globale, etc. Toutefois, il faut plus de compétences et d'expérience pour faire fonctionner le neurofeedback de 3D. De plus, l'équipement du neurofeedback de 3D coûte **20 fois plus cher** que l'équipement de base.

3.2 Approches courantes

Nous avons mentionné le développement des approches de relaxation dans la section 1.2. Dans cette section, nous présentons des recherches récentes sur ce sujet selon quatre catégories.

3.2.1 Relaxation à l'aide de la réalité virtuelle

Dès l'année 2008, (Gorini,Riva 2008) ont proposé une approche utilisant la réalité virtuelle afin de rendre les patients avec anxiété généralisée (en anglais : generalized anxiety disorder) détendus. L'expérience comprend 14 séances de formation, dure 7 semaines et implique 75 patients divisés en trois groupes : avec la réalité virtuelle, sans réalité virtuelle et avec aucune formation. L'évaluation de l'approche est basée sur des questionnaires, la

fréquence de respiration, la fréquence cardiaque, l'EMG faciale et la réponse de la conductance cutanée. Ils ont amélioré et réalisé ses expériences en 2010 (voir la section 3.2.2).

(Crescentini et al. 2016) ont mené des expériences de relaxation avec 41 participants pendant 8 semaines (2 heures chaque semaine) pour démontrer que le groupe avec réalité virtuelle a eu de meilleurs résultats que le groupe sans réalité virtuelle. Mais ils se sont encore concentrés sur l'évaluation à travers la fréquence de respiration, la fréquence cardiaque, l'EMG faciale et la réponse de la conductance cutanée.

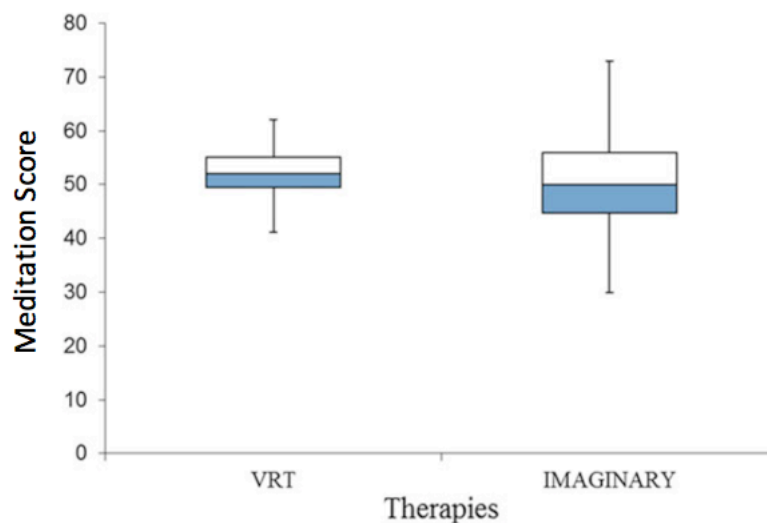


Figure 14. Moyenne et variance des scores de méditation de l'expérience de Perhakaran et al. pour 15 participants utilisant un visiocasque (VRT) et les 15 autres utilisant l'imagerie guidée (IMAGINARY). Figure tirée de (Perhakaran et al. 2016).

(Perhakaran et al. 2016) ont comparé l'efficacité de la méditation utilisant la réalité virtuelle à celle appliquant l'imagerie guidée. Ils ont fait une expérience avec 30 participants, dont 15 participants ont porté un visiocasque tandis que les autres 15 participants ont utilisé la technique d'imagerie guidée. Le visiocasque était connecté à un ordinateur exécutant une application de réalité virtuelle. Afin d'évaluer l'efficacité de la méditation, ils ont recueilli des données à travers l'EEG. Précisément, ils ont utilisé le casque d'EEG *Mindwave Mobile* de NeuroSky et son score de méditation. Finalement, la moyenne du score de méditation et la variance du score de méditation montrent que l'efficacité de la méditation utilisant la réalité virtuelle est meilleure que celle appliquant l'imagerie guidée, comme présentées sur la Figure

14. Malheureusement, chaque séance de formation durait 5 minutes (trop courte) et seulement l'EEG a contribué à la mesure.

Ainsi, l'importance de la réalité virtuelle dans un système de relaxation est évidente. Comme les expériences ci-dessus sont limitées, il faut les améliorer.

3.2.2 Relaxation par le biofeedback en réalité virtuelle

(Gorini et al. 2010) ont mené une nouvelle expérience en 2010, cette fois-ci en utilisant le biofeedback, dans le but de rendre les patients d'anxiété généralisée détendus. Ils ont réalisé l'expérience avec 20 patients au total divisés en trois groupes : le groupe de la combinaison du biofeedback avec la réalité virtuelle (4 patients), le groupe sans biofeedback (8 patients) et le groupe avec aucune formation (8 patients). Ils ont mesuré la fréquence cardiaque afin de contrôler l'intensité du feu, le mouvement des vagues et le mouvement de l'eau dans des environnements virtuels. Les résultats des questionnaires du groupe de la combinaison biofeedback-réalité virtuelle ont montré une réduction significative de l'anxiété après les 8 séances de formation.



Figure 15. Dispositif de l'expérience de Gromala et al, incluant une visionneuse de réalité virtuelle et deux petits capteurs de la réponse galvanique de la peau dans le but de réduire la douleur. Figure tirée de (Gromala et al. 2015).

(Gromala et al. 2015) ont développé un système de méditation pour aider à réduire la douleur. Ils ont employé le niveau de la réponse galvanique de la peau (en anglais : galvanic skin response) pour contrôler le brouillard dans l'environnement virtuel. L'expérience a été réalisée avec 13 participants, durant 12 minutes. Même avant 2016, où peu de casques de réalité virtuelle portables sont sortis, le groupe avec réalité virtuelle (comme montré à la Figure 15, 7 personnes) a eu un résultat considérable en réduction de la douleur par rapport au groupe sans réalité virtuelle (6 personnes), comme illustré à la Figure 16.

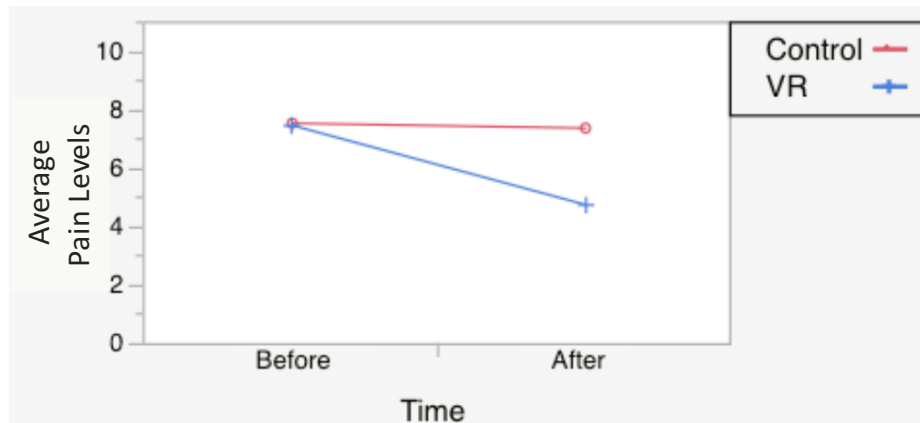


Figure 16. Moyenne des niveaux de la douleur (Average Pain Levels) pour 7 participants utilisant une visionneuse de réalité virtuelle (VR) et 6 autres utilisant la piste audio (Control) avant l'expérience (Before) et après l'expérience (After). Figure de (Gromala et al. 2015).

La combinaison du biofeedback avec la réalité virtuelle a montré un meilleur résultat, mais le biofeedback était basé sur une mesure simple, comme la fréquence cardiaque.

3.2.3 Relaxation par le neurofeedback

(Prpa et al. 2015) ont développé le système SOLAR dans le but d'apprendre la méditation. Le SOLAR comprend un écran pour plonger l'utilisateur dans un environnement confortable et virtuel, des capteurs de respiration pour mesurer la fréquence respiratoire en temps réel, ainsi que l'EEG pour retourner visuellement le score de méditation de Emotiv EPOC par l'opacité de la silhouette (voir la Figure 17). Les chercheurs ont mené l'expérience avec 13 participants. Ils ont trouvé que le neurofeedback aidait à la relaxation. Cependant, ils n'étaient pas contents des résultats d'une partie des participants à cause de la demande de garder les yeux ouverts pendant une séance de formation (voir le participant à la Figure 17).

Cette approche a souligné l'efficacité du neurofeedback et le fait qu'il serait plus intéressant de l'employer en réalité virtuelle.



Figure 17. Dispositif du système SOLAR développé dans le but d'apprendre la méditation. SOLAR retourne visuellement le score de méditation du casque d'EEG Emotiv EPOC par l'opacité de la silhouette sur l'écran. Figure tirée de (Prpa et al. 2015).

3.2.4 Relaxation par le neurofeedback dans la réalité virtuelle

En 2000, (Othmer,Kaiser 2000) ont examiné l'efficacité de la combinaison du neurofeedback avec la réalité virtuelle pour traiter le TDAH. Bien qu'ils aient utilisé l'EEG à deux canaux et l'affichage 3D plutôt que la réalité virtuelle pendant 20 séances de formation (20 minutes pour chaque séance de formation), ils ont eu encore un meilleur résultat par rapport à l'affichage 2D. Cependant, les chercheurs n'ont pas divisé les participants en groupes. Les participants ont choisi volontairement et librement l'affichage 2D ou l'affichage 3D à chaque séance. Les résultats sont comparés entre le groupe avec la plupart des choix de l'affichage 3D et le groupe avec la plupart des choix de l'affichage 2D. Même si cela n'a pas l'air très rigoureux, le potentiel de cette approche a été démontré.

RelaWorld est un système de méditation combinant le neurofeedback avec la réalité virtuelle (Kosunen et al. 2016). Il mesure les activités cérébrales par l'EEG (six électrodes : F3, F4, C3, C4, P3, P4, voir Figure 11) et montre les niveaux de relaxation et de concentration en temps réel dans la réalité virtuelle (Oculus Rift DK2). Les chercheurs ont divisé 43 participants en trois groupes : le groupe de *RelaWorld* (avec neurofeedback et réalité

virtuelle) « Neurofeedback », le groupe sans neurofeedback mais avec réalité virtuelle « Head Mounted Display » et le groupe sans réalité virtuelle et sans neurofeedback « Screen ». Les résultats à partir du questionnaire de profondeur de méditation ont montré que :

1. Les sentiments négatifs, par exemple la difficulté à se détendre, sont les moins marqués utilisant RelaWorld par contre, ces sentiments sont plus marqués sans la réalité virtuelle.
2. Les sentiments de relaxation sont proches entre le groupe de RelaWorld et le groupe sans neurofeedback, cependant, la variance du groupe de RelaWorld est moins importante par rapport à celle du groupe sans neurofeedback, comme montrée sur la Figure 18. Évidemment, l'effet du groupe sans réalité virtuelle est encore plus bas.

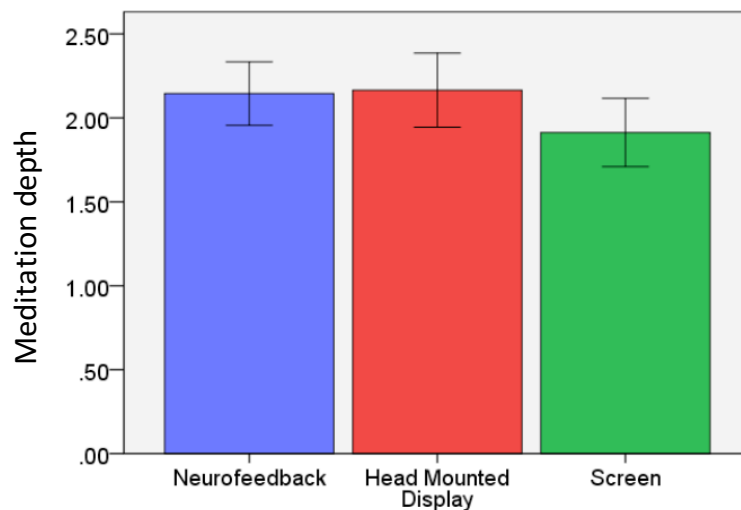


Figure 18. Moyenne et variance des profondeurs de méditation de l'expérience de Kosunen et al. pour un groupe utilisant le neurofeedback et un casque de réalité virtuelle (Neurofeedback), un groupe utilisant un casque de réalité virtuelle (Head Mounted Display) et un groupe utilisant un écran (Screen). Figure tirée de (Kosunen et al. 2016).

3. Le niveau de la relaxation du groupe RelaWorld atteint le niveau le plus profond. Le niveau de relaxation du groupe sans neurofeedback est le deuxième.

4. Le niveau du sentiment de présence du groupe RelaWorld est le meilleur (voir la Figure 2 dans la section 1.2). La combinaison du neurofeedback avec la réalité virtuelle peut améliorer le sentiment de présence.
5. La combinaison du neurofeedback avec la réalité virtuelle peut aider à la concentration. Le résultat du groupe RelaWorld est le meilleur.

Malheureusement, cette expérience comprenait seulement une séance de formation, qui durait 2 heures et demi. Comme nous le savons, Paris ne s'est pas fait en un jour, la relaxation aussi.

Nous avons vu que l'approche de relaxation par le neurofeedback dans la réalité virtuelle est plus efficace. Néanmoins, peu de chercheurs ont fait une expérience de plus de séances de formation pour examiner plus profondément la capacité de la relaxation, incluant la vitesse de progression pour se détendre. Donc, nous allons examiner plus profondément l'approche de relaxation par le neurofeedback dans la réalité virtuelle en menant 8 séances de formation durant un mois.

3.3 Le système *Virtual Sophrologist 1.0*

La raison de nommer notre système *Virtual Sophrologist* est qu'il vise à être le sophrologue virtuel des utilisateurs. Il consiste en trois éléments cruciaux :



Figure 19. L'interface utilisateur de notre système *Virtual Sophrologist*, incluant trois éléments : (1) une instruction de sophrologie (Instruction), (2) une rétroaction d'EEG (Rétroaction) et (3) un environnement virtuel.

1. **les environnements dans la réalité virtuelle** : fournissent une de nos trois scènes virtuelles dans le but de plonger l'utilisateur dans un environnement relaxant et confortable.
2. **les instructions de sophrologie** : aident l'utilisateur à se détendre selon la sophrologie, les instructions sont affichées et dites phrase par phrase dans la scène.
3. **les rétroactions d'EEG** : donnent la suggestion en temps réel selon le niveau de la méditation de l'usager (le score de méditation), affichée sous l'instruction de sophrologie (illustrée dans la Figure 19) et produite d'une boucle de neurofeedback (montrée dans la Figure 20), qui se compose :
 - a. **d'un instrument de mesure cérébrale** : mesure les activités cérébrales et donne le résultat (le score de méditation) au processeur en temps réel.
 - b. **d'un processeur** : traduit le résultat (le score de méditation) en une suggestion affichée sous l'instruction de sophrologie selon nos règles.
 - c. **de l'utilisateur** : reçoit cette rétroaction et génère les activités cérébrales.

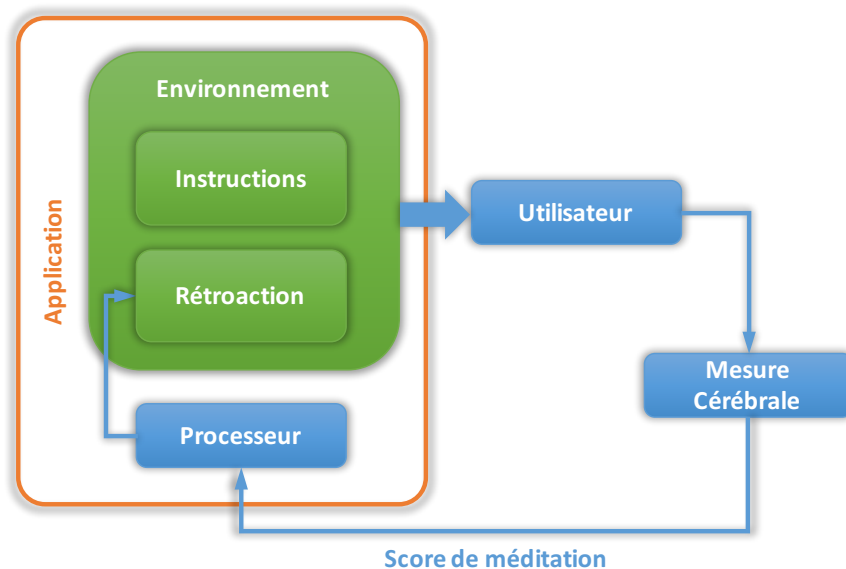


Figure 20. Architecture du système *Virtual Sophrologist 1.0*, basée sur la boucle de neurofeedback. La mesure cérébrale donne le score de méditation de l'utilisateur à

l'application sur le smartphone. Le processeur dans cette application traduit le score de méditation en une rétroaction. Et l'utilisateur s'immerge dans un environnement virtuel, guidé par des instructions de sophrologie et des rétroactions en temps réel.

3.3.1 Environnements dans la réalité virtuelle

Nous avons créé trois environnements à choisir par les utilisateurs, incluant « Seaside », « Japanese Garden » et « Waterfall », voir les figures suivantes. Tous les environnements en 360° sont créés par le moteur de jeu *Unity* (mentionné dans la section 2.2.4) et permettent aux utilisateurs de tourner leur tête pour choisir une vue préférée. Il y a le soleil dans le ciel dans tous les environnements, parce qu'il est lié à la chaleur en Sophrologie.

La scène « Seaside » (Figure 21) est une vue au bord de mer. Il y a une montagne derrière et aucun son de fond dans cette scène. Cette scène convient aux utilisateurs qui aiment une vue vaste, fiable et tranquille.

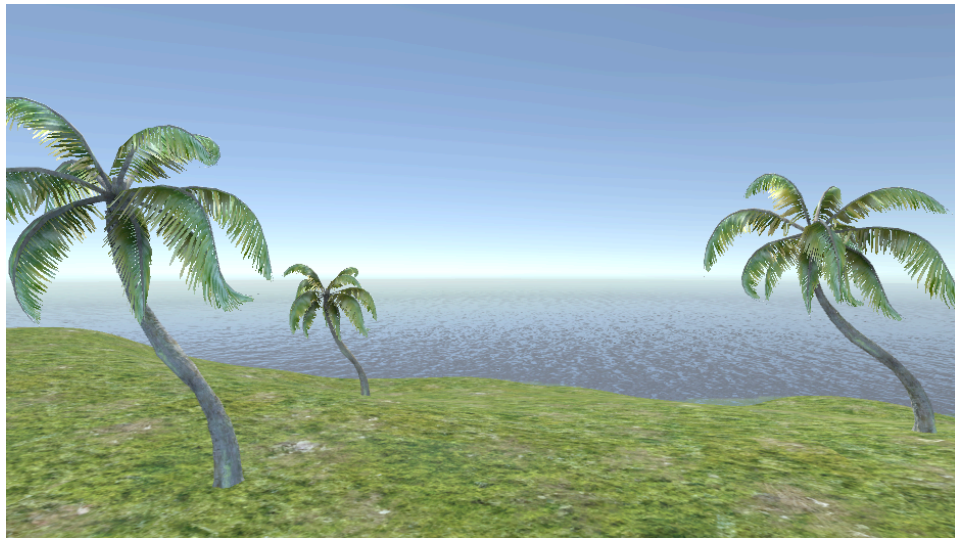


Figure 21. Scène « Seaside » de notre environnement, une vue au bord de mer. Il y a une montagne derrière et le soleil dans le ciel. Cette scène inspire la fiabilité et la tranquillité.

La scène « Japanese Garden » (Figure 22) est inspirée par un jardin japonais. Elle est composée d'une rivière passant au travers du jardin. Cette scène convient aux utilisateurs qui apprécient les détails et le son de la rivière.



Figure 22. Scène « Japanese Garden » de notre environnement, une vue dans un jardin japonais. Il y a une rivière, un pont, des plantes et le soleil.

La scène « Waterfall » (Figure 23) décrit une chute dans la montagne et un lac à gauche, mais aucun son de fond pour les utilisateurs qui préfèrent le calme et les roseaux flottant doucement dans le vent.



Figure 23. Scène « Waterfall » de notre environnement, une vue de la chute dans la montagne. Il y a aussi un lac à gauche et le soleil dans le ciel bleu.

3.3.2 Instructions de sophrologie

Afin de guider les utilisateurs à se détendre, nous avons écrit 93 instructions de sophrologie au total en anglais et à la première personne, incluant 84 instructions pour détendre les utilisateurs et 9 instructions pour les réveiller lentement et terminer la procédure de relaxation. Chaque instruction est courte et associée à la pratique de la pesanteur, de la chaleur, du rythme cardiaque, de la respiration, du front, des organes, du flot, etc. Nous n'afficherons pas toutes les instructions dans l'annexe, car elles sont confidentielles, mais nous pouvons donner quelques exemples : « I feel supremely calm », « My right arm is getting limp and heavy ».

Toutes les 10 secondes, une instruction est affichée au centre de l'interface utilisateur peut importe où l'utilisateur se tourne. En même temps, cette instruction est dite en employant une ressource d'Unity *RTVoice*¹⁰ (la Figure 24) qui peut convertir le texte en parole. La voix dépend de la valeur par défaut de l'appareil sur lequel l'application est lancée. Nous avons choisi une voix féminine sur Samsung Galaxy S6.

Ainsi, chaque séance de formation dure environ 15 minutes (930 secondes).



Figure 24. Le plugin *RTVoice* peut convertir le texte en parole (Text to speak), le prononcer par la voix choisie de l'appareil (Voices) et même générer le spectre (Spectrum). Figure tirée de (Crosstales 2016).

¹⁰ <https://www.assetstore.unity3d.com/en#!/content/48394>

3.3.3 Rétroaction d'EEG

Pendant ces 930 secondes, chaque rétroaction d'EEG est affichée sous l'instruction de sophrologie et produite en temps réel par une boucle de neurofeedback, qui consiste en **d'un instrument de mesure cérébrale, d'un processeur et de l'utilisateur.**

L'instrument de mesure cérébrale

Selon la comparaison des casques d'EEG dans le Tableau IV dans la section 2.3.4, considérant le nombre de canaux et la facilité, nous avons choisi le casque d'EEG Emotiv EPOC (la Figure 25) qui a 14 canaux (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, et AF4) (Figure 11) respectant le système international 10/20 présenté dans la section 2.3.3. Le casque Emotiv EPOC mesure les activités cérébrales de l'utilisateur et transmet les données à son logiciel.



Figure 25. Le casque Emotiv EPOC, qui contient des électrodes et un dongle USB, mesure les activités cérébrales. Figure tirée de (Poulsen, Krøgholt 2013).

L'Emotiv offre un logiciel permettant de voir visuellement des ondes et la qualité de connexion (Figure 26) et d'enregistrer des données dans un fichier .edf qui peut être transformé en un fichier .csv.

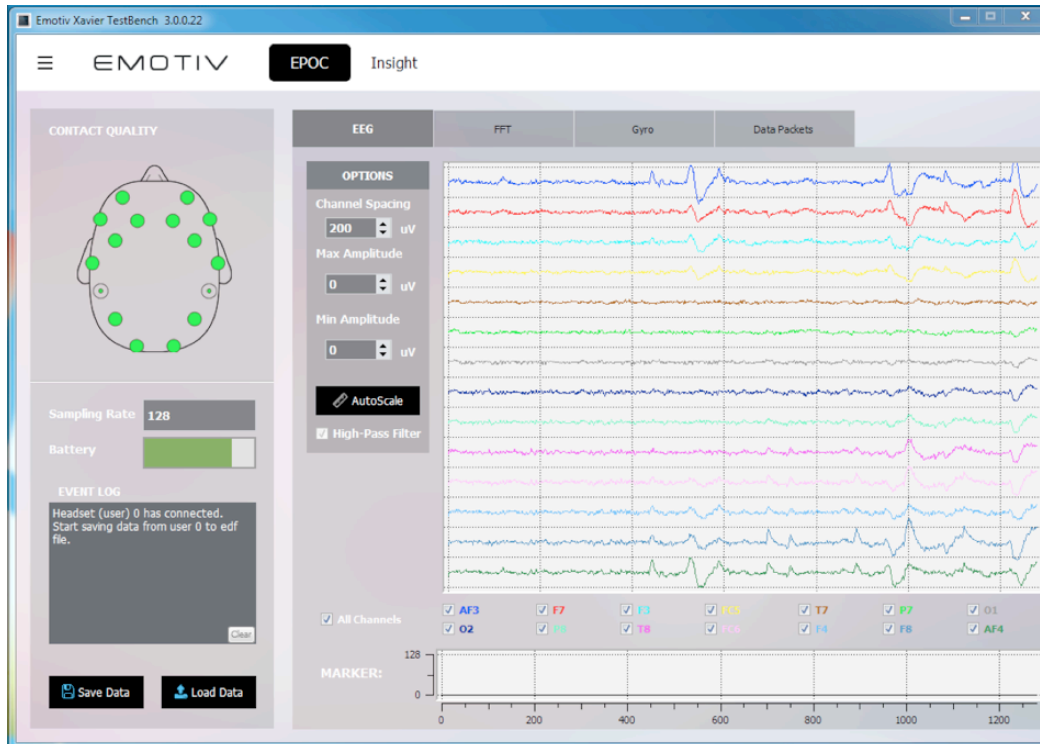


Figure 26. Une capture d'écran du logiciel d'Emotiv, qui montre les 14 ondes et la qualité de connexion (Contact Quality) et offre le téléchargement des données.

L'Emotiv nous permet aussi d'extraire quatre types de scores affectifs avec son kit de développement logiciel, comme présentés au Tableau V. Les scores affectifs sont calculés par son modèle basé sur de nombreuses expériences d'étiqueter les niveaux de chaque émotion par des psychologues selon la fréquence de respiration, la fréquence cardiaque, le débit sanguin et la réponse de la conductance cutanée.

Tableau V. Quatre types de scores affectifs du kit de développement logiciel d'Emotiv et leur interprétations, basé sur de nombreuses expériences

Score affectif	Domaine de variation	Interprétation
Score d'engagement	[0,1]	Niveau d'immersion dans le moment, un mélange d'attention et de concentration, caractérisé par une augmentation de l'excitation des ondes bêta et une atténuation des ondes alpha.

Score d'excitation	[0,1]	Niveau d'éveil avec une valeur positive, caractérisé par une activation dans le système nerveux sympathique.
Score de frustration	[0,1]	Liée étroitement au score de stress.
Score de méditation	[0,1]	Niveau de relaxation, basé sur l'analyse des ondes thêta et des ondes delta (voir Tableau III). Plus le score est élevé, plus la personne est calme.

Afin d'extraire le score de méditation et de l'envoyer au processeur, nous avons développé un projet « Serveur » dans Unity 4.5.3f3 qui s'exécute sur un ordinateur Windows 7 pour extraire le score de méditation en temps réel et l'envoyer au processeur 60 fois par seconde par le protocole UDP (en anglais user datagram protocol).

Processeur

Notre processeur est une partie du projet Unity 5.5.1f1 « Client », qui non seulement offre les environnements de réalité virtuelle mais aussi montre les instructions de sophrologie. Après avoir reçu le score de méditation à partir du « Serveur », le processeur l'écrit avec horodatage dans un fichier .csv et le traduit en une suggestion affichée sous l'instruction de sophrologie selon nos règles, comme montrées dans le Tableau VI.

Tableau VI. Règles de traduction (en anglais)

Meditation Score	Feedback
[0, 0.3333)	I need to take a long and deep breath.
[0.3333, 0.6667)	I feel warm and relaxed.
[0.6667, 1]	I am relaxed.

Le score de méditation est de 0 à 1 (plus proche de 1, les usagers sont plus détendus). Néanmoins, il est trop difficile d'atteindre plus de 0,8. Cela n'arrête pas l'utilisation du score de méditation (Roo et al. 2016). Selon les expériences d'un grand nombre d'utilisateurs

d'EPOC, la moyenne du score de méditation est d'environ 0,3-0,4 et le maximum est d'environ 0,6-0,7. Alors nous considérons un score sous 0,3333 (non inclus) comme l'état nerveux, un score supérieur à 0,6667 (inclus) comme l'état détendu, et un score entre les deux (0,3333 inclus mais 0,6667 non inclus) comme l'état naturel. Il faut agir contre l'état nerveux : « J'ai besoin de prendre une respiration longue et profonde ». Il faut encourager l'utilisateur à se détendre plus profondément quand son état est naturel : « Je me sens chaud et détendu ». Quand l'utilisateur est détendu, il faut l'informer et renforcer cet état : « Je suis détendu ».

Finalement, le projet « Client » se construit comme une application Android fonctionnant sur Samsung Galaxy S6, qui est compatible avec le Gear VR de Samsung.

L'utilisateur

Quand l'utilisateur reçoit la rétroaction et génère les nouvelles activités cérébrales, la boucle du neurofeedback est complète. Vu que l'utilisateur doit porter le casque Emotiv EPOC et un casque de réalité virtuelle en même temps, nous avons choisi le Gear VR de Samsung, car sa sangle est souple. Finalement, la Figure 27 montre le dispositif de notre système.

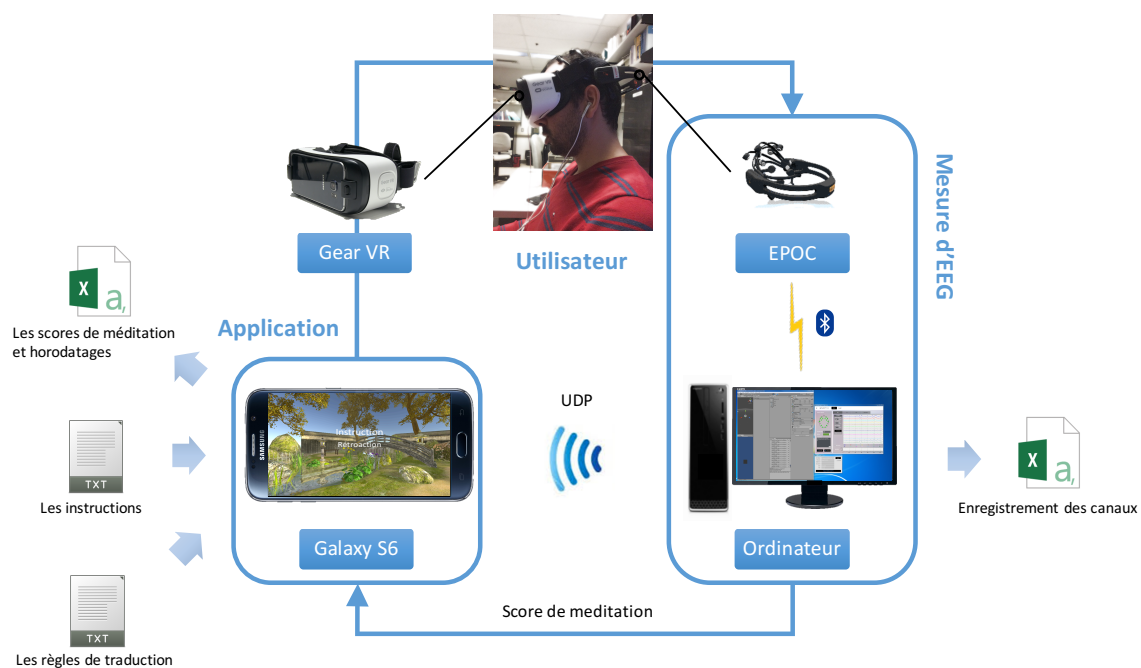


Figure 27. Dispositif du système. L'utilisateur porte un casque d'EEG Emotiv EPOC et un casque de la réalité virtuelle Samsung Gear VR. L'EPOC mesure les activités cérébrales

de l'utilisateur et les transmet à son logiciel. Nous recueillons le score de méditation par notre projet « Serveur » dans Unity sur l'ordinateur. Le score de méditation est envoyé à l'application au smartphone. L'application le traduit en une rétroaction et la montre à l'utilisateur. Il s'immerge dans un environnement virtuel par le Gear VR et suit l'instruction de sophologie et la rétroaction.

Chapitre 4 : Expérience, résultats et amélioration

Afin d'évaluer les effets du *Virtual Sophrologist 1.0*, nous avons mené une expérience au laboratoire GRITI que nous décrivons en détail dans ce chapitre. Après avoir analysé les résultats, nous avons amélioré notre système. Cette amélioration est aussi présentée dans ce chapitre.

4.1 Consentement

L'expérience comprenait 8 séances de formation pendant un mois, deux fois par semaine et chaque séance durait de 30 à 60 minutes. Les participants ont été requis :

- 1) de suivre seulement un environnement qu'ils ont choisi librement et volontairement au début de la première séance,
- 2) de remplir un questionnaire psychologique trois fois : avant la première séance de formation, après la quatrième séance de formation et après l'huitième séance de formation,
- 3) de fournir les données mesurées par l'EEG, incluant : les données des 14 canaux d'EPOC (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8 et AF4) et les scores de méditation.

Les participants ont obtenu 80\$ au total (40\$ à la quatrième séance de formation et 40\$ à la fin). L'Annexe I montre notre formulaire de consentement.

4.2 Critères

Nous avons fait l'expérience avec 6 participants (2 femmes et 4 hommes). Tous les participants satisfaisaient aux conditions :

- 1) âgé entre 18 et 40 ans (moyenne = 29,67, écart-type = 4,84 et de 25 à 37),
- 2) de ne souffrir pas de TDAH, dyslexie, dyspraxie, etc.
- 3) d'avoir une audition normale,

- 4) de n'avoir jamais subi de traumatisme crânien (Boutros 2013),
- 5) de ne prendre aucun médicament agissant sur le système nerveux (Boutros 2013),
- 6) d'être capable de comprendre l'anglais (parce que le *Virtual Sophrologist* ne supporte que l'anglais pour le moment),
- 7) de vouloir persister pendant un mois et terminer les 8 séances de formation (deux fois par semaine).

4.3 Métrique d'évaluation

Puisque notre but est de former les gens à se détendre plus rapidement, nous devons mesurer deux aspects :

1. si les participants se sentent détendus
 - par des données subjectives : résultats des questionnaires (le score d'anxiété et le score de dépression)
 - par des données objectives : résultats d'EEG (le maximum du score de méditation)
2. si les participants se détendent plus rapidement qu'avant
 - par des données objectives : résultats d'EEG (l'intervalle de temps à la relaxation)

4.3.1 Les scores d'EADH

L'échelle d'anxiété et de dépression en milieu hospitalier (EADH) est un questionnaire de quatorze items conçu par Zigmond et Snaith en 1983 (Zigmond,Snaith 1983). Il est très populaire et cité par 25 551 articles dans *Google Scholar* (avril 2017). Par exemple, (Golding et al. 2015) l'ont utilisé pour évaluer le niveau de l'anxiété du participant et le niveau du dépression du participant. Nous l'attachons à l'Annexe II.

La simplicité et la facilité d'utilisation sont la beauté d'EADH. Sept de ses quatorze items sont liés à l'anxiété tandis que les sept autres à la dépression. Chaque élément est noté

sur une échelle de 0-3, 3 indique des fréquences de symptômes plus élevées. Le score total pour l'anxiété et celui pour la dépression vont de 0 à 21 avec des scores classés comme suit : normale 0-7, légère 8-10, modérée 11-14 et sévère 15-21.

Dans cette étude, nous avons recueilli trois fois le score d'anxiété (EADH-A) et le score de dépression (EADH-D) des participants : avant la formation, à la 4e séance de formation et à la finale séance de formation respectivement. Ainsi, les changements de EADH-A et EADH-D indiqueront si notre système fonctionne au niveau psychologique.

4.3.2 L'intervalle de temps à la relaxation (IR)

L'intervalle de temps à la relaxation (IR), extrait du fichier du score de méditation, est le temps total en secondes pour atteindre le score de méditation de 0,6667, qui représente un état détendu comme expliqué en section 3.3.3. Cependant, tout le monde a sa propre ligne de base. Si le participant n'a jamais atteint de 0,6667, IR est considéré comme le temps total pour atteindre son maximum de score de méditation.

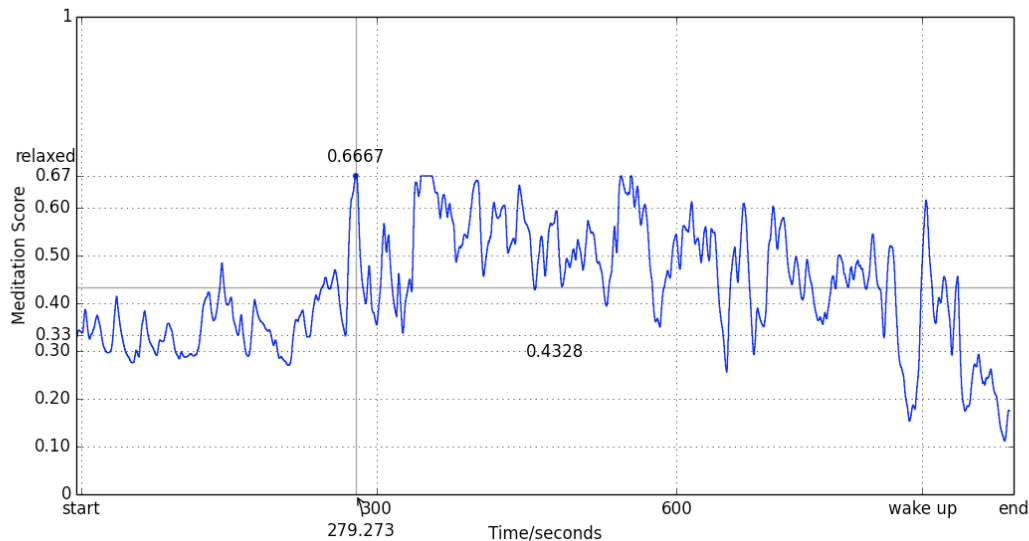


Figure 28. IR dans le cas où le participant atteint le score de méditation de 0,6667. Dans cet exemple, le maximum du score de méditation (Meditation Score) du participant est de 0,6667 et il est atteint après 279,273 secondes (IR) pour la première fois.

Par exemple, sur la Figure 28, le participant atteint le score de méditation de 0,6667 en 279,273 secondes. Alors, l'IR est égal à 279,273 dans ce cas. Toutefois, sur la Figure 29, le

participant n'atteint pas de 0,6667 et son maximum du score de méditation est 0,5917. Donc, l'IR désigne le temps pour atteindre de 0,5917, soit 506,051.

Le maximum d'IR est de 936 secondes, étant donné qu'il faut attendre 5 secondes avant d'entrer dans l'environnement choisi, et que les 93 instructions de sophrologie prennent 930 secondes. En conséquence, une diminution de IR des 8 séances de formation peut indiquer que le *Virtual Sophrologist* aide les participants à se détendre plus rapidement.

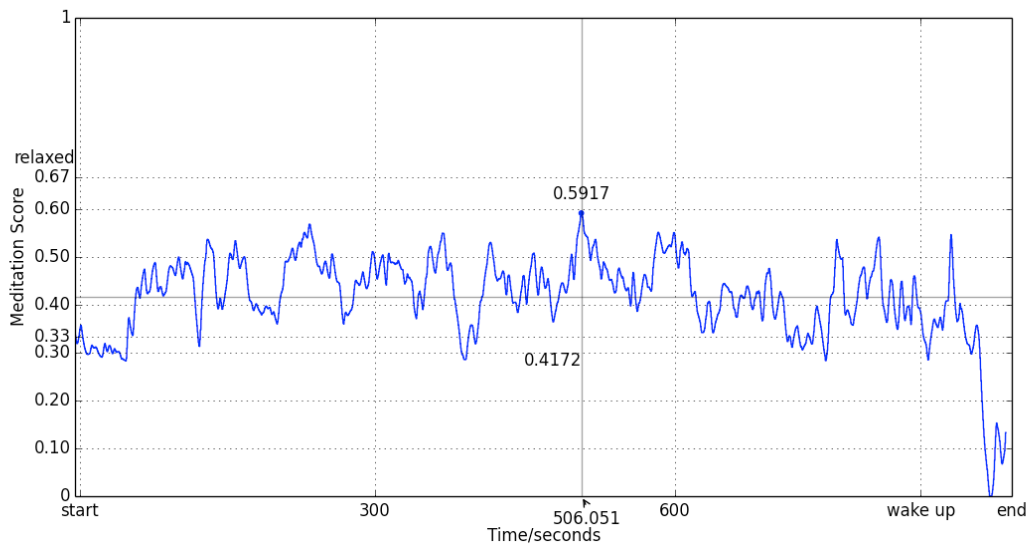


Figure 29. IR dans le cas où le participant n'atteint pas le score de méditation de 0,6667. Dans cet exemple, le maximum du score de méditation du participant est de 0,5917 et il est atteint après 506,051 seconds.

4.4 Résultats

Nos résultats prouvent l'efficacité positive de notre système sur la vitesse et la profondeur de la relaxation avec les diminutions de EADH-A et EADH-D, une diminution de la IR dans le groupe où les participants peuvent atteindre 0,6667 en score de méditation et une augmentation du maximum du score de méditation.

4.4.1 Les scores d'EADH

Dans le Tableau VII, les diminutions de moyennes de EADH-A et EADH-D montrent que l'efficacité du système est positive du point de vue psychologique. La Figure 30 nous donne une visualisation de ce résultat.

Tableau VII. Moyenne, écart-type et gamme des EADH-A et des EADH-D pendant trois séances de recueil.

	EADH-A			EADH-D		
	Moyenne	Écart-type	Gamme	Moyenne	Écart-type	Gamme
1^{ère} séance	8.33	3.08	3-11	5.67	3.39	2-10
4^{ème} séance	6.33	2.05	3-9	4.50	2.26	2-8
8^{ème} séance	6.33	3.08	3-11	4.17	3.06	2-9

En notant la gamme de EADH-A et EADH-D dans le Tableau VII, nous devons admettre un fait qu'il est impossible que le *Virtual Sophrologist* soit utile pour tout le monde. En effet, l'un de nos participants a eu un EADH-A de 11 à la première séance, un EADH-A de 9 à la quatrième séance et finalement un EADH-A de 11 à la huitième séance. Nous remarquons une augmentation du EADH-A entre la quatrième séance et la huitième séance. Il a expliqué qu'il aimait la scène « Japanese Garden » mais peut-être le son de la rivière l'a affecté. Comme dit dans (Heller 2012), « Toutes les méthodes psychothérapeutiques ne sont utiles qu'à ceux qui les aiment ».

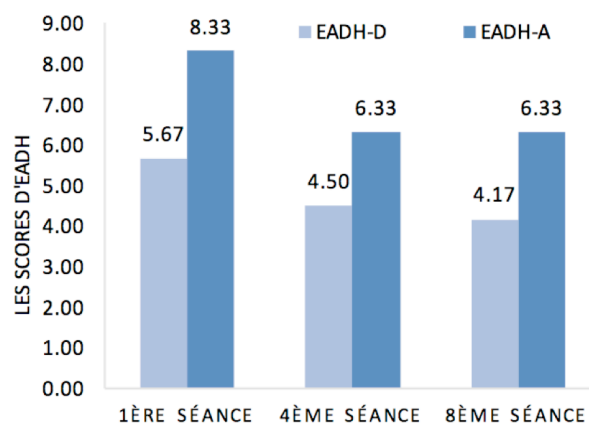


Figure 30. La variation des moyennes de EADH-A et EADH-D pendant trois séances de recueil. Nous constatons une diminution pour EADH-D (5,67 – 4,50 – 4,17) et pour EADH-A (8,33 – 6,33 – 6,33).

4.4.2 IR

Comme les enregistrements du score de méditation sont trop grands, nous les avons traités au PyCharm en Python pour obtenir les maximums du score de méditation et les IR.

Sur la Figure 31, bien que la tendance de la moyenne d'IR pour tous les participants ne soit pas claire, même négative, nous avons trouvé le résultat positif en divisant les participant en deux groupes. Parce que comme j'ai décrit dans la section 4.3.2, nous avons deux façons pour calculer l'IR, qui dépend si le participant a atteint ou non le score de méditation de 0,6667. Trois de nos six participants, qui ont atteint le score de méditation de 0,6667, nommés « Groupe qui a atteint le score de méditation de 0,6667 ». Le première participant a atteint ce score dans trois séances de formation, le deuxième participant l'a atteint dans six séances de formation et le troisième participant dans huit séances de formation. Ils ont obtenu une diminution de IR de 541,768s (allant de 227,274s à 913,595s) à 330,286 s (allant de 100.615 à 780.165). Alors que les trois autres, nommés « Groupe qui n'a jamais atteint le score de méditation de 0,6667 », ont enregistré une augmentation de IR.

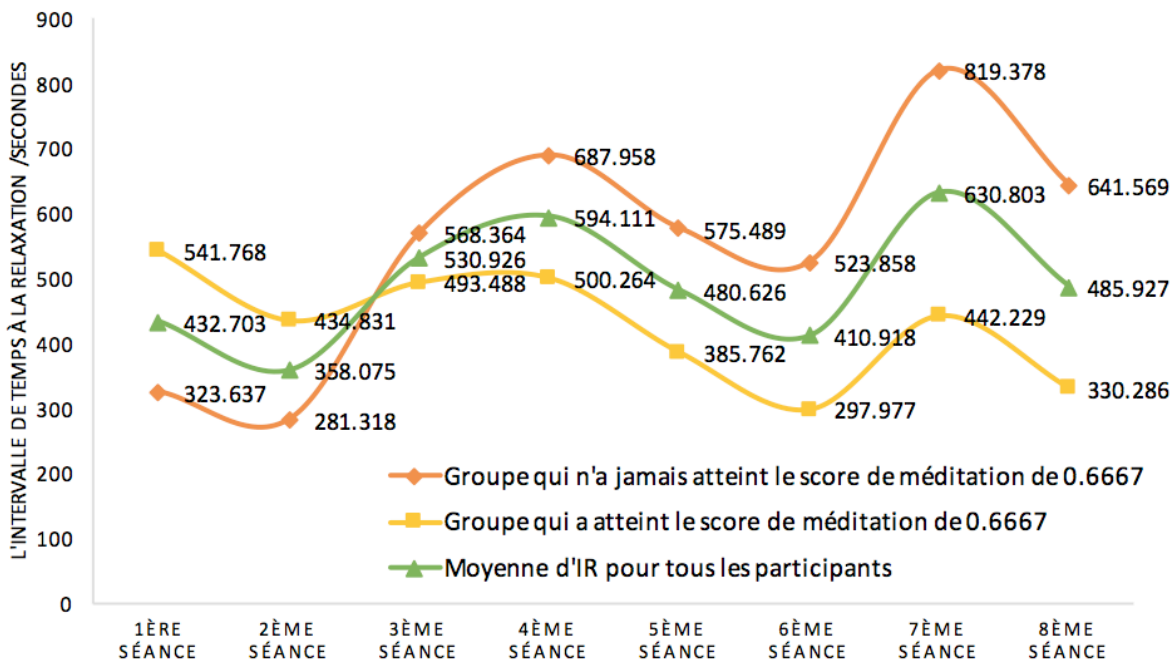


Figure 31. Moyenne d'IR pour tous les participants, une diminution d'IR pour 3 participants qui ont atteint le score de méditation de 0,6667 (de 541,768s à 330,286s) et une augmentation d'IR pour 3 autres qui n'ont jamais atteint le score de méditation de 0,6667 (de 323,637s à 641,569s).

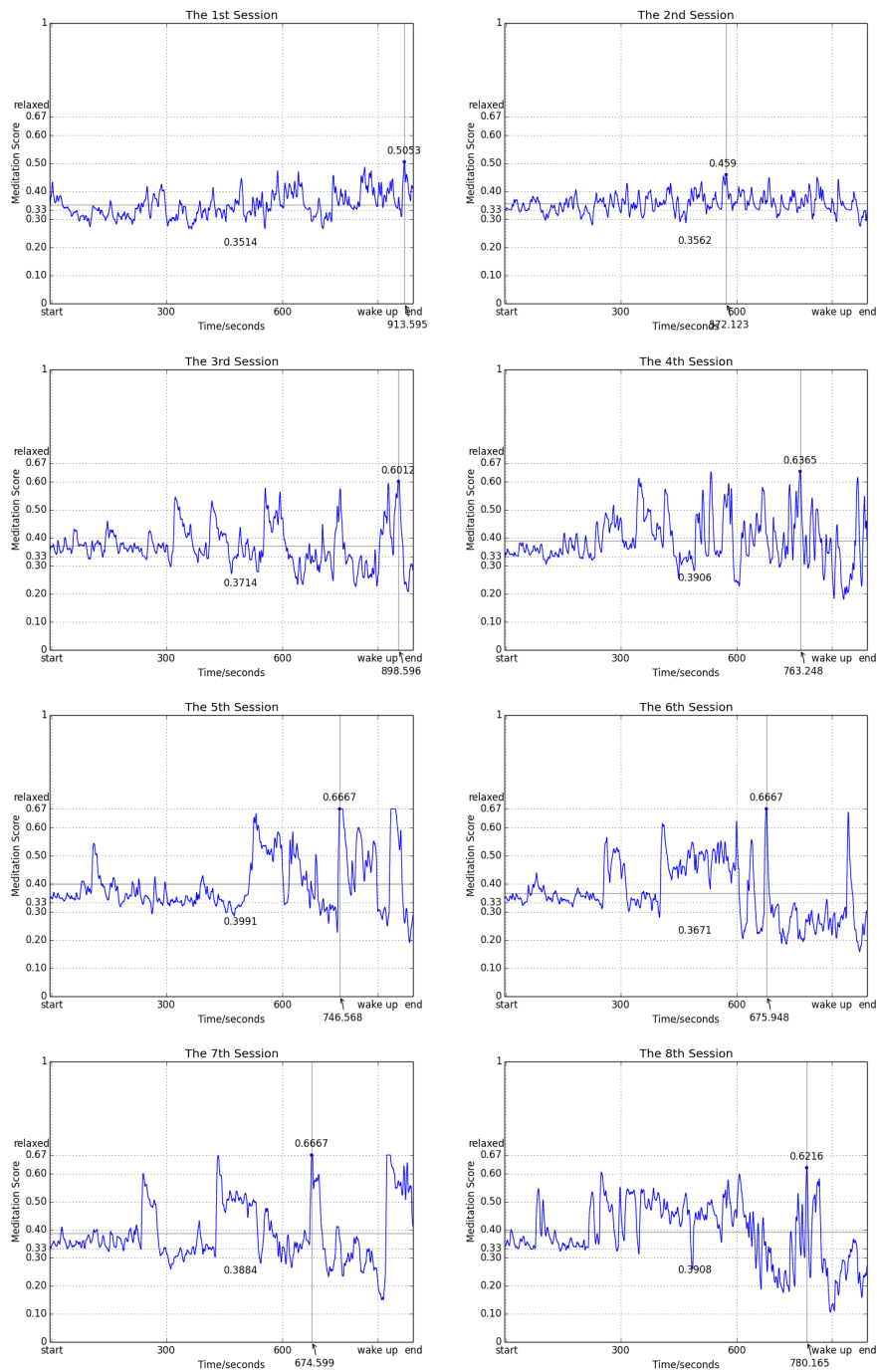


Figure 32. Un exemple du score de méditation d'un participant. Dans cet exemple, le participant n'a pas atteint le score de méditation de 0,6667 jusqu'à la 5^{ème} séance. L'IR diminue avec la diminution du maximum du score de méditation, en comparant la 1^{ère} séance avec la 2^{ème} séance. L'IR s'accroît avec l'augmentation du maximum du score de méditation, en comparant la 2^{ème} séance avec la 3^{ème} séance. Particulièrement, quand le participant a atteint de 0,6667 dans la 5^{ème} séance, la 6^{ème} séance et la 7^{ème} séance, l'IR diminue.

Nous avons trouvé **la raison principale** de cette « efficacité négative » dans les enregistrements du score de méditation : l'IR augmentait avec l'augmentation du maximum du score de méditation. La Figure 32 nous démontre un exemple. Certainement, il est trop idéal de réduire l'IR dans toutes les séances, parce que la condition physique et mentale du participant est **une autre raison**, telle que le participant a eu un rhume pendant la 8^{ème} séance. Nous avons recueilli les rétroactions des participants pour les raisons de l'augmentation de l'IR, comme présentées sur la Figure 33.

Du côté statistique, nous avons 48 séances au total (8 séances multipliés par 6 participants), alors nous avons 42 changements au total (7 changements multipliés par 6 participants), en comparant la $i^{\text{ème}}$ séance avec la $i+1^{\text{ème}}$ séance. L'IR s'accroît 16 fois dans les 42 changements. Dans les 16 augmentations de l'IR, le maximum du score de méditation s'accroît 11 fois. Nous pouvons dire que 68,75% de l'augmentation de l'IR est liée à l'accroissement du maximum du score de méditation.

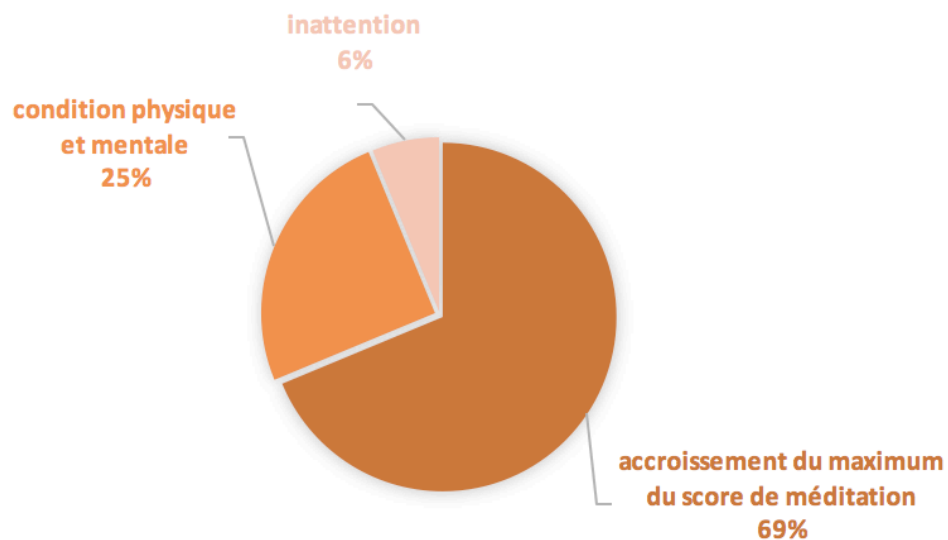


Figure 33. Les raisons de l'augmentation de l'IR : 68,75% de l'augmentation de l'IR est liée à l'accroissement du maximum du score de méditation, 25% est liée à la condition physique et mentale (avoir un rhume), et 6% est liée à l'inattention.

Alors du point de vue du maximum du score de méditation, la Figure 34 montre sa tendance positive, ce qui est faible mais raisonnable, comme nous le savons, l'effet évident de

toutes techniques de relaxation se manifeste généralement avec une pratique à long terme, au moins trois mois¹¹.

En bref, les trois participants du « Groupe qui a atteint le score de méditation de 0,6667 » ont atteint 0,6667 du score de méditation 17 fois dans ses 24 séances (8 séances multipliés par 3 participants). Les changements sont calculés par le nombre de paires de séances successives où les participants ont atteint le score de méditation de 0,6667. Dans ce cas, il existe 13 changements. En effet, le premier participant a atteint ce score pendant 3 séances successives, donc il y a eu 2 changements. Le deuxième participant a atteint ce score pendant 5 séances successives, donc il y a eu 4 changements. Le troisième participant a atteint ce score pendant 8 séances successives, donc il y a eu 7 changements. Parmi ces changements, l'IR a diminué 10 fois. 76,92% est suffisant pour dire que notre système aide les utilisateurs à se détendre plus rapidement.

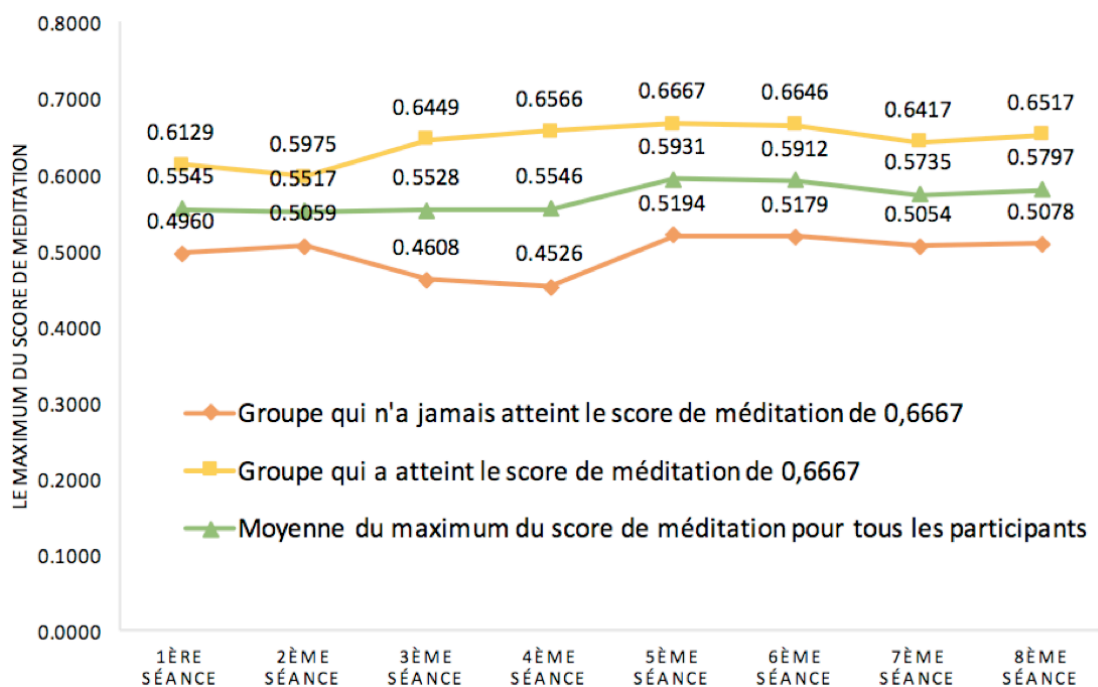


Figure 34. Augmentation des maximums du score de méditation pour tous les groupes.

¹¹ <http://www.guidetopsychology.com/autogen.htm>

4.4.3 Discussions

Il faut noter qu'un de nos participants qui aime et bénéficie de *Virtual Sophrologist* n'a jamais atteint le score de méditation de 0,6667 dans les 8 séances de formation. Plus précisément, il se sentait détendu et même dormait pendant les séances. Son EADH-A a diminué de 11 à 8, tandis que son EADH-D est réduit de 9 à 6 après les 8 séances de formation. Ainsi, il emploie la sophrologie pour s'endormir dans 2 à 3 minutes chaque nuit, ce qui n'était pas le cas auparavant. Les raisons pour lesquelles il n'a jamais atteint 0,6667 ont été discutées comme suit :

1. Il essayait de traduire les instructions de sophrologie de l'anglais en sa langue.
2. Il pensait à d'autres choses pendant la séance de formation.
3. Il rêvait quand il dormait pendant la séance de formation.

En conséquence, nous allons observer le niveau de concentration de l'utilisateur avant de développer les versions en plus de langues. De plus, car chacun a sa propre ligne de base, nous allons aussi observer le niveau de stress de chaque participant.

4.5 Le système *Virtual Sophrologist 2.0*

Nous recueillons les scores affectifs concernant le niveau de stress et le niveau de concentration, soit les scores de frustration et les scores de concentration. Cela change la boucle du neurofeedback (il faut des nouvelles règles de traduction), qui produit les rétroactions d'EEG, comme la Figure 35. Nous avons aussi complété le processus d'utilisation.

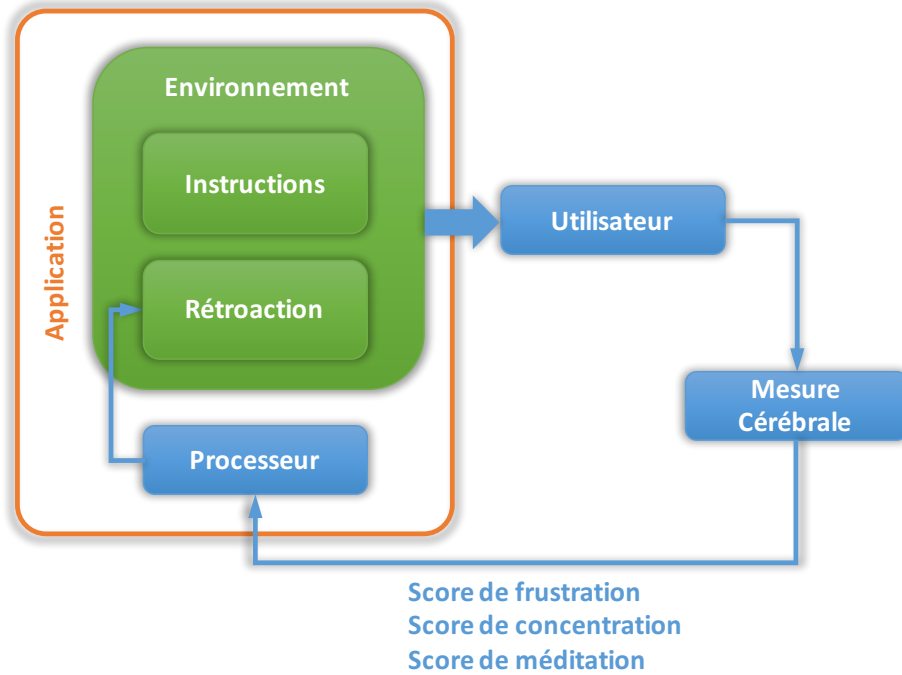


Figure 35. Architecture du système *Virtual Sophrologist 2.0*, basée sur l'architecture de la version *1.0*. La mesure cérébrale donne aussi le score de frustration et le score de concentration de l'utilisateur en plus du score de méditation à l'application sur le smartphone. Le nombre des règles de traduction augmente. Une révision a été ajoutée au début et un résumé à la fin de chaque séance.

4.5.1 L'instrument de mesure cérébrale

L'Emotiv a mis à jour son kit de développement logiciel, cela nous permet d'extraire plus de types de scores affectifs, incluant le score de concentration et le score d'intérêt, comme présentés au Tableau VIII.

Tableau VIII. Améliorations de scores affectifs

Score affectif	Domaine de variance	Interprétation
Score d'engagement	[0,1]	Niveau d'immersion dans le moment, un mélange d'attention et de concentration, caractérisé par une augmentation de l'excitation des ondes bêta et une atténuation des ondes alpha.

Score d'excitation	[0,1]	Niveau d'éveil avec une valeur positive, caractérisé par une activation dans le système nerveux sympathique.
Score de frustration	[0,1]	Niveau de confort avec le défi.
Score de relaxation	[0,1]	Score de méditation amélioré, basé sur l'analyse des ondes thêta et des ondes delta.
Score de concentration	[0,1]	Niveau de concentration à la tâche, lié à l'état du flux.
Score d'intérêt	[0,1]	Niveau d'attraction ou d'aversion pour la tâche, lié au plaisir de l'activité.

Nous avons refait le projet « Serveur » dans Unity 5.5.1f1. Maintenant, il peut non seulement extraire les trois types de scores affectifs dont nous avons besoin, mais aussi les visualiser sur l'ordinateur Windows 10, comme montré sur la Figure 36. Il les envoie au processeur 60 fois par seconde par le protocole UDP.

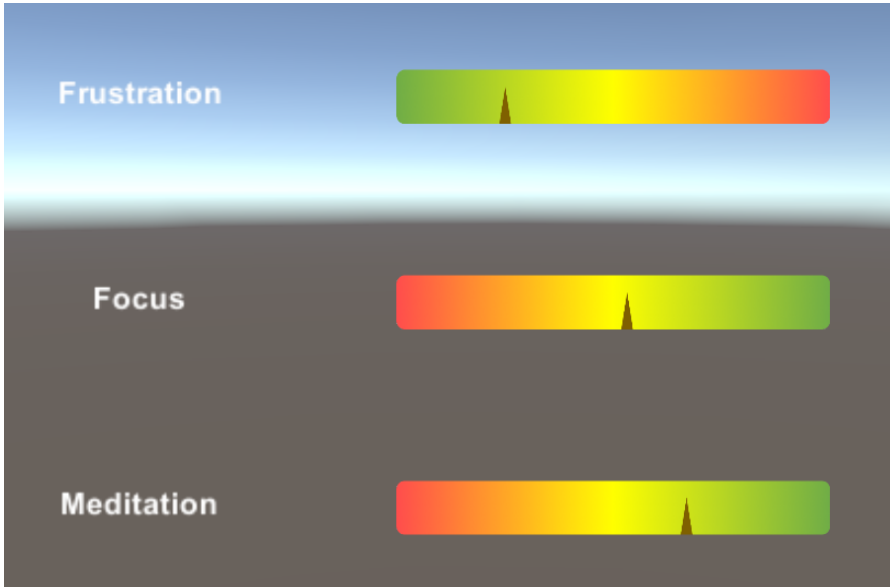


Figure 36. Visualisation des trois scores au projet « Serveur ». Les trois flèches indiquent respectivement les trois scores en temps réel. La couleur du « vert » au « rouge » pour le

score de frustration (Frustration) présente un score de 0 à 1, de l'état confortable à l'état inconfortable. La couleur du « rouge » au « vert » pour le score de concentration (Focus) présente un score de 0 à 1, de l'état inattentif à l'état attentif. La couleur du « rouge » au « vert » pour le score de méditation (Meditation) présente un score de 0 à 1, de l'état stressé à l'état détendu.

4.5.2 Processeur

Comme nous recueillons trois types de scores affectifs et les divisons respectivement en trois niveaux, nous avons refait 3³ règles de traduction de scores en rétroactions, comme présentées sur la Figure 37.

Case	Frustration Score	Focus Score	Meditation Score	Feedback
1	[0, 0.3333]	[0, 0.3333]	[0, 0.3333]	I need listen to the instructions.
2	[0, 0.3333]	[0, 0.3333]	[0.3333, 0.6667]	I will relax more with following well the instructions.
3	[0, 0.3333]	[0, 0.3333]	[0.6667, 1]	I get relaxed, I will feel better with following well the instructions.
4	[0, 0.3333]	[0.3333, 0.6667]	[0, 0.3333]	Keep following and take a long and deep breath.
5	[0, 0.3333]	[0.3333, 0.6667]	[0.3333, 0.6667]	I feel warm and relaxed with focusing on the instructions.
6	[0, 0.3333]	[0.3333, 0.6667]	[0.6667, 1]	I get relaxed, I will feel better with focusing on the instructions.
7	[0, 0.3333]	[0.6667, 1]	[0, 0.3333]	Take a long and deep breath.
8	[0, 0.3333]	[0.6667, 1]	[0.3333, 0.6667]	I feel warm and relaxed.
9	[0, 0.3333]	[0.6667, 1]	[0.6667, 1]	I feel harmonious.
10	[0.3333, 0.6667]	[0, 0.3333]	[0, 0.3333]	I can get relaxed with listening to the instructions.
11	[0.3333, 0.6667]	[0, 0.3333]	[0.3333, 0.6667]	I feel warm and relaxed, it would be better with following well the instructions.
12	[0.3333, 0.6667]	[0, 0.3333]	[0.6667, 1]	I get relaxed, I feel better with following well the instructions.
13	[0.3333, 0.6667]	[0.3333, 0.6667]	[0, 0.3333]	Take it easy, take a long and deep breath.
14	[0.3333, 0.6667]	[0.3333, 0.6667]	[0.3333, 0.6667]	I feel warm and relaxed, it would be better with focusing on the instructions.
15	[0.3333, 0.6667]	[0.3333, 0.6667]	[0.6667, 1]	I get relaxed, I feel better with focusing on the instructions.
16	[0.3333, 0.6667]	[0.6667, 1]	[0, 0.3333]	I need to take a long and deep breath.
17	[0.3333, 0.6667]	[0.6667, 1]	[0.3333, 0.6667]	I feel warm and relaxed, I feel better.
18	[0.3333, 0.6667]	[0.6667, 1]	[0.6667, 1]	I get relaxed and I feel better.
19	[0.6667, 1]	[0, 0.3333]	[0, 0.3333]	I can get relaxed with following well the instructions.
20	[0.6667, 1]	[0, 0.3333]	[0.3333, 0.6667]	I am relaxing, I can feel better with following well the instructions.
21	[0.6667, 1]	[0, 0.3333]	[0.6667, 1]	I get relaxed, I can feel better with following well the instructions.
22	[0.6667, 1]	[0.3333, 0.6667]	[0, 0.3333]	Keep following, I can get relaxed.
23	[0.6667, 1]	[0.3333, 0.6667]	[0.3333, 0.6667]	Keep following, I am relaxing.
24	[0.6667, 1]	[0.3333, 0.6667]	[0.6667, 1]	I get relaxed, I can feel better.
25	[0.6667, 1]	[0.6667, 1]	[0, 0.3333]	I am following well, I can get relaxed.
26	[0.6667, 1]	[0.6667, 1]	[0.3333, 0.6667]	I am following well, I feel warm and relaxed.
27	[0.6667, 1]	[0.6667, 1]	[0.6667, 1]	I am following very well and I get relaxed.

Figure 37. Nouvelles règles de traduction (en anglais)

4.5.3 L'utilisateur

Pour une meilleure expérience de relaxation, nous avons complété le processus d'utilisation.

Tout d'abord, l'utilisateur se connecte par son nom dans la scène « Login » (Figure 38), qui lui permet d'avoir son propre enregistrement.

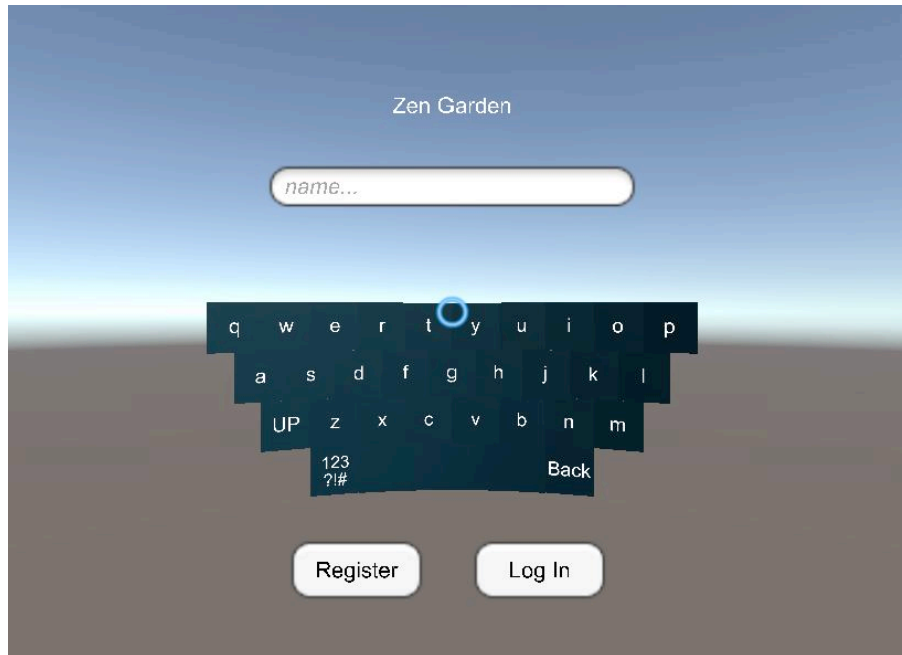


Figure 38. Scène « Login » permet à l'utilisateur de créer un compte (Register) ou se connecter à son dossier (Log In) en tapant avec un clavier virtuel.

Avant chaque séance de formation, nous rappelons à l'utilisateur ses résultats (l'IR et le maximum du score de méditation) de la séance de formation précédente, comme présentés dans la Figure 39.

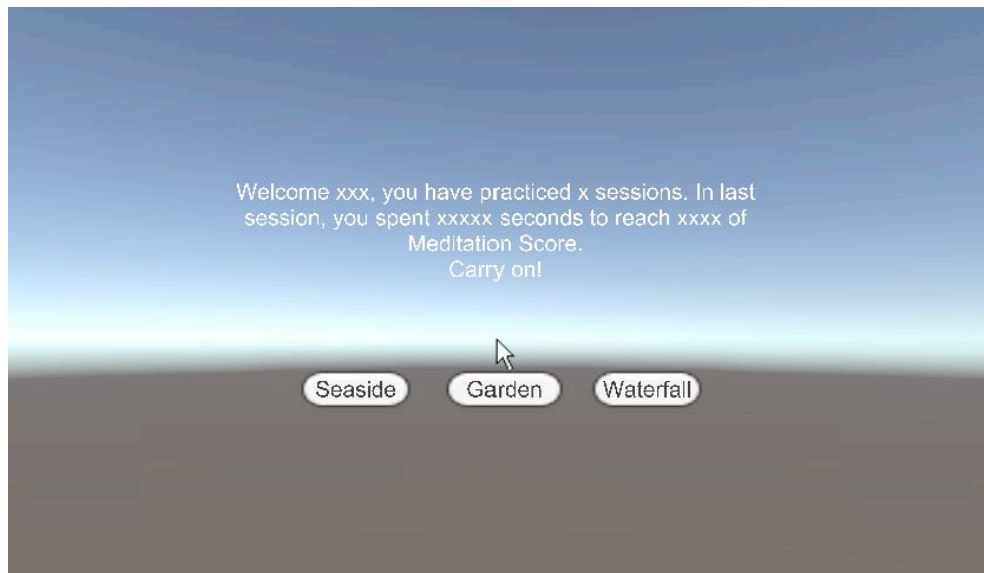


Figure 39. Scène « Review » permet à l'utilisateur de se souvenir le résultat précédant et de choisir l'environnement qu'il veut.

À la fin d'une séance de formation, le résultat de cette séance de formation (l'IR et le maximum du score de méditation) et un résumé d'IR sont montrés à l'utilisateur par la scène « Summary » (Figure 40).

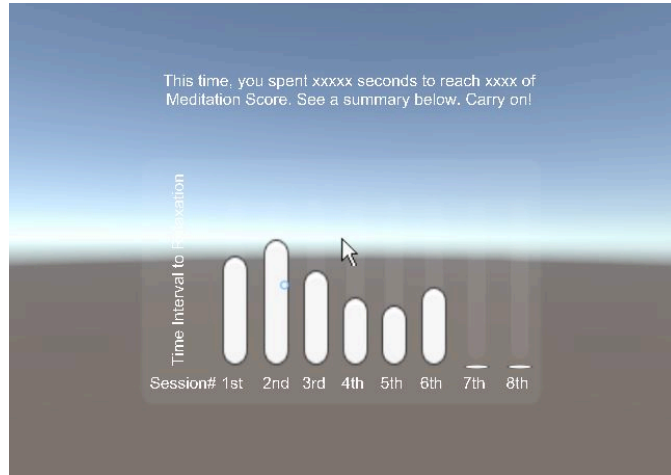


Figure 40. Scène « Summary » offre un résumé d'IR de toutes les séances précédentes à l'utilisateur.

Le nouveau dispositif du système est présenté dans la Figure 41.

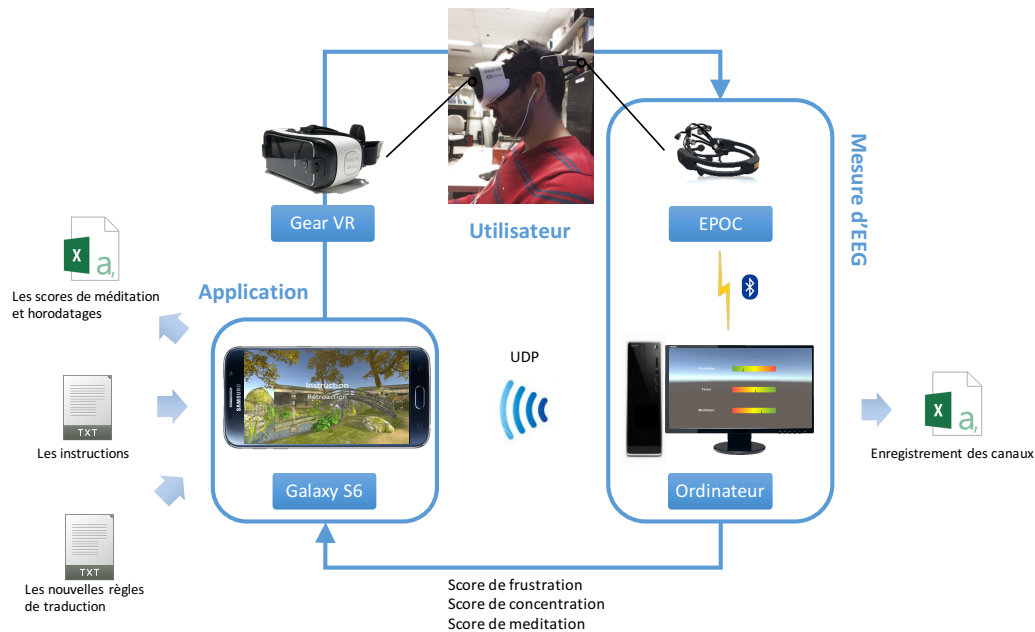


Figure 41. Nouveau dispositif du système. Le changement par rapport au système 1.0 : Nous recueillons trois scores et les visualisons par notre projet « Serveur » dans Unity sur l'ordinateur. Ces scores sont envoyés à l'application. Le nombre des règles de traduction augmente.

Chapitre 5 : Conclusion

En 2016, nous avons vu que beaucoup de casques de réalité virtuelle portables et abordables sont passés du laboratoire à la maison. Le Gear VR de Samsung était l'appareil de réalité virtuelle le plus vendu avec 4,3 millions d'unités. Les autres appareils de réalité virtuelle, incluant le PlayStation VR, l'HTC Vive et l'Oculus Rift, ont respectivement vendus au moins 200 000 unités. Il s'agit d'amener un outil à haut potentiel pour le traitement médical, la médecine préventive, l'éducation et la formation médicale à la maison. Selon Statista¹², le domaine des soins de santé (« Healthcare ») prendra la deuxième place dans le marché de l'application de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée en 2025, valant 5,1 milliards de dollars, comme montré sur la Figure 42.

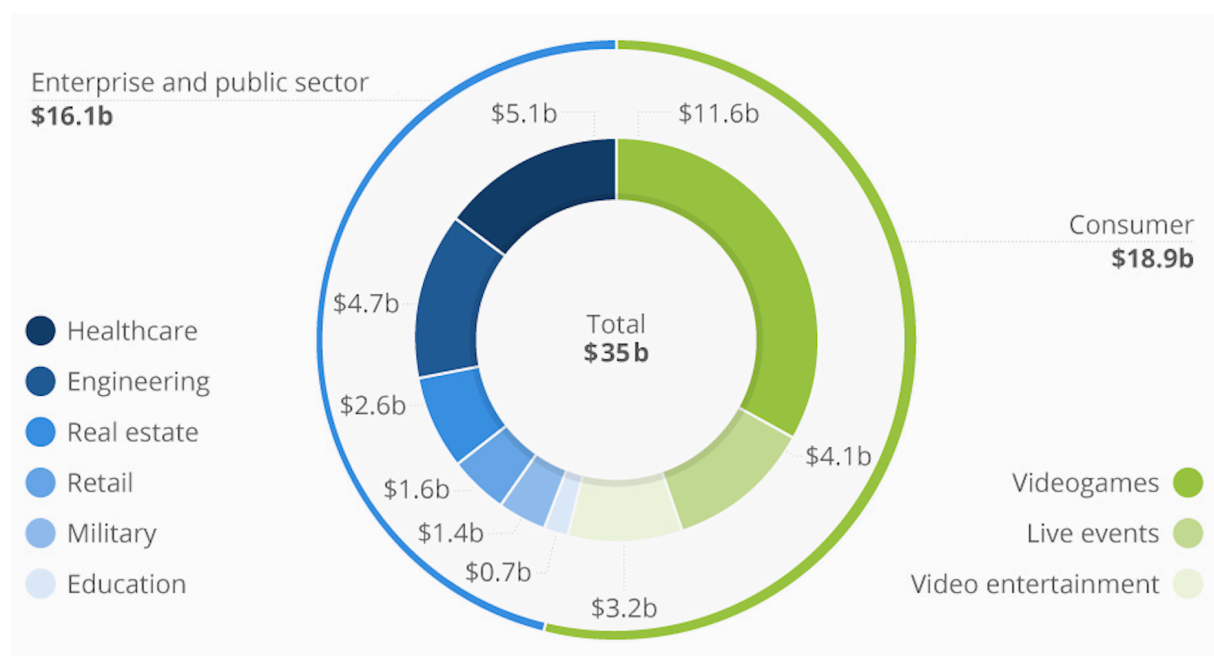


Figure 42. Prédiction de la taille du marché de l'application de la réalité virtuelle et la réalité augmentée pour différents cas d'utilisation en 2025. Figure tirée de (Richter 2016).

La relaxation prend toujours une place très importante dans notre vie, que ce soit sur le plan physique, sur le plan émotionnel ou sur le plan cognitif. Toutes les techniques de

¹² <https://www.statista.com/>

relaxation visent à notre bien-être, l'harmonie du corps et d'esprit. De nos jours, des applications de la relaxation en réalité virtuelle sont apparues le jour, par exemple, *GuidedMeditationVR*¹³ développée par *Cubicle Ninjas*¹⁴. *GuidedMeditationVR* offre quatre environnements et neuf séances de méditation guidée. Il est encourageant qu'elle puisse mesurer la fréquence cardiaque avant et après une séance par l'appareil pour montrer son efficacité. Cependant, comme de nombreux chercheurs, les concepteurs de *GuidedMeditationVR* se concentrent juste sur la relaxation (si les usagers se sentent détendus). Dans notre étude, nous avons porté notre intérêt également sur la capacité de relaxation (si les usagers se détendent plus rapidement qu'avant).

Dans ce mémoire, nous avons introduit notre système de formation de relaxation par le neurofeedback en réalité virtuelle, *Virtual Sophrologist*, qui non seulement rend les usagers détendus, mais aussi forme les usagers à se détendre plus rapidement et plus profondément qu'avant. Il plonge l'utilisateur dans ses environnements en réalité virtuelle, guide l'utilisateur à se détendre par les instructions de sophrologie et donne la rétroaction d'EEG en temps réel à l'utilisateur. Nous avons mené 8 séances de formation avec 6 participants pendant un mois (deux fois par semaine), recueilli leurs données subjectives à travers l'auto-évaluation et leurs données objectives à partir de l'EEG pour évaluer l'effectivité du *Virtual Sophrologist*. Des diminutions du score d'anxiété, du score de dépression et d'IR démontrent que *Virtual Sophrologist* peut non seulement rendre les usagers détendus, mais aussi forme les usagers à se détendre plus rapidement qu'avant. Les résultats de cette étude ont été publiés dans *Virtual Sophrologist : A Virtual Reality Neurofeedback Relaxation Training System* (article présenté en Annexe III).

La combinaison du neurofeedback avec la réalité virtuelle est prometteuse, non seulement parce que le neurofeedback peut renforcer le sentiment de présence dans la réalité virtuelle, mais aussi comme elle peut personnaliser l'expérience d'utilisateur. Par exemple, elle peut permettre au jeu de changer la difficulté du jeu selon les activités cérébrales d'utilisateur et

¹³ <https://guidedmeditationvr.com/>

¹⁴ <https://cubicleninjas.com/>

améliorer l'intérêt du jeu (Abdessalem,Frasson 2017). En conséquence, elle vaut la peine d'explorer de nombreuses applications, telles que l'application pour traiter les troubles anxieux, l'application pour traiter les phobies, l'application pour traiter l'insomnie, l'application pour traiter le trouble de la concentration, etc.

Bibliographie

- Abdessalem, H.B., Frasson, C.: Real-time Brain Assessment for Adaptive Virtual Reality Game: a Neurofeedback Approach. In: International Conference on Brain Function Assessment in Learning 2017, pp. 133-143. Springer
- Alarcao, S.M., Fonseca, M.J.: Emotions Recognition Using EEG Signals: A Survey. IEEE Transactions on Affective Computing, 1-20 (2017)
- Benson, H., Beary, J.F., Carol, M.P.: The relaxation response. Psychiatry **37**(1), 37-46 (1974)
- Berger, H.: Zur Innervation der Pia mater und der GehirngefäÙe. Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten **70**(1), 216-220 (1924)
- Boutros, N.N.: What Constitutes a Normal EEG. In: Standard EEG: A Research Roadmap for Neuropsychiatry. pp. 15-20. Springer, (2013)
- Brainworks: LoRETA neurofeedback in clinic or at home. <http://www.brainworksneurotherapy.com/deep-brain-neurofeedback> (2017). Accessed 2017/10/20
- Cannon, W.B.: The James-Lange theory of emotions: A critical examination and an alternative theory. The American journal of psychology **39**(1/4), 106-124 (1927)
- Caycedo, A.: Sophrology and psychosomatic medicine. American Journal of Clinical Hypnosis **7**(2), 103-106 (1964)
- Chalvin, M.: Les phases du stress. In. Institut National de la recherche scientifique, (2010)
- Chaouachi, M., Jraidi, I., Frasson, C.: MENTOR: A Physiologically Controlled Tutoring System. In: International Conference on User Modeling, Adaptation, and Personalization 2015, pp. 56-67. Springer
- Christopher deCharms, R., Maeda, F., Glover, G.H., Ludlow, D., Pauly, J.M., Soneji, D., Gabrieli, J.D., Mackey, S.C.: Control over brain activation and pain learned by using real-time functional MRI. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **102**(51), 18626-18631 (2005)
- Co., N.T.: Neuroptimal Advanced Brain Training Systems. <https://neurofeedbacktraining.com/neurofeedback-home/> (2017). Accessed 2017/10/20

- Conn, C., Lanier, J., Minsky, M., Fisher, S., Druin, A.: Virtual environments and interactivity: Windows to the future. In: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 1989, vol. 5, pp. 7-18. ACM
- Crescentini, C., Chittaro, L., Capurso, V., Sioni, R., Fabbro, F.: Psychological and physiological responses to stressful situations in immersive virtual reality: Differences between users who practice mindfulness meditation and controls. *Computers in Human Behavior* **59**, 304-316 (2016)
- Crosstales: RT-Voice. <https://assetstore.unity.com/packages/tools/audio/rt-voice-48394> (2016). Accessed 2016/11/10
- Dhabhar, F.S.: Effects of stress on immune function: the good, the bad, and the beautiful. *Immunologic research* **58**(2-3), 193-210 (2014)
- Dupee, M., Werthner, P.: Managing the stress response: The use of biofeedback and neurofeedback with Olympic athletes. *Biofeedback* **39**(3), 92-94 (2011)
- Dyé, A.: *Sophrology. Becoming a self-confident musician*. University of Gothenburg (2014)
- Elliott, S.B.: *The new science of breath: Coherent breathing for autonomic nervous system balance, health and well-being*. Coherence Press, (2005)
- Engine, U.: Unreal Editor Interface. <https://docs.unrealengine.com/en-us/Engine/UI> (2017). Accessed 2017/10/10
- Golding, K., Kneebone, I., Fife-Schaw, C.: Self-help relaxation for post-stroke anxiety: A randomised, controlled pilot study. *Clinical Rehabilitation* **1**, 7 (2015)
- Google: Google Cardboard VR Headset. <https://vr.google.com/cardboard/> (2016).
- Gorini, A., Pallavicini, F., Algeri, D., Repetto, C., Gaggioli, A., Riva, G.: Virtual reality in the treatment of generalized anxiety disorders. *Stud Health Technol Inform* **154**, 39-43 (2010)
- Gorini, A., Riva, G.: The potential of Virtual Reality as anxiety management tool: a randomized controlled study in a sample of patients affected by Generalized Anxiety Disorder. *Trials* **9**(1), 25 (2008)
- Gromala, D., Tong, X., Choo, A., Karamnejad, M., Shaw, C.D.: The virtual meditative walk: virtual reality therapy for chronic pain management. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems 2015*, pp. 521-524. ACM

- Gruzelier, J.: A review of the impact of hypnosis, relaxation, guided imagery and individual differences on aspects of immunity and health. *Stress* **5**(2), 147-163 (2002)
- Heller, M.C.: *Body psychotherapy: History, concepts, and methods*. WW Norton & Company, (2012)
- HTC: HTC Vive VR Headset. <https://sa.pricena.com/en/product/htc-vive-price-in-saudi-arabia> (2017). Accessed 2017/10/09
- iMotions: Top 3 Devices for Monitoring and Measuring Brain Activity. <https://imotions.com/blog/top-3-devices-measuring-brain-activity/> (2015). Accessed 2017/10/20
- Jacenko, M.: principle of biofeedback. In: *biofeedback* (ed.). (2013)
- Jacobsen, E.: *Progressive relaxation*. Oxford, England: Univ. of Chicago Press, (1929)
- James, W.: What is an emotion? *Mind* **9**(34), 188-205 (1884)
- Kabat-Zinn, J.: An outpatient program in behavioral medicine for chronic pain patients based on the practice of mindfulness meditation: Theoretical considerations and preliminary results. *General hospital psychiatry* **4**(1), 33-47 (1982)
- Kamiya, J.: Operant control of the EEG alpha rhythm and some of its reported effects on consciousness. *Alerted states of consciousness* **489** (1969)
- Kolb, B., Whishaw, I.Q.: *Fundamentals of human neuropsychology*, 5th ed. Worth Publishers, (2003)
- Kosunen, I., Salminen, M., Järvelä, S., Ruonala, A., Ravaja, N., Jacucci, G.: *RelaWorld: Neuroadaptive and Immersive Virtual Reality Meditation System*. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces 2016*, pp. 208-217. ACM
- LeDoux, J.E.: Brain mechanisms of emotion and emotional learning. *Current opinion in neurobiology* **2**(2), 191-197 (1992)
- Lubar, J.F., Swartwood, M.O., Swartwood, J.N., O'Donnell, P.H.: Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in TOVA scores, behavioral ratings, and WISC-R performance. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* **20**(1), 83-99 (1995)
- MacLean, P.D.: Psychosomatic Disease and the "Visceral Brain": Recent Developments Bearing on the Papez Theory of Emotion. *Psychosomatic medicine* **11**(6), 338-353 (1949)

- Magic Leap. <https://www.magicleap.com/>. Accessed 2017/10/09
- Malmivuo, J., Plonsey, R.: Bioelectromagnetism. *Medical and Biological Engineering and Computing* **34**, 9-12 (1996)
- Manzoni, G.M., Pagnini, F., Castelnovo, G., Molinari, E.: Relaxation training for anxiety: a ten-years systematic review with meta-analysis. *BMC psychiatry* **8**(1), 41 (2008)
- McEwen, B.S., Eiland, L., Hunter, R.G., Miller, M.M.: Stress and anxiety: structural plasticity and epigenetic regulation as a consequence of stress. *Neuropharmacology* **62**(1), 3-12 (2012)
- Oculus: Oculus Rift. <https://www.amazon.es/Oculus-Rift-Next-generation-Virtual-importado/dp/B00VF0IXEY> (2016). Accessed 2017/10/09
- Oh, S.Y., Bailenson, J.: Virtual and Augmented Reality. In: Rossler, P. (ed.) *The International Encyclopedia of Media Effects*. pp. 1-16. John Wiley & Sons, Inc., (2017)
- Olds, J., Milner, P.: Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *Journal of comparative and physiological psychology* **47**(6), 419 (1954)
- Othmer, S., Kaiser, D.: Implementation of virtual reality in EEG biofeedback. *Cyberpsychology & Behavior* **3**(3), 415-420 (2000)
- Papez, J.W.: A proposed mechanism of emotion. *Archives of Neurology & Psychiatry* **38**(4), 725-743 (1937)
- Payen, D., Garanderie, A.: La sophrologie. In: Eyrolles, (2009)
- Perhakaran, G., Yusof, A.M., Rusli, M.E., Yusoff, M.Z.M., Mahalil, I., Zainuddin, A.R.R.: A Study of Meditation Effectiveness for Virtual Reality Based Stress Therapy Using EEG Measurement and Questionnaire Approaches. In: *Innovation in Medicine and Healthcare 2015*. pp. 365-373. Springer, (2016)
- Poulsen, M., Krøgholt, P.: Emotiv EPOC. The image show USB Dongle, electrodes and the EPOC headset. <http://alphatrainner.github.io/mscthesis/ch-background/index.html> (2013). Accessed 2017/10/20
- Prpa, M., Cochrane, K., Riecke, B.E.: Hacking Alternatives in 21st Century: Designing a Bio-Responsive Virtual Environment for Stress Reduction. In: *International Symposium on Pervasive Computing Paradigms for Mental Health 2015*, pp. 34-39. Springer

- Ratan, R., Hasler, B.S.: Exploring self-presence in collaborative virtual teams. *PsychNology Journal* **8**(1), 11-31 (2010)
- Richter, F.: The Diverse Potential of VR & AR Applications. <https://www.statista.com/chart/4602/virtual-and-augmented-reality-software-revenue/> (2016). Accessed 2017/11
- Roo, J.S., Gervais, R., Hachet, M.: Inner garden: An augmented sandbox designed for self-reflection. In: *Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction 2016*, pp. 570-576. ACM
- Samsung Gear VR4 vs Gear VR3. <http://www.soomal.com/pic/20100063620.show.htm> (2016). Accessed 2017/10/09
- Sapolsky, R.M.: Why stress is bad for your brain. *Science* **273**(5276), 749-751 (1996)
- Schultz, J.H.: Oberstufe des autogenen Trainings und Raya-Yoga. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie* **139**(1), 1-34 (1932)
- Selye, H.: *The stress of life*. McGraw-Hill Book Company, (1956)
- Slater, M., Wilbur, S.: A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual environments* **6**(6), 603-616 (1997)
- Sony: Playstation VR. https://secure.i.telegraph.co.uk/multimedia/archive/02856/morpheus_2856294k.jpg (2016). Accessed 2017/10/09
- Sophrology. <https://en.wikipedia.org/wiki/Sophrology>. Accessed 2017/05/07
- Serman, M., Wyrwicka, W., Roth, S.: Electrophysiological correlates and neural substrates of alimentary behavior in the cat. *Annals of the New York Academy of Sciences* **157**(1), 723-739 (1969)
- Sutherland, I.E.: The ultimate display. *Multimedia: From Wagner to virtual reality*, 506-508 (1965)
- Sutherland, I.E.: A head-mounted three dimensional display. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I 1968*, pp. 757-764. ACM

- Suzuki, M., Isonishi, S., Morimoto, O., Ogawa, M., Ochiai, K.: Effect of sophrology on perinatal stress monitored by biopyrrin. *Open Journal of Obstetrics and Gynecology*, 176-181 (2012)
- Technology, N.: Brainwave Monitoring Software Improves Distracted Mindst. https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/cg_2.html (2013). Accessed 2018/03/01
- Unity: Learning the interface. <https://docs.unity3d.com/Manual/LearningtheInterface.html> (2017). Accessed 2017/10/10
- Voronin, L., Sokolov, E.: Cortical mechanisms of the orienting reflex and its relation to the conditioned reflex. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* **12**, 335-346 (1960)
- Wiederhold, B.K.: The potential for virtual reality to improve health care. In. *The Virtual Reality Medical Center*, (2006)
- Zigmond, A.S., Snaith, R.P.: The hospital anxiety and depression scale. *Acta psychiatrica scandinavica* **67**(6), 361-370 (1983)

Annexe I : Consentement

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Titre de la recherche : Étude des réactions émotionnelles et cérébrales dans un environnement d'apprentissage. Brain based Tutoring Systems.

Chercheurs : *Guoxin Gu, étudiante MSc, DIRO, Université de Montréal*

Directeur du Laboratoire : *Claude Frasson, Professeur titulaire, DIRO, Université de Montréal*

A) RENSEIGNEMENTS AUX PARTICIPANTS

1. Objectifs de la recherche.

Ce projet de recherche vise à étudier les réactions émotionnelles et cérébrales dans un environnement d'apprentissage. Nous allons ainsi enregistrer l'activité cérébrale du participant au fur et à mesure qu'il est en train d'expérimenter notre système d'apprentissage RELAX.

2. Participation à la recherche

Votre participation à cette recherche consiste tout d'abord à remplir un questionnaire 'Échelle d'anxiété et de dépression hospitalière' (HADS). Ensuite, vous expérimentez un système d'apprentissage et faites les devoirs en remplissant une table chaque jour. Enfin, vous remplissez le questionnaire deux fois, à la quatrième séance de formation et à la fin. Ceci implique d'enregistrer votre activité cérébrale (EEG) et l'utilisation de la réalité virtuelle (VR). L'expérience se déroulera dans un local du département d'informatique de l'Université de Montréal et durera ~4h au total. (8 séances de formation, chaque séance de formation durera ~0.5h, 2 séances de formation chaque semaine) Vous bénéficierez d'un montant total de 80\$ après votre participation à cette expérience. (Par deux fois, 40\$ à la quatrième séance de formation et 40\$ à la fin)

3. Confidentialité

Les renseignements que vous nous donnerez demeureront confidentiels. Chaque participant de l'étude se verra attribuer un numéro d'identification. Aucune information permettant de vous identifier d'une façon ou d'une autre ne sera publiée. Ces données seront conservées durant sept ans, conformément à la politique habituelle de l'Université de Montréal. Après ce délai, elles seront totalement détruites.

4. Avantages et inconvénients

L'utilisation des capteurs physiologiques est indolore et sans risque. En participant à cette recherche, vous pourrez contribuer à l'avancement des connaissances sur l'apprentissage par les jeux et ses potentiels. Vous bénéficierez d'un montant total de 80\$ après votre participation à l'expérience.

5. Droit de retrait

Votre participation est entièrement volontaire. Vous êtes libre de vous retirer en tout temps par avis verbal, sans préjudice et sans devoir justifier votre décision. Si vous décidez de vous retirer de la recherche, vous pouvez communiquer avec l'assistant de recherche, au numéro de téléphone indiqué à la page suivante du formulaire. Si vous vous retirez de la recherche, les renseignements qui auront été recueillis seront détruits et vous n'aurez pas à rembourser le 80\$ reçu lors de votre participation à l'expérience.

B) CONSENTEMENT

Je déclare avoir pris connaissance des informations ci-dessus, avoir obtenu les réponses à mes questions sur ma participation à la recherche et comprendre le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de cette recherche.

Après réflexion et un délai raisonnable, je consens librement à prendre part à cette recherche. Je sais que je peux me retirer en tout temps sans préjudice et sans devoir justifier ma décision.

Signature : _____ Date : __ / __ / 2017

Nom : _____ Prénom : _____

Je déclare avoir expliqué le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de l'étude et avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature du chercheur : _____ Date : __ / __ / 2017
(ou de son représentant)

Nom : **Gu** Prénom : **Guoxin**

Pour toute question relative à la recherche, ou pour vous retirer de la recherche, vous pouvez communiquer avec Guoxin Gu au tel (514) 343-2498 ou à l'adresse courriel suivante : guoxin.gu@umontreal.ca.

Toute plainte relative à votre participation à cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal, au numéro de téléphone (514) 343-2100 ou à l'adresse courriel ombudsman@umontreal.ca. (L'ombudsman accepte les appels à frais virés).

Un exemplaire du formulaire de consentement signé doit être remis au participant

Annexe II : Échelle d'anxiété et de dépression en milieu hospitalier (EADH)

Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS)

Tick the box beside the reply that is closest to how you have been feeling in the past week.
Don't take too long over you replies: your immediate is best.

D	A		D	A	
		I feel tense or 'wound up':			I feel as if I am slowed down:
	3	Most of the time	3		Nearly all the time
	2	A lot of the time	2		Very often
	1	From time to time, occasionally	1		Sometimes
	0	Not at all	0		Not at all
		I still enjoy the things I used to enjoy:			I get a sort of frightened feeling like 'butterflies' in the stomach:
0		Definitely as much	0		Not at all
1		Not quite so much	1		Occasionally
2		Only a little	2		Quite Often
3		Hardly at all	3		Very Often
		I get a sort of frightened feeling as if something awful is about to happen:			I have lost interest in my appearance:
	3	Very definitely and quite badly	3		Definitely
	2	Yes, but not too badly	2		I don't take as much care as I should
	1	A little, but it doesn't worry me	1		I may not take quite as much care
	0	Not at all	0		I take just as much care as ever
		I can laugh and see the funny side of things:			I feel restless as I have to be on the move:
0		As much as I always could		3	Very much indeed
1		Not quite so much now		2	Quite a lot
2		Definitely not so much now		1	Not very much
3		Not at all		0	Not at all
		Worrying thoughts go through my mind:			I look forward with enjoyment to things:
	3	A great deal of the time	0		As much as I ever did
	2	A lot of the time	1		Rather less than I used to
	1	From time to time, but not too often	2		Definitely less than I used to
	0	Only occasionally	3		Hardly at all
		I feel cheerful:			I get sudden feelings of panic:
3		Not at all		3	Very often indeed
2		Not often		2	Quite often
1		Sometimes		1	Not very often
0		Most of the time		0	Not at all
		I can sit at ease and feel relaxed:			I can enjoy a good book or radio or TV program:
	0	Definitely	0		Often
	1	Usually	1		Sometimes
	2	Not Often	2		Not often
	3	Not at all	3		Very seldom

Please check you have answered all the questions

Scoring:

Total score: Depression (D) _____ Anxiety (A) _____

Annexe III : Article publié

Virtual Sophrologist: A Virtual Reality Neurofeedback Relaxation Training System

Guoxin Gu and Claude Frasson

- University of Montreal, Montreal QC H3T 1N8, Canada
- {guguoxin, frasson}@iro.umontreal.ca

Abstract. Relaxation techniques can relieve us from stress, anxiety, pain and maladies. Many researchers succeed in relaxing subjects by various methods. However, few concerned about the ability of relaxation. Hence, the main goal of this study is to help people relax faster. We developed a virtual reality neurofeedback relaxation training system, called Virtual Sophrologist, which 1) immerses users in fantastic environments by a Virtual Reality headset, 2) guides users to follow the Sophrology instructions by a female voice, and 3) displays feedback in real time, which are translated from the Meditation Score collected by EEG. To evaluate this system, we recruited 6 subjects to participate in our 8-session relaxation training and collected their subjective data (by self-report) and objective data (by EEG) to measure from psychological level and to calculate the Time Interval to Relaxation that they took to reach the maximum Meditation Score. The results show 1) decreases in Anxiety and Depression Score from the psychological level, 2) a decrease in Time Interval to Relaxation and 3) an increase in the maximum Meditation Score. Therefore, our system will be useful as a training tool for users who need or want to relax fast and deep whenever they need.

Keywords: Sophrology, Autogenic Training, Virtual Reality, Neurofeedback, EEG, EEG Biofeedback.

1 Introduction

Life is the progress of change. Any change contains the demand that we need to adapt to it. And how we manage to adapt to it depends on how we perceive the change. Hence, the effects of stress depend on whether we perceive the situation as being positive or negative [1]. We will embrace the change if the perception is positive. However, if the perception is negative, our bodies will automatically respond to this perceived threat. For instance, the heart rate and the blood pressure will increase, the perspiration will increase, and hands and feet will get cold, sometimes our hearing and vision will be acute. For a long time, stress will bring harmful biochemical effects, anxiety or depression [2].

Since stress, as a response to a threat, is predictable [3] but inevitable, we can take a better reaction (to relax) to the stress instead of being anxiety, which also is the goal of many studies [4]. For example, a group of Simon Fraser University designed a neurofeedback virtual environment (by a screen) to help people reduce the stress [5]. Perhakaran et al. proved that the meditation effectiveness by employing an upgraded Head Mounted Display (HMD), according to Virtual Reality Therapy (VRT), is better than that by using the imaginary technique [6]. Then a neurofeedback virtual reality meditation system provided a better result than a system of the screen, moreover, showed that neurofeedback can improve the feeling of presence [7].

However, most researchers focused on relaxing subjects rather than the subject's ability of relaxation such as the Time Interval to Relaxation (TItR), i.e. how long did it take the subject to reach a given level of relaxation. As we know, more time to practice a relaxation technique, better effect we can acquire [4]. Therefore, our motivation is to develop a system, Virtual Sophrologist, for helping people relax faster. We 1) combined the

advantages of previous studies, such as Virtual Reality (VR) and neurofeedback, 2) chose a popular and convincing relaxation technique (Sophrology), 3) followed subjects for 8 sessions in one month (twice per week), 4) collected their subjective data (by self-report) and objective data (by EEG) to calculate Anxiety Score, Depression Score and TItR for evaluating the effectiveness of this system. The results demonstrate that our system, Virtual Sophrologist, can help users' effort to relieve stress, anxiety, even pain and maladies.

2 Related Work

2.1 Autogenic Training and Sophrology

As early as 1932, the German psychiatrist Johann Heinrich Schultz proposed Autogenic Training (AT), a relaxation technique based on autohypnosis and yoga [8]. He presumed that the link mind-body is nonconscious but controllable and combined with some medical principles of his time, for instance 1) the *heavier* is related to a tendency to elongate of our extensor muscles and 2) the *warmth* results from a greater flow of blood. Both *heavier* and *warmth* are key components in AT.

Influenced by AT, Sophrology was introduced by Alfonso Caycedo in 1964 [9]. He named Sophrology from ancient Greek roots: "SOS" (safety, tranquility, security, serenity, harmony), "Phren" (mind, consciousness) and "Logos" (treatise, study). Thus Sophrology is a study of consciousness in harmony, unlike nonconscious mind-body in AT. Since then, Sophrology has been used widely in business, sport, schools, universities, relationships, hospitals and even childbirth. For example, in reducing perinatal stress, Sophrology works better than epidural anesthesia [10]. By repeating Sophrology Instructions, people generally experience more restful sleep, improved concentration, fewer worries, increased self-confidence [11] and a feeling of inner happiness, as Caycedo said: "Sophrology is learning to live" [12].

2.2 Virtual Reality

Since the introduction of VR in the 1960s, the dream of cyberspace is to give people the sensory experiences of a virtual space or environment. This dream has been vigorously pursued by the pioneers in the field and it is slowly but steadily realized. Although Ivan Sunderland built the first HMD system in 1968, VR became popular from 1989, in which year the term *virtual reality* was coined by Jaron Lanier. Then it took about three decades to bring affordable and portable VR headsets from the lab to the home, such as Samsung Gear, HTC Vive and Oculus Rift. Thanks to the advancement of the technology, the improvement of immersion yields a better sense of presence for users [13]. And both *immersion* and *presence* are two key concepts for the VR experience.

VR displays first met Medicine in 1993 by treating mental health disorders. Then VR was soon accepted widely by the medical community, because VR 1) enhances exposure therapy to treat clinical anxiety disorders, phobias, Post-Traumatic Stress Disorder, eating disorders and obesity, smoking and others, 2) enhances distraction therapy to reduce the pain of dental procedures, of chemotherapy-related side effects, of severe burns, in childbirth and so on, and 3) becomes a tool for diagnosing, medicine, physical and cognitive rehabilitation, surgical planning and performance, prevention of physical and emotional illness. In particular, in VR, we can simulate many situations that it is difficult to control in our real life without excessive cost, and treat patients in a manipulable way within a safe environment. Under these conditions, VR is considered as a promising tool which worth exploring numerous valuable healthcare applications for medical therapy, preventive medicine, surgical procedures, rehabilitation, medical education and training, and so forth [14].

2.3 EEG and Neurofeedback

In 1924, Hans Berger recorded the electric field of human brains and named it Electroencephalography (EEG). EEG measures spontaneous activities on the scalp or on the surface of the brain. Most EEG is noninvasive, placing the electrodes on the scalp by the internationally standardized 10-20 system. When measured on the scalp, the amplitude of EEG is about 100 μ V, while 1-2 mV on the surface of the brain [15]. The actual bandwidth of EEG is very wide extending from infralow frequencies of a fraction of an mHz to many many hundreds of Hz. The measurements for the very low and very high frequencies are difficult and often

contaminated with noise, so in most routine EEG applications the emphasis is placed on the more easily accessible range of 1 (or a few) to 48 Hz. Within this range different bands are believed to relate to specific mental operations with delta waves (0.5-4 Hz) encountered mainly in sleep and pathology, theta waves (4-8 Hz) associated with meditation and arousal, alpha waves (8-13 Hz) enhanced when a person is awake with eyes closed, beta waves (13-30 Hz) related to concentration, high alert and anxiety and finally, gamma waves (>30 Hz) related to cognition. During the past nine decades, EEG has been widely used in medical and research fields [16].

EEG has been used in a biofeedback system from the 1960s, namely EEG Biofeedback or Neurofeedback. A biofeedback loop includes 1) a precise instrument to measure physiological activity, 2) a processor to translate from physiological changes into feedback, and 3) a user to receive that information. Neurofeedback mostly uses EEG as the instrument and displays the feedback using video or sound. And Neurofeedback has been proved its successful effectiveness in various cases, such as a treatment for Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) [17], an improvement of learners' outcomes in an Intelligent Tutoring Systems (ITS) [18], etc.

3 Experiment

3.1 Virtual Sophrologist System

In order to help people to relax faster and deeper, we developed a new virtual reality neurofeedback relaxation training system, called Virtual Sophrologist, which consists of three key components: **VR environments**, **Sophrology instructions** and **EEG feedback**. Figure 1 shows how Virtual Sophrologist works: firstly, VR provides one of our three relaxing and comfortable environments to immerse the user. Then Sophrology instructions are displayed and spoken sentence by sentence in VR, meanwhile, according to the biofeedback loop, 1) EEG measures the brain activities of the user, 2) a processor translates the Meditation Score into a sentence following the decision rules, and 3) the user gets this feedback displayed in VR.

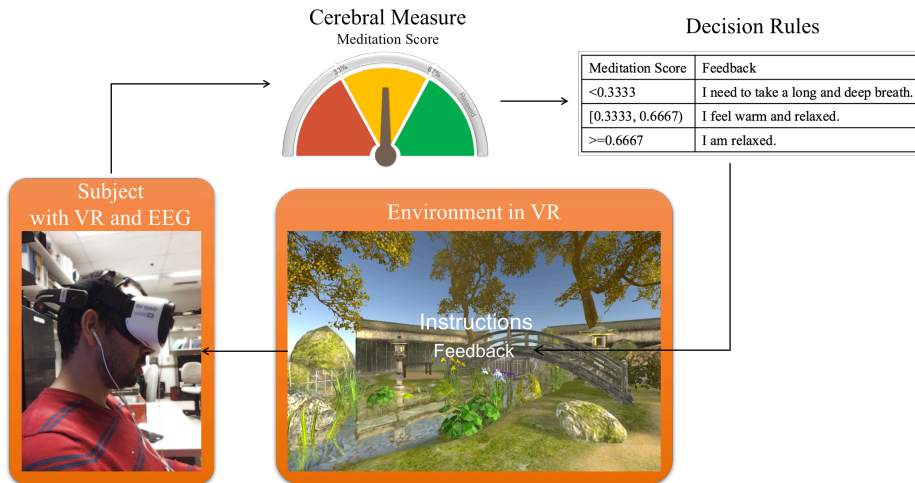


Fig. 1. Virtual Sophrologist System

VR Environments. There are three environments in Virtual Sophrologist for users to choose, including Seaside, Japanese Garden and Waterfall, see Figure 2. All environments are complete and allow users to turn heads for a favorite view. There is the sun in the sky of all environments because it is related to the *warmth* in Sophrology. Moreover, among three environments, there is a background sound (river sound) in the environment Japanese Garden, while no background sound in the other two environments, for more choices to users.

Sophrology Instructions. There are 93 Sophrology instructions in total in Virtual Sophrology, including 84 instructions to relax users and 9 instructions to wake users up slowly to complete the whole relaxation procedure. All instructions are displayed and spoken sentence by sentence every 10 seconds. Thus each session lasts about 15 minutes. Each instruction keeps short and in the first person, associated with the practice of the heaviness, the warmth, the heart beat, the breathing or the forehead, etc. For instance, “*I feel supremely calm*”, “*My right arm is getting limp and heavy*”.



Fig. 2. Three environments in Virtual Sophrologist

EEG Feedback. The Meditation Score is computed every 16.7 milliseconds (0.0167 second) from the EEG headset EMOTIV EPOC by its Software Development Kit (SDK). This Meditation Score is translated into one of three kinds of feedback by our decision rules. The range of the Meditation Score is from 0 to 1 (closer to 1, more relaxed subjects are). Nevertheless, it is too hard to reach over 0.8. Generally, the average of the Meditation Score is about 0.3-0.4, the maximum is about 0.6-0.7, according to the replies of the EPOC users [19]. Sometimes, the Meditation Score is limited by the device. For example, 1) once the quality of connection for even one sensor of the EPOC turned weak (red), the Meditation Score stays at 0.3333, 2) 0.6667 is the maximum Meditation Score of some devices, in other words, the Meditation Score never reach over 0.6667. However, this cannot stop the employment of the Meditation Score [20]. In view of these situations, we consider under 0.3333 (not included) as nervous, over 0.6667 (included) as relaxed, and between them (0.3333 included but 0.6667 not included) as natural, then give each state its corresponding feedback as shown in the decision rules in Figure 1.

3.2 Devices and Software

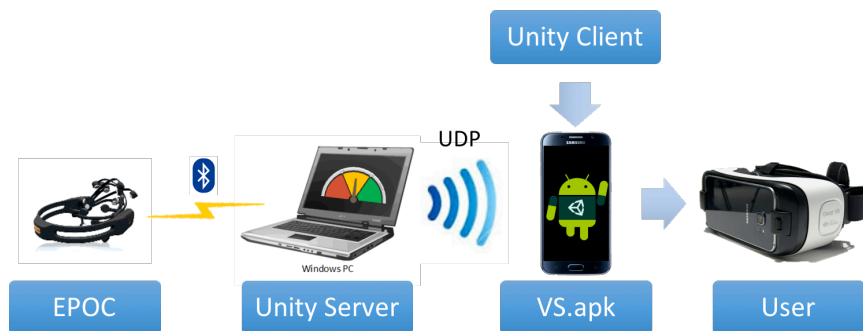


Fig. 3. Devices and software needed in Virtual Sophrologist System

We chose 1) the EMOTIV EPOC, which is a 14-channel EEG headset and employs the 10-20 system, as the cerebral measuring instrument, 2) a Windows computer to run a project Unity Server, which collects data from the EPOC, translates into the feedback as a processor, and sends the feedback 60 times per second by User Datagram Protocol (UDP) to the VR application, Virtual Sophrologist, built by the project Unity Client, 3) a Samsung Galaxy S6 and 4) a Samsung Gear VR to run Virtual Sophrologist, as shown in Figure 3.

3.3 Subject Criteria and Protocol

Six subjects (2 females, 4 males) were recruited to participate in our 8-session relaxation training and allowed to select only a favorite environment to enter during the whole 8 sessions. All of them met: 1) 18-40 years old

(Mean = 29.67, SD = 4.84, range from 25 to 37), 2) do not have attention deficit disorder, dyslexia, dyspraxia and so on, 3) have normal hearing, 4) never suffered a cranial trauma, 5) not taking any medications acting on the nervous system, 6) able to understand English (due to Virtual Sophrologist only support English up to now), and 7) willing to stay on and complete the 8-session, training twice a week for one month.

Thanks to their insistence, we obtained all 48 files of data, including the Meditation Score and all data from the 14 channels of EPOC (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, and AF4). In addition to these objective data, in order to collect the subjective data, 6 subjects were asked to fill a psychological questionnaire three times: before the first session, after the fourth session, and after the last/eighth session.

3.4 Evaluation

In order to measure the effectiveness of Virtual Sophrologist, we employed TItR and HADS Scores as metrics.

Time Interval to Relaxation. TItR is extracted from the log of the Meditation Score for each session of the subject. It is the total time in seconds when the subject reached relaxed (0.6667 of the Meditation Score, as I explained in Section 0) during one session. However, everyone has his own baseline. If the subject never reached 0.6667 of the Meditation Score, TItR is considered as the total time of reaching his maximum Meditation Score. The maximum TItR is 936 seconds. Because it takes 5 seconds to wait to enter the selected environment and 93 Sophrology instructions take 930 seconds, we count to 936 seconds. Accordingly, a decrease of the TItR in 8 sessions can indicate that Virtual Sophrologist helps subjects relax faster.

HADS Scores. The Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS) is a fourteen-item questionnaire devised by Zigmond and Snaith in 1983 [21]. It is so popular that it is cited by 25,551 papers in Google Scholar by April 2017. Some clinical research used it to evaluate until 2015 [22]. The simplicity and ease of use are the beauty of HADS. Seven of its fourteen items are related to anxiety, and the other seven related to depression. Each item is scored on a scale of 0-3, 3 indicates higher symptom frequencies. Both score for anxiety and score for depression range from 0 to 21 with scores categorized as follows: normal 0-7, mild 8-10, moderate 11-14, and severe 15-21. In this study, as I mentioned in Section 0, we collected three times for the HADS Anxiety Score (HADS-A) and the Depression Score (HADS-D) of subjects: before the training, at the 4th session, and at the final session respectively. Thus, the changes of HADS-A and HADS-D will indicate whether Virtual Sophrologist works from the psychological level.

4 Results and Discussion

Our results proved the positive effectiveness of Virtual Sophrologist on both the speed and the deepness of the relaxation with 1) a decrease of the TItR in the group that subjects can reach 0.6667 of the Meditation Score, 2) an increase of the maximum Meditation Score, and 3) the decreases of both HADS-A and HADS-D.

4.1 Time Interval to Relaxation

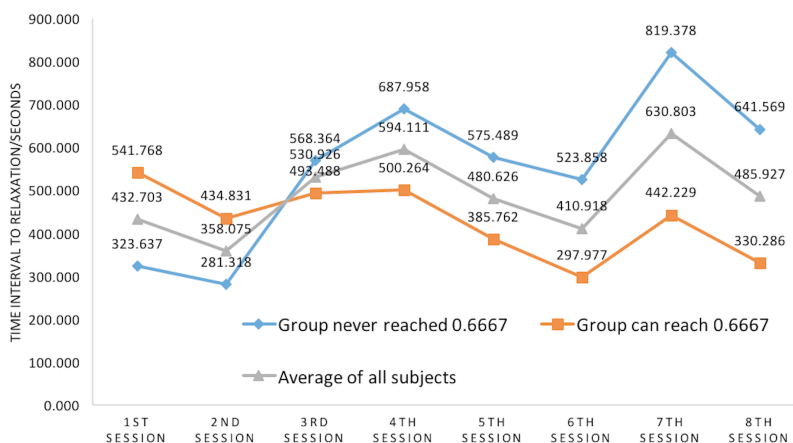


Fig. 4. TItR in 8 sessions

In Figure 4, although the tendency of the average TItR of all subjects is not clear, even negative, we found the positive result by dividing subjects into two groups. Because as I described in Section 0, we have two ways to calculate the TItR, which depends on whether the subject reached 0.6667 of Meditation Score. For three of our subjects, they reached 0.6667 in three sessions, six sessions, and all eight sessions respectively, named ‘Group can reach 0.6667’, and got a decrease of TItR from 541.768s (range from 227.274s to 913.595s) to 330.286s (range from 100.615s to 780.165s). While the other three, named ‘Group never reached 0.6667’, got an increase of TItR. We found one of the reasons for this “negative effectiveness” in the logs of Meditation Score: The TItR increased with an increase of the maximum Meditation Score. Another reason is the problem of the EEG headset: once one sensor’s connection quality turned weak, the Meditation Score goes 0.3333, which will make us miss the real maximum Meditation Score and result in the low TItR, like that in the first and the second sessions in Figure 4.

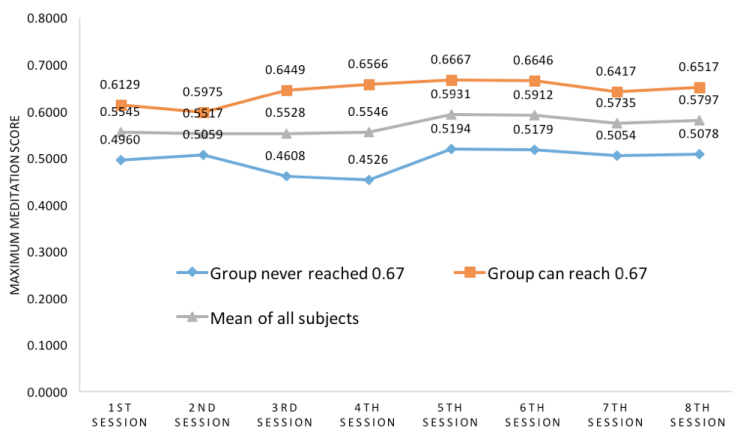


Fig. 5. Maximum Meditation Score in 8 sessions

Figure 5 indicates the positive tendency for the changes of the maximum Meditation Score, which is a little but reasonable, because as we know, the evident effect of any relaxation technique generally shows up with a long-term practice, at least three months by the suggestion [23].

4.2 HADS Scores

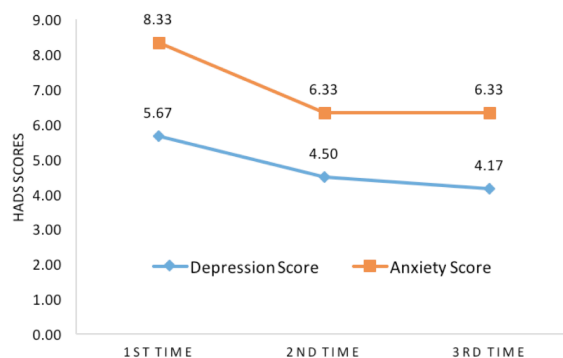


Fig. 6. The changes of HADS Scores

From the psychological view, the effectiveness is also proved positive. Both HADS-A and HADS-D decreased, as shown in Figure 6.

4.3 Discussion

Noticing at the range of HADS-A and HADS-D in Table 1, we need to admit one fact that it is impossible that Virtual Sophrologist is useful for everyone. As said in [8], “All psychotherapeutic methods are useful only to those who like them.”

Table 1. HADS Scores

	Anxiety Score			Depression Score		
	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range
1st time	8.33	3.08	3-11	5.67	3.39	2-10
2nd time	6.33	2.05	3-9	4.50	2.26	2-8
3rd time	6.33	3.08	3-11	4.17	3.06	2-9

However, one of our subjects who loves and benefits from Virtual Sophrologist never reached 0.6667 in 8 sessions. More specifically, he felt relaxed and even slept during experiments; his HADS-A decreased from 11 to 8, meanwhile, his HADS-D decreased from 9 to 6; after 8-session training, he employs Sophrology to fall asleep in 2-3 minutes every night, which is contrary to his sleeplessness before. The reasons why he never reached 0.6667 were discussed as follows: (1) He felt hurts sometimes wearing the EPOC and Samsung Gear VR at the same time; (2) Any little movement of his head every time when he was napping during experiments affects the Meditation Score; (3) Sometimes the movement of the head due to the breathing also affects the Meditation Score; (4) The unstable connection quality of the sensors on the EPOC makes the Meditation Score go 0.3333; (5) He was trying to translate the Sophrology instructions from English into his language; (6) He was thinking; (7) He was dreaming. Accordingly, to improve our system, we need (1) a new headset combining the EEG and VR; (2, 3) a filter to allow a little movement of the head; (4) to keep the connection quality stable; (5) to provide more choices in languages; (6) to record his concentration to remind him by feedback; (7) to process the theta waves, which is associated with dream sleep.

To conclude, Virtual Sophrologist was proved useful for training users to relax faster and deeper. This study addressed the lack of concerning about helping people relax fast. The combination of EEG and VR is promising and worth exploring numerous applications.

Acknowledgements

We acknowledge the financial support of National Science and Engineering Research Council (NSERC-CRD) and Beam Me Up Games for this project.

References

1. Selye, H.: The stress of life. (1956).
2. McEwen, B.S., Eiland, L., Hunter, R.G., Miller, M.M.: Stress and anxiety: structural plasticity and epigenetic regulation as a consequence of stress. *Neuropharmacology* **62**(1), 3-12 (2012).
3. Jraidi, I., Heraz, A., Chaouachi, M., Frasson, C.: New architecture of a multi agent system which measures the learner brainwaves to predict his stress level variation. In: Proceedings of the World Conference on 2009, pp. 2726-2733
4. Manzoni, G.M., Pagnini, F., Castelnuovo, G., Molinari, E.: Relaxation training for anxiety: a ten-years systematic review with meta-analysis. *BMC psychiatry* **8**(1), 41 (2008).
5. Prpa, M., Cochrane, K., Riecke, B.E.: Hacking Alternatives in 21st Century: Designing a Bio-Responsive Virtual Environment for Stress Reduction. In: International Symposium on Pervasive Computing Paradigms for Mental Health 2015, pp. 34-39. Springer
6. Perhakaran, G., Yusof, A.M., Rusli, M.E., Yusoff, M.Z.M., Mahalil, I., Zainuddin, A.R.R.: A Study of Meditation Effectiveness for Virtual Reality Based Stress Therapy Using EEG Measurement and Questionnaire Approaches. In: Innovation in Medicine and Healthcare 2015. pp. 365-373. Springer, (2016)
7. Kosunen, I., Salminen, M., Järvelä, S., Ruonala, A., Ravaja, N., Jacucci, G.: RelaWorld: Neuroadaptive and Immersive Virtual Reality Meditation System. In: Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces 2016, pp. 208-217. ACM
8. Heller, M.C.: Body psychotherapy: History, concepts, and methods. WW Norton & Company, (2012)
9. Caycedo, A.: Sophrology and psychosomatic medicine. *American Journal of Clinical Hypnosis* **7**(2), 103-106 (1964).
10. Suzuki, M., Isonishi, S., Morimoto, O., Ogawa, M., Ochiai, K.: Effect of sophrology on perinatal stress monitored by biopyrrin. (2012).
11. Dyé, A.: Sophrology. (2015).
12. Sophrology. <https://en.wikipedia.org/wiki/Sophrology>. Accessed 2017/05/07
13. Oh, S.Y., Bailenson, J.: Virtual and Augmented Reality. *The International Encyclopedia of Media Effects* (2017).
14. Wiederhold, B.K.: The potential for virtual reality to improve health care. *The Virtual Reality Medical Center* (2006).
15. Malmivuo, J., Plonsey, R.: Bioelectromagnetism. *MEDICAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING AND COMPUTING* **34**, 9-12 (1996).
16. EEG. <https://en.wikipedia.org/wiki/Electroencephalography>. Accessed 2017/05/09
17. Lubar, J.F., Swartwood, M.O., Swartwood, J.N., O'Donnell, P.H.: Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in TOVA scores, behavioral ratings, and WISC-R performance. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* **20**(1), 83-99 (1995).
18. Chaouachi, M., Jraidi, I., Frasson, C.: MENTOR: A Physiologically Controlled Tutoring System. In: International Conference on User Modeling, Adaptation, and Personalization 2015, pp. 56-67. Springer
19. Emotiv Forum: Meditation Score. https://www.emotiv.com/forums/topic/Meditation_Score/. Accessed 2017/01/20
20. Roo, J.S., Gervais, R., Hachet, M.: Inner garden: An augmented sandbox designed for self-reflection. In: Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction 2016, pp. 570-576. ACM
21. Zigmond, A.S., Snaith, R.P.: The hospital anxiety and depression scale. *Acta psychiatrica scandinavica* **67**(6), 361-370 (1983).
22. Golding, K., Kneebone, I., Fife-Schaw, C.: Self-help relaxation for post-stroke anxiety: A randomised, controlled pilot study. *Clinical Rehabilitation* **1**, 7 (2015).
23. Autogenics Training. <http://www.guidetopsychology.com/autogen.htm>. Accessed 2016/09/16