



Développement d'un serious game portant sur l'activité physique et les fonctions exécutives pour l'évaluation et la stimulation des patients présentant une maladie d'Alzheimer ou une pathologie associée

Grégory Ben-Sadoun

► To cite this version:

Grégory Ben-Sadoun. Développement d'un serious game portant sur l'activité physique et les fonctions exécutives pour l'évaluation et la stimulation des patients présentant une maladie d'Alzheimer ou une pathologie associée. Education. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019), 2016. Français. NNT : 2016AZUR4073 . tel-01445048

HAL Id: tel-01445048

<https://theses.hal.science/tel-01445048>

Submitted on 24 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Développement d'un serious game portant sur
l'activité physique et les fonctions exécutives pour
l'évaluation et la stimulation des patients présentant
une maladie d'Alzheimer ou une pathologie associée**

These présentée par Grégory BEN-SADOUN

Pour obtenir le grade de Docteur en Sciences du Mouvement Humain

Soutenue publiquement le 11 octobre 2016

Commission d'examen :

Philippe ROBERT	Pr. Université de Nice Sophia Antipolis	Directeur
François BREMOND	HDR, INRIA Sophia Antipolis	Co directeur
Anne Sophie RIGAUD-MONNET	Pr. Université de Paris Descartes	Rapporteur
Michel AUDIFFREN	Pr. Université de Poitiers	Rapporteur
Jeanick BRISSWALTER	Pr. Université de Nice Sophia Antipolis	Jury
Karen DAVRANCHE	PhD. CNRS / Aix-Marseille Université	Jury
Alain PESCE	Pr. Centre Hospitalier de Monaco	Jury

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à l'ensemble de l'équipe du CMRR¹ de Nice (sans exception, mais si je cite tous les noms, j'ai peur d'en oublier☺). J'ai bénéficié d'une atmosphère où à la fois le professionnalisme et l'ambiance familiale cohabitent à la perfection. Ce dynamisme est dû aux personnes qui y travaillent, à leur sympathie, leur esprit de coopération et leur jovialité.

Je remercie tout de même plus particulièrement mes proches compatriotes de travail, avec qui j'ai partagé beaucoup : bureaux, joies, réflexions scientifiques, nourritures, nuits blanches, mitochondries, etc.

Alexandre Derreumaux (l'indispensable), c'est clairement la personne avec qui j'ai passé le plus de temps, intra-extra-travail.

Emmanuelle Chapoulie (la noctambule), nous avons conçu au sein du laboratoire le concept de nuit blanche pour tenir les dates limites sur nos projets respectifs.

David Bensamoun (mon cousin), qui m'a aidé dans les expérimentations du projet et avec qui j'ai beaucoup échangé sur les concepts de sciences, médecines, et pseudosciences.

Elsa Leone (wikizheimer), ses travaux sur la maladie d'Alzheimer m'ont été d'une aide précieuse.

Françoise Pasturaud (la sauveuse), qui m'a aidé sur le plan logistique et qui s'est battue de façon à ce que mes frais de déplacements et mes salaires me soient parvenus conformément à la loi.

¹ CMRR : Centre de Mémoire de Ressources et de Recherche

Jeremy Bourgeois (mon maître), qui m'a énormément aidé sur les aspects scientifiques, méthodologiques et la rédaction des articles. Il est d'une précision et d'une rigueur que je trouve impressionnante.

Guillaume Sacco (mon coéquipier), nous avons travaillé en binôme pendant 2 ans sur les différentes expérimentations du projet Az@game². Sa capacité de travail est hors normes et je pense (du moins je l'espère) qu'il finira directeur de laboratoire en science et santé du fait de son approche très rigoureuse sur le plan médical et scientifique.

Pierre David Petit (le gentleman), qui m'a beaucoup aidé au début de ma thèse, notamment dans la rédaction du premier article.

Valeria Manera (mon guide), une aide indispensable concernant la partie rédaction d'article. J'ai beaucoup appris de son expertise scientifique et de sa compréhension du système scientifique.

Je voudrais également remercier les organismes (du moins les personnes avec qui j'ai pu travailler durant ces quatre années), notamment les partenaires du projet : le groupe Genious (concepteurs des jeux), l'IDATE³, l'INRIA⁴ (particulièrement Baptiste Fosty et François Bremond) et le CIU Santé⁵ (nous avons partagé pendant 2 ans des bureaux, une équipe au dynamisme similaire à celui du CMRR).

Je voudrais également remercier certains membres du STAPS⁶ de Nice, lesquels m'ont aidé à la fois pour mon doctorat mais aussi pour mon parcours professionnel. Fabienne D'Arripe-Longueville et Serge Colson, qui m'ont apporté une expertise scientifique et une aide dans la rédaction des articles comme si j'étais l'un de leurs doctorants. Luc Farout, le

² Az@Game : Alzheimer and Associated Pathologies Game for Autonomy Maintenance Evaluation

³ IDATE : L'institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe

⁴ INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

⁵ CIU Santé : Centre d'innovation et d'Usages en Santé

⁶ STAPS : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

responsable des enseignements, pour sa confiance dans mes suggestions concernant les enseignements que j'ai pu donner. Enfin, Jeanick Brisswalter, que je connaissais déjà de mon parcours STAPS à Toulon. Comme Fabienne et Serge, il m'a beaucoup aidé pendant ces quatre années. De plus, je le remercie pour avoir répondu à plus d'une centaine de questions sur le plan scientifique, envoyées durant ces quatre années. Il fait partie des quelques personnes qui m'ont donné envie de faire de la recherche depuis mon arrivée à l'université.

Je remercie les participants / volontaires aux études scientifiques, plus particulièrement à ceux (et leur entourage proche) qui ont participé à l'étude longitudinale. Dans ce contexte et ce type d'étude, de réelles amitiés sont nées et perdurent.

Un dernier petit remerciement pour mon oncle, qui porte bien son prénom, Sauveur. Il m'a appris durant ces dernières années à être débrouillard (travaux d'intérieurs, mécanique). Grâce à lui, j'ai pu m'installer à Nice et ne pas paniquer face aux moindres pépins dans l'appartement. J'ai pu aussi réparer ma propre voiture, ce qui m'a permis de mener à bien l'étude longitudinale, où j'ai dû (avec plaisir toutefois) amener et ramener les $\frac{3}{4}$ des participants durant toute la durée du protocole.

Enfin, le meilleur pour la fin, je remercie mon directeur de thèse, mon patron, le professeur Philippe ROBERT pour ... tout. J'ai apprécié ses conseils, notamment dans le domaine médical et son aide en tant que directeur. Plus important pour moi, je le remercie pour l'homme qu'il est, fédérateur, toujours de bonne humeur, à l'écoute de son entourage professionnel, reconnaissant. Il est l'âme du centre mémoire que j'ai décrite en début de remerciements. Personnellement, je trouve qu'il est le meilleur médicament pour la joie de vivre et la lutte contre la dépression.

Sommaire

Remerciements	1
Liste des Publications	8
Liste des Figures.....	10
Liste des Tableaux	11
Liste des abréviations	12
Introduction	15
Contexte d'étude	15
Problématique de la thèse et implications professionnelles	17
Problématique de la thèse et implications personnelles	18
Originalité du travail de thèse au regard de la littérature	20
Plan de la thèse	20
Partie 1 : Cadre théorique	22
Chapitre 1 : Approche physiologique, cognitive et comportementale du vieillissement et de la Maladie d'Alzheimer	22
1 Le vieillissement.....	22
2 Les Maladies Neurodégénératives.....	23
3 La Maladie d'Alzheimer.....	23
4 Cognitions, vieillissement et Maladie d'Alzheimer	25
4.1 Les Mémoires	25
4.2 Fonctions instrumentales	27
4.3 Fonctions exécutives	27
4.4 Fonctions attentionnelles.....	29
Chapitre 2 : la prise en charge non-médicamenteuse du vieillissement et de la Maladie d'Alzheimer.....	32
1 Retarder le déclin cognitif par la prise en charge non-médicamenteuse	32
2 Hypothèse métabolique	33
2.1 Présentation de l'hypothèse et son évolution	33
2.2 Considérations physiologiques liées à l'intensité d'une Activité Physique Régulière de type Aérobie	38
2.3 Activité physique régulière aérobie chez les rongeurs	40
2.3.1 Intensité d'exercice.....	40
2.3.2 Activité physique régulière aérobie et fonctions mitochondriales	41
2.3.3 Activité physique régulière aérobie et neuroplasticité.....	42
2.3.4 Activité physique régulière aérobie et marqueurs de la Maladie d'Alzheimer	43
2.3.5 Activité physique régulière aérobie et réponse immunitaire	44

2.3.6	Activité physique régulière aérobie et effets de la composante anaérobie liée à l'exercice	45
2.4	Activité physique régulière aérobie chez le sujet âgé et présentant une Maladie Neurodégénérative.....	45
3	L'hypothèse de l'enrichissement cognitif.....	49
3.1	Présentation de l'hypothèse.....	49
3.2	Les comportements d'enrichissement	50
3.3	Vers une stratégie optimale et multimodale : l'Environnement Enrichi	52
3.3.1	Approche générale de l'Environnement Enrichi chez l'animal.....	52
3.3.2	Environnement Enrichi limitant l'impact de l'activité physique aérobie : quelques données chez l'animal	53
3.3.3	Environnement Enrichi chez le sujet âgé et présentant un MCI ou une MA.....	55
3.3.4	Résumé des effets globaux de l'Environnement Enrichi intégrant l'activité physique de type aérobie.....	56
4	Limites d'application de l'Activité Physique Régulière de type Aérobie et l'Environnement Enrichi chez les sujets âgés et présentant un diagnostic de troubles cognitifs légers ou une Maladie d'Alzheimer.....	57
5	Les Jeux Vidéo comme modèle d'Environnement Enrichi chez l'homme	58
Chapitre 3 : Concevoir et tester un Serious Game.....		62
1	Petite histoire des Serious Games et domaines d'application	62
2	Qu'est ce qu'un Serious Game ?	63
3	Comment concevoir un Serious Game ?	65
3.1	Principes de base	65
3.2	Définir le gameplay	66
3.3	Définir des critères ergonomiques.....	69
3.4	Identifier les attitudes des usagers envers le SG.....	70
4	Conclusion sur la conception d'un Serious Game.....	75
Partie 2. X-Torp.....		76
Chapitre 4 : Gamedesign d'X-Torp Version 1		76
1	Méthode de conception d'X-Torp Version 1.....	76
2	Populations cibles.....	77
3	Quelques considérations sur l'usage des jeux vidéo chez ces populations cibles	78
4	Le Gameplay d'X-Torp – Mode Scénario.....	80
4.1	Typologie d'X-Torp	80
4.2	Règles du jeu	81
4.3	Les commandes de jeu.....	83
4.4	Structures temporelles, spatiales et dramatiques	85

5	Le Gameplay d’X-Torp – Mode Thérapeute	90
6	Choix ergonomiques propres aux populations cibles	93
7	L’assistance	93
Chapitre 5 : Utilisabilité d’X-Torp Version 1.....		95
Expérimentation : Stimulation physique et cognitive à travers un exergame chez les sujets présentant un vieillissement normal, des troubles cognitifs légers et modérés.....		
1	Introduction	95
2	Méthodes	100
2.1	Participants	100
2.2	Matériels	101
2.3	Le SeG X-Torp	101
2.4	Procédure.....	102
2.4.1	Evaluations cliniques.....	103
2.4.2	Evaluation de la condition physique et des fonctions cognitives avant et après l’entraînement au jeu	103
2.4.3	Sessions d’entraînement sur X-Torp	104
2.5	Données analysées.....	105
2.6	Analyse statistique.....	109
3	Résultats	110
3.1	Evaluations cliniques.....	110
3.2	Utilisabilité durant l’entraînement au Mode Scénario d’X-Torp	110
3.2.1	Temps de jeu et performances au jeu	110
3.2.2	Le niveau d’intensité aérobie atteint.....	111
3.2.3	Emotions et utilisabilité perçues.....	112
3.3	Effets d’entraînement du Mode Scénario d’X-Torp.....	113
4	Discussion	114
5	Remerciements	121
Chapitre 6 : Gamedesign d’X-Torp Version 2		130
1	Méthode de conception d’X-Torp Version 2.....	130
2	Evolution du Mode Scénario	130
3	Evolution des règles	131
4	Evolution des structures temporelles, spatiales et dramatiques.....	131
5	Evolution des critères d’ergonomie.....	135
5.1	Guidage	135
5.2	Signification des codes et dénominations	135
6	Menu et interface 2 Dimensions.....	137

Partie 3 : Proposition d'alternative pour les modes de commandes avec la Kinect™	140
Chapitre 7 : Présentation d'une perspective d'intégration d'une activité physique de type aérobic accrue à X-Torp.....	140
Précision et reproductibilité pour la mesure de la vitesse de marche sur tapis de marche avec une camera RGB-D.....	141
1 Introduction	141
2 Méthode.....	143
2.1 Sujets	143
2.2 Matériels	144
2.3 Procédure.....	144
2.4 System étalon basé sur une marque (Marker Based Control System (MBCS)	145
2.5 Point Cloud Based System (PCBS).....	145
2.5.1 Détection et suivi d'une personne	145
2.5.2 Détection du sol.....	146
2.5.3 Détection des pieds.....	146
2.5.4 Calcul de la vitesse	146
2.6 Analyse statistique des données	147
3 Résultats	148
3.1 Précision	148
3.2 Reproductibilité	149
4 Discussion	149
4.1 Précision	149
4.2 Reproductibilité	150
5 Conclusion.....	151
6 Données non publiées concernant ces systèmes.....	158
Discussion générale, conclusion et perspectives.....	160
Références	166

Liste des Publications

Publications

- Ben-Sadoun, G., Petit, P.D., Colson, S.S., König, A., Robert, P. (2015). Activité aérobie et environnement enrichi : perspectives pour le patient Alzheimer. *Science & Sports*, 30,1-12.
- Fosty, B., Ben-Sadoun, G., Sacco, G., König, A., Manera, V., Foulon, P., Brisswalter, J., Robert, P.H., Bremond, F. (2016). Accuracy and reliability of the RGB-D camera for measuring walking speed on a treadmill. *Gait & Posture*, 48, 113- 119.
- Ben-Sadoun, G., Sacco, G., Manera, V., Bourgeois, J., König, A., Foulon, P., Fosty, B., Bremond, F., d'Arripe-Longueville, F., Robert, P.H. (2016). Physical and cognitive stimulation using an exergame in subjects with normal aging, mild and moderate cognitive impairment. *Journal of Alzheimer's Disease: JAD*, 53(4), 1299-1314.

Communications Orales

- Robert, P., Petit, P.D., Ben-Sadoun, G., König A., Bremond, F. (2013). Apport des nouvelles technologies pour l'évaluation et la prise en charge de la maladie Alzheimer. 41^e Entretien de Médecine Physique et de Réadaptation –EMPR (4 avril 2013), Montpellier, France.
- Ben-Sadoun, G. (2013) Serious Game et fragilité. 1er Congrès Francophone Fragilité des Personnes Agées (17-18 avril 2013), Toulouse, France.
- Bertholier, L., Foulon, P., Robert, P., Ben-Sadoun, G. (2013) Az@GAME : Serious Games et maladie d'Alzheimer. Segamed (12-13 septembre 2013), Nice, France.
- Ben-Sadoun, G., Petit, P.D., Colson, S.S., König, A., Robert, P. (2014). Activité aérobie et enrichissement cognitif chez les patients Alzheimer : place des exergames. 5^{ème} Congrès International de la SFPS (12-14 mai 2014), Nice, France.
- Sacco, G., Ben-Sadoun, G., Piano, J., Foulon, P., Robert, P. (2014). Utilisabilité des jeux vidéo sérieux avec activités physiques et cognitives dans le vieillissement normal, la maladie d'Alzheimer et les pathologies apparentées. 12^{ème} Réunion Francophone sur la Maladie d'Alzheimer et les Syndromes Apparentés (11-13 juin 2014), Montpellier, France.
- Sacco, G., Ben-Sadoun, G., Piano, J., Foulon, P., Robert, P. (2014). AZ@GAME: Alzheimer and Associated pathologies Game for Autonomy Maintenance Evaluation. *Gerontechnology*, 13, 275.
- Ben-Sadoun, G. (2014) Jouer, rire, vieillir. Séminaire vieillissement et activité physique UFR STAPS (4 décembre 2014), Nice, France.
- Ben-Sadoun, G. (2015) Ma thèse en 180 secondes. Séminaire des doctorants du laboratoire CoBTek (19 février 2015), Nice, France.
- Ben-Sadoun, G. (2016) Ma thèse en 180 secondes. Séminaire des doctorants du laboratoire CoBTek (17 mars 2016), Nice, France.

Participations à des congrès

- Genious (2013). Serious games & Alzheimer's disease. Assessment measure, physical and cognitive training. *Neuroconnection* (1-2 Juillet 2013), Marseille, France.
- Genious. (2014). X-Torp. Health Innovative Days (12 juin 2014), Paris, France.
- Genious, IDATE, INRIA, CoBTek. (2014) Az@game, Dispositif visant à évaluer et à favoriser le maintien de l'autonomie dans la maladie d'Alzheimer et les pathologies assimilées. Forum Innovation Santé Autonomie (15-16 décembre 2014), Paris, France.

Communications Affichées

- Ben-Sadoun, G., Sacco, G., Piano, J., Foulon, P., Robert, P. (2014). Utilisabilité des jeux vidéo sérieux avec activités physiques et cognitives dans le vieillissement normal, la maladie d'Alzheimer et les pathologies apparentées. 10ème Journée de l'École Doctorale en Sciences du Mouvement Humain (6 juin 2014), Montpellier, France.
- Sacco, G., Ben-Sadoun, G., Piano, J., Foulon, P., Robert, P. (2014). Utilisabilité des jeux vidéo sérieux avec activités physiques et cognitives dans le vieillissement normal, la maladie d'Alzheimer et les pathologies apparentées. 12ème Réunion Francophone sur la Maladie d'Alzheimer et les Syndromes Apparentés (11-13 juin 2014), Montpellier, France.
- Sacco, G., Ben-Sadoun, G., Piano, J., Foulon, P., Robert, P. (2014). AZ@GAME: Alzheimer and Associated pathologies Game for Autonomy Maintenance Evaluation. Congrès International en Gérontechnologie (20 juin 2014), Taïwan.
- Sacco, G., Ben-sadoun, G., Bensamoun, D., Robert, P. (2015) Trail Making Test informatisé : fidèle à la version papier chez les patients MCI. 11ème Journée de l'École Doctorale en Sciences du Mouvement Humain (29 mai 2015), Nice, France.

Liste des Figures

- Figure 1 : Schématisation du clivage de la protéine précurseur de l'amyloïde (β APP) et influence des mitochondries.
- Figure 2 : Illustration de l'hypothèse de l'enrichissement cognitif.
- Figure 3 : Approche globale des effets de l'EE incluant l'APRA.
- Figure 4 : Modélisations de la relation entre l'humain et la technologie.
- Figure 5 : X-Torp V1.
- Figure 6 : Les commandes d'X-Torp relatives aux actions dans l'environnement virtuel.
- Figure 7 : Menu d'X-Torp.
- Figure 8 : Carte du monde d'X-Torp V1.
- Figure 9 : Environnement virtuel d'X-Torp et description de l'interface de jeu.
- Figure 10 : Exemple d'une mission d'X-Torp.
- Figure 11 : Interface du mode thérapeute d'X-Torp.
- Figure 12 : Exemples de tests du MT d'X-Torp.
- Figure 13 : Carte et interface de X-Torp V2.
- Figure 14 : Phases de combat de X-Torp V2.
- Figure 15 : Architecture des PCBS et MBCS.
- Figure 16 : Filtre du nuage de points du PCBS.
- Figure 17 : Représentation graphique de la marche en fonction du temps.
- Figure 18 : Association du PCBS pour la vitesse de marche avec la reconnaissance des mouvements des membres inférieurs.

Liste des Tableaux

- Tableau 1 : Récapitulatif des études portant sur l'APRA dans le cadre du traitement de la MA.
- Tableau 2 : Récapitulatif des études portant sur l'APRA dans le cadre des exergames.
- Tableau 3: Modèle des briques de gameplay.
- Tableau 4 : Résumé des entraînements sur X-Torp.
- Tableau 5 : Questionnaire d'utilisabilité perçue.
- Tableau 6 : ANOVAs F et p.
- Tableau 7 : Caractéristiques et comparaisons entre les groupe MN et AC.
- Tableau 8 : Temps et performances au MS d'X-Torp.
- Tableau 9 : Résultats des groupes MN et AC sur la stimulation aérobie, le PANAS, l'utilisabilité perçue durant la période d'apprentissage (Semaines 2-3) et la période d'optimisation (Semaines 4-5).
- Tableau 10 : Résultats des groupes MN et AC sur les performances physiques et cognitives avant (pré-entraînement) et après (post-entraînement) le programme d'entraînement.
- Tableau 11 : Précision de mesure des vitesses avec les PCBS et MBCS.
- Tableau 12 : Reproductibilité des vitesses mesurées avec les PCBS et MBCS.

Liste des abréviations

- 10MeWT : 10-Meter Walk Test
- 2D / 3D : 2 Dimensions – 3 Dimensions
- 6MiWT : 6 Minutes Walking Test
- AC : Agés Contrôles
- ACIF : Acute Care Index of Function
- ADL : Activity of Daily living
- ADN : Acide DésoxyriboNucléique
- AI : Apathy Inventory
- AICD : APP Intra Cellular Domain
- Akt : Protein Kinase B
- APRA : Activité Physique Régulière de type Aérobie
- ATP : Adénosine Triphosphate
- Az@Game : Alzheimer and Associated Pathologies Game for Autonomy Maintenance Evaluation
- A β : Amyloïde Béta
- BACE 1 : Beta-site APP Cleaving Enzyme 1
- Bcl-2 : B-cell lymphoma 2
- BDNF : Brain Derived Neurotrophique Factor
- CaMK II : Ca²⁺/calmodulin-dependent protein kinase II
- CDR : Clinical Dementia Rating
- CIM : Classification Internationale des Maladies
- CIU Santé : Centre d'innovation et d'Usages en Santé
- cm : centimètre
- CMRR : Centre de Mémoire de Ressources et de Recherche
- CNC : Centre National du Cinéma et de l'Image Animée
- CO₂ : Dioxyde de Carbone
- CoBTek : Cognition - Behaviour - Technology
- Cox-2 : Cyclo-oxygénase-2
- CREB : C-AMP Response Elementbinding protein
- CT : Cancellation Test
- CV : Coefficient de Variation
- DE : Dépense Energétique
- DMS 48 : Delayed Matching to Sample 48
- DSST : Digit Symbol Substitution
- E : Entrainement
- EE : Environnement Enrichi
- ERFC : Évaluation Rapide des Fonctions Cognitives
- ERK : Extracellular signal-Regulated Kinases
- ERO : Espèces Réactives de l'Oxygène
- ET : Ecart Type
- FAB : Frontal Assessment Battery
- FC : Fréquence Cardiaque

- FC^{peak} : Fréquence cardiaque maximale relative à un test d'effort
- FCr : Fréquence Cardiaque de réserve
- FCr^{peak} : Fréquence cardiaque de réserve maximale relative à un test d'effort
- GNGRTT : Go Non-Go Reaction Time Test
- GPX-1 : glutathion peroxydase 1
- GSK-3 : Glycogen Synthase Kinase 3
- H^+ : ion Hydrogène
- HAROLD : Hemispheric Asymmetry Reduction in Older adults
- HSP 70 : Heat Shock Proteins 70
- ICC : Intraclass Coefficient Correlation
- IDATE : L'institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe
- IFN- γ : Interférons gamma
- IGF1 : Insulin-like Growth Factor 1
- IL-1 β : Interleukin-1 beta
- IMC : Indice de Masse Corporelle
- INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
- JNK : C-Jun_N-terminal_Kinases
- JV : Jeux Vidéo
- kg : kilogramme
- $km.h^{-1}$: kilomètre par heure
- LOA : Limit Of Agreement
- $m.s^{-1}$: mètre par seconde
- MA : Maladie d'Alzheimer
- MAPK : Mitogen-Activated Protein Kinase
- $max\%FCr^{peak}$: niveau d'intensité aérobie maximal exprimé en termes de pourcentage de la FCr relative au peak de la FC mesurée lors du 6MiWT
- MBCS : Marker Based Control System
- MCI : Mild Cognitive Impairment
- MCT : Monocarboxylate transporter isoforms
- MD : Minimum Difference
- MET : Metabolic Equivalent of Task
- MHC II : Major Histocompatibility Complex II
- MIP-1 α : Macrophage Inflammatory Proteins 1-alpha
- MMORPG : Massively Multiplayer Online Role Playing Games
- MMSE : Mini Mental State Examination
- MN : Maladie Neurodégénérative
- moy : moyenne
- $moy\%FCr^{peak}$: niveau d'intensité aérobie moyen exprimé en termes de pourcentage de la FCr relative au peak de la FC mesurée lors du 6MiWT
- MS : Mode Scénario
- MT : Mode Thérapeute
- NGF : Nerve Growth Factor
- NMDA : N-Methyl-D-Aspartate
- NPI : Neuropsychologique Inventory

- NT 3/4: NeuroTrophine 3/4
- nTIC : nouvelle Technologie de l'Information et de la Communication
- O₂ : Dioxygène
- PANAS : Positive Affect Negative Affect Scale
- PCBS : Point Cloud Based System
- PGC-1 α : Peroxisome Proliferator Activated Receptor- γ Coactivator 1alpha
- pH : potentiel Hydrogène
- PI3K : Phosphoinositide 3-Kinase Inhibitor
- PKA : Protéine Kinase A
- QIDS : Quick inventory of depressive symptoms
- RAM : Random Access Memory
- RBANS : The Repeatable Battery for Assessment of Neurocognitive Status
- RGB-D : Red Green Blue + Depth
- RPE scale : Rating of Perceived Exertion scale
- RPG : Role Play Game
- S : Semaine
- SAS : Système Attentionnel Superviseur
- Scat : Seuil Catécholamine
- SCB : Short Cognitive Battery
- SEM : Standard Error of Measurement
- SEMG : Seuil Electromyographique
- SG : Serious Game
- SIRT1 : Silent Information Regulator T1
- SL : Seuil Lactique
- SNJV : Syndicat National du Jeu Vidéo
- SOD-1 et SOD-2 : Superoxide Dismutase-1 et 2
- SPPB : Short Physical Performance Battery
- STAPS : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives
- SV : Seuil Ventilatoire
- TAM : Technology Acceptance Model
- TMT : Trail Making Test
- TNF α : Tumor Necrosis Factor Alpha
- TUG : Time Up and Go
- UTAUT : Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
- V : Version
- VEGF : Vascular Endothelial Growth Factor
- VO₂ : consommation d'oxygène par unité de temps
- VO₂max : consommation maximale d'oxygène par unité de temps
- VO₂^{Peak} : consommation maximale d'oxygène par unité de temps relative au test d'effort utilisé
- β APP : Protéine Précurseur de l'Amyloïde

Introduction

Contexte d'étude

Le vieillissement de la population est un phénomène à fort impact économique et social. Dans le monde, la proportion des personnes âgées de plus de 60 ans, est passée de 9,2 % en 1990 à 11,7 % en 2013 et continue de croître pour atteindre, d'ici 2050, 21 % (Organisation des Nations Unies, 2013). En conséquence, le nombre de personnes âgées présentant une Maladie Neurodégénérative (MN) conduisant à une démence, soit une diminution des facultés mentales suffisamment sévère pour interférer avec les activités de vie quotidienne à l'âge avancé (Dubois et al., 2010), devrait aussi augmenter. Par exemple, le nombre de personnes présentant une MN conduisant à une démence est aujourd'hui estimé à 44 millions (dont 90 % des sujets ont plus de 65 ans, Alzheimer's Disease International, 2014). Ce nombre devrait doubler d'ici 2030 et tripler d'ici 2050 (Organisation des Nations Unies, 2013). Pour ces raisons, les recherches portées sur l'amélioration de la prise en charge de l'ensemble des MN pour retarder ou réduire l'apparition de troubles cognitifs et comportementaux sont considérées comme prioritaires (Ballard et al., 2011).

Durant ces dernières décennies, plusieurs traitements médicamenteux ont été proposés pour le traitement des MN. Actuellement, les essais cliniques ne semblent pas conduire à d'importantes découvertes. De ce fait, les dernières recommandations soulignent également l'importance des stratégies d'intervention non-médicamenteuses et suggèrent d'agir sur le style de vie pour le rendre plus riche sur les plans cognitif, émotionnel, physique et social (Alzheimer's Disease International, 2014 ; Hertzog, Kramer, Wilson, & Lindenberger, 2008).

L'utilisation des Jeux Vidéo (JV) s'est développée autour de cette idée. En effet, un JV peut se définir comme un défi cérébral, joué avec un ordinateur selon des règles spécifiques dédiées à l'amusement, au divertissement ou à la victoire à travers la notion d'enjeu (Zyda,

2005). De plus, un JV peut être associé à de l'exercice physique (exergames) et/ou se jouer à plusieurs (multi-joueurs).

L'utilisation des JV semblent avoir des effets positifs sur les cognitions chez les personnes âgées (Kueider, Parisi, Gross, & Rebok, 2012 ; Toril, Reales, & Ballesteros, 2014). Son utilisation chez les sujets âgés présentant une MN reste néanmoins peu étudiée. Le niveau cognitif plus bas de cette population rend difficile l'accès à ces JV du grand public, ce qui oblige, professionnels et médecins, à concevoir des JV adaptés à leur pathologie (Robert et al., 2014). Ces JV (nommés également Serious Game, [SG]) sont encore aujourd'hui peu nombreux et n'intègrent pas d'activité physique (Benveniste, Jouvelot, Pin, & Péquignot, 2012 ; Manera et al., 2015). Tout comme pour les JV, les démarches de conception d'un SG auxquelles s'ajoutent les tests d'utilisabilité nécessitent une organisation structurée sur plusieurs années.

Le projet Az@game a été lancé sous les hospices du ministère de l'industrie et a démarré en 2012, ralliant partenaires scientifiques (le laboratoire CoBTek⁷ et l'INRIA) et industriels (le groupe Genious interactive et l'IDATE). Ce projet avait pour objectif, sur 3 ans, de concevoir des SG dans le cadre des MN conduisant à une Maladie d'Alzheimer ([MA], c.-à-d. les aidants et les patients) et de les tester auprès des populations cibles. La présente thèse porte sur l'un de ses SG, X-Torp, conçu pour l'entraînement des sujets âgés en bonne santé et pour ceux présentant une MN relative à un trouble cognitif léger (Mild Cognitive Impairment – MCI) ou une démence de type MA.

⁷ CoBTek : Cognition – Behaviour - Technology

Problématique de la thèse et implications professionnelles

X-Torp devait modifier positivement les fonctionnements physiologiques et cognitifs des futurs usagers. Les objectifs du consortium Az@game relatifs à X-Torp étaient : (1) faire un SG qui reprend des mécaniques des JV et ne pas tomber dans un « faux jeu » ou un simulateur dénué d'aspect ludique ; (2) intégrer directement au scénario ludique de jeu des challenges cognitifs pour ne pas rendre le jeu « scolaire » ; (3) commander le jeu par l'activité physique ; (4) faire un jeu attractif, motivant favorisant une expérience positive ; (5) créer une interface pour mettre en relation le médecin et son patient/joueur, afin de faciliter la prise en charge ; et (6) intégrer une composante multi-joueurs, à travers le système de jeu en ligne massivement multi-joueurs (Massively Multiplayer Online Role Playing Games, [MMORPG]).

Il apparaît nécessaire que les différents partenaires puissent se rencontrer, échanger, débattre, comprendre les domaines de compétences des autres, pour ne pas s'arrêter qu'aux aspects scientifiques ou techniques/technologiques. En effet, dans l'objectif de mettre X-Torp sur le marché, la compréhension de l'ensemble des partenaires doit intégrer un certain nombre de domaines de compétence, s'intégrant dans ce concept de Silver Economie, soit « l'économie au service des âgés ».

De manière non exhaustive :

- Les aspects économiques semblent directeurs. Faire une étude de marché et répondre à ses questions fondamentales vont avoir un impact significatif sur le SG, notamment : Quel est le secteur d'activité (santé / divertissement) ? A qui proposer le produit (particulier / professionnel) ? Où ? Combien (prix) ? Quels sont les concurrents ? Et quelles sont les retombées économiques ? Le choix du modèle économique semble fortement impacter le processus de conception (p. ex., son intégration sur le marché du JV ? Ou sur le marché de

la santé ? Doit-il devenir dispositif médical ? A quel échelon ? Quel niveau de preuve scientifique est nécessaire ?).

- Les aspects politiques ne sont pas non plus à négliger (p. ex., qui sont les initiateurs du mouvement ? Avec qui collaborer ?).
- La communication, laquelle ne se résume pas seulement aux congrès scientifiques, mais aussi aux manifestations professionnelles, à la vulgarisation scientifique et technologique à travers tout type de médias.
- Les aspects scientifiques, dont la difficulté majeure est d'adopter une approche pluridisciplinaire. En effet, la MA est le résultat de modifications biologiques à fort impact sur les cognitions et les comportements (et inversement). Ainsi, il semble nécessaire de s'intéresser à l'ensemble des domaines scientifiques (p. ex., les neurosciences, la physiologie, la psychologie cognitive, sociale, la biomécanique) afin de comprendre leurs étroites relations dans le cadre de la maladie et de s'orienter vers l'approche la plus adaptée sur le plan thérapeutique.
- Les aspects technologiques : quel matériel ? Quel type de jeu ? Combien de temps pour une première version ? Combien de personnes sur les différentes étapes de conception ? Quelles modifications nécessaires par la suite en regard du rapport coûts / bénéfices ?

Problématique de la thèse et implications personnelles

La démarche d'intégrer un groupe d'individu se trouvant aux antipodes des JV et pour des raisons sérieuses, paraît encore aujourd'hui, aux yeux de beaucoup de personnes, comme une aberration et une perte de temps (sans parler du fait qu'X-Torp est un jeu présentant beaucoup de phases de combat). Au début de ma formation universitaire en STAPS, j'ai commencé, à titre personnel, à jouer à la PlayStation® 3 tout en faisant du vélo d'appartement et portant un cardio fréquencemètre. J'étais d'ailleurs perçu comme un individu « original ».

Puis, en 2010, dans le cadre de ma formation universitaire, j'ai intégré en tant que stagiaire le projet européen SKILLS. J'ai pu participer à l'élaboration et aux tests d'un simulateur virtuel d'aviron sur rameur d'appartement pour l'entraînement au 2000 mètres en solo et deux de couple (Bardy, 2011; Varlet et al., 2013). Ma grande frustration à l'issue de ce projet scientifique a été de constater qu'une technologie intéressante s'est retrouvée perdue parmi d'autres dans la littérature scientifique et jamais intégrée dans notre société. C'est d'ailleurs un phénomène qui me semble toujours d'actualité concernant les technologies vidéoludiques d'origine scientifique.

Concernant le projet Az@game, mes missions étaient de participer à la conception des SG, de le tester auprès des populations cibles pour en évaluer son utilisabilité, ses effets potentiels et, de cette démarche, proposer des améliorations pour aboutir à un produit fini et commercialisable. De ce fait, j'ai dû m'impliquer dans l'ensemble du processus de conception des SG, particulièrement pour « X-Torp ». Ce contexte à la fois industriel et universitaire m'a permis en partie de comprendre pourquoi certains SG et applications n'existent uniquement que le temps d'une expérimentation scientifique et de sa publication. Je me suis rendu compte que pour mener à bien ce type de projet, je devais considérer un certain nombre de domaines (cités dans la partie précédente) en plus de ceux liés à mes compétences scientifiques, lesquels contribuent tout autant à l'intégration du jeu sur le marché.

Durant mon doctorat, j'ai travaillé sur deux SG destinés aux patients. Faute de temps, nos efforts se sont concentrés sur X-Torp, lequel aujourd'hui est en bonne voie pour arriver à un produit commercialisable. Ce manuscrit va aborder le déroulement du doctorat en trois temps, lesquels reprennent chronologiquement, les démarches liées à la de conception d'X-Torp. En effet, ma première mission était de participer à la conception d'un état de l'art le plus large possible sur nos thématiques (ce qui a donné suite à une première publication). Ma seconde mission était de participer à la conception d'X-Torp, sur son scénario de jeu, ses

aspects pédagogiques, son ergonomie. Ensuite, je devais participer aux tests de la première version d’X-Torp (X-Torp V1) sur nos populations cibles pour en évaluer l’utilisabilité dans son ensemble et vérifier les effets potentiels (ce qui a donné suite à une seconde publication). Enfin, ma dernière mission, encore d’actualité, est de tirer partie de toutes ces expériences pour faire aider à évoluer le jeu vers sa version définitive (X-Torp V2, ce qui a donné suite, pour une des propositions d’amélioration, à une troisième publication).

Originalité du travail de thèse au regard de la littérature

Certains des objectifs et missions décrits ci-dessus mettent en évidence le caractère innovant de cette thèse au regard des travaux antérieurs (scientifiques et technologiques). Par exemple, lors du démarrage du projet Az@game, dans le domaine des SG santé (et plus spécifiquement dans le cadre des MN), à notre connaissance, il existait uniquement des SG conçus à travers des démarches empiriques. Le point inédit de ce travail de thèse est d’aborder la conception d’un SG à partir de modèles scientifiques portant sur la typologie des JV, des SG et les critères d’ergonomie d’une nouvelle Technologie de l’Information et de la Communication (nTIC). Egalement, il n’existait aucun SG, incluant de la stimulation physique, conçu en considérant les caractéristiques comportementales, physiques et cognitives des sujets présentant une MN au-delà du stade de MCI.

Plan de la thèse

Ce manuscrit se compose de trois grandes parties. Les publications scientifiques sont intégrées dans :

1) Un cadre théorique, très large mais se voulant au maximum synthétique. Il traitera : des aspects psychologiques et physiologiques du vieillissement et de la MA ; des stratégies de prises en charges retenues en adéquation avec deux stratégies transférables sur les JV ; d’une

approche théorique relative à la compréhension des JV et SG ; de leur conception et leur utilisabilité ; et des données scientifiques concernant cette thématique de JV et SG pour la stimulation cognitive des joueurs. Cette partie permettra de présenter et de mettre en adéquation l'ensemble des domaines.

2) Une partie consacrée à X-Torp traitera (1) de la conception complète d'X-Torp V1 et de son utilisabilité auprès des populations cibles ; (2) de la conception actuelle d'X-Torp V2.

3) La dernière partie traitera d'une proposition pour aborder d'une autre manière l'activité physique à travers ce jeu.

Partie 1 : Cadre théorique

Chapitre 1 : Approche physiologique, cognitive et comportementale du vieillissement et de la Maladie d'Alzheimer

1 Le vieillissement

Selon De Jaeger et Cherin (2011), le vieillissement peut se définir comme « l'ensemble des processus physiologiques et psychologiques qui modifient, après la phase de maturité, la structure et les fonctions de l'organisme d'un être vivant sous l'action du temps ». Sur le plan physiologique, le vieillissement est la résultante d'un ensemble de facteurs intimement liés mais distingués en deux grandes catégories : (1) la part intrinsèque, liée aux composantes génétiques de notre organisme, et (2) la part extrinsèque, liée à un ensemble de facteurs environnementaux, soit l'histoire de chacun (De Jaeger & Cherin, 2011). Pris ensemble, le vieillissement d'un individu est progressif, inéluctable et responsable d'un affaiblissement généralisé des processus biologiques, psychologiques et sociaux. Dans l'optique de maintenir une autonomie de vie le plus longtemps possible, une importance particulière est accordée aux fonctions cérébrales (Raz et al., 2005), musculaires et cardiorespiratoires (Hawkins & Wiswell, 2003). En effet, Rowe & Kahn (1997) distinguent du phénomène de vieillissement normal, le vieillissement réussi et le vieillissement « pathologique ». Bien vieillir (c.-à-d. le vieillissement réussi) correspond à une probabilité réduite de développer des maladies et handicaps, un attrait à s'engager dans les activités sociales ou constructives et un maintien d'un haut niveau de fonctionnement cognitif. A l'inverse, mal vieillir (c.-à-d. le vieillissement « pathologique »), correspond à l'apparition de signes de morbidité précoces, notamment les affections cardiovasculaires, les troubles physiques, sensoriels, cognitifs et comportementaux, souvent associés à des signes de dénutrition, le tout favorisant l'apparition de pathologies et de neuropathologies.

2 Les Maladies Neurodégénératives

Les neuropathologies relatives aux MN peuvent causer des pertes cognitives associées à des troubles comportementaux et physiques pouvant conduire un individu à une perte d'autonomie dans les activités de vie quotidienne (p. ex., faire les courses). Préalablement au stade de démence, un individu peut passer par une phase non irréversible de pré-démence, aussi connue sous le nom de « Mild Cognitive Impairment » (MCI, troubles cognitifs légers), caractérisée par des plaintes cognitives et un déclin cognitif supérieur à celui attendu en fonction de l'âge (Petersen, 2004 ; Petersen et al., 2009).

Les processus biologiques impliqués dans l'ensemble des MN sont très hétérogènes. Toutefois, il semblerait que les MN présentent des neuropathies communes, telles que des processus neuroinflammatoires, neurodégénératifs, des glioses, des pertes synaptiques, une atrophie cérébrale et des altérations de la barrière hématoencéphalique (Raz, Knoefel, & Bhaskar, 2015). Ces altérations moléculaires seraient dues, entre-autres, à des altérations du métabolisme bioénergétique (notamment à travers des dysfonctionnements des mitochondries du cerveau), des phénomènes d'hypoperfusion/hypoxie et des dysfonctionnements de la réponse hémodynamique cérébrovasculaire (notamment à travers des altérations des petits vaisseaux sanguins du cerveau, Raz et al., 2015).

3 La Maladie d'Alzheimer

La MA est la cause la plus courante de MN. Les récents critères diagnostiques de la MA la définissent comme un trouble débutant par (1) une phase asymptomatique, caractérisée par la mise en évidence de marqueurs physiopathologiques ; (2) une phase pré-démentielle (prodromique), caractérisée par l'apparition de symptômes cliniques incluant un trouble cognitif, comportemental et des troubles des activités instrumentales, qui n'interfèrent pas ou très peu sur les activités de vie quotidienne ; et (3) une phase démentielle durant laquelle les

symptômes cognitifs et comportementaux sont suffisamment sévères pour interférer avec le fonctionnement social et l'autonomie dans les activités de vie quotidienne (Dubois et al., 2007, 2010).

D'un point de vue biologique, la MA se définit principalement par la présence de lésions cérébrales caractéristiques qui progressent à la fois de manière spatiale et temporelle : les dépôts amyloïdes et les dégénérescences neurofibrillaires. Ces lésions sont respectivement associées à une surproduction pathologique des substances naturellement présentes dans le cerveau : le peptide β -amyloïde, par dégradation amyloïdogénique et les protéines tau, par hyperphosphorylation (Huang & Jiang, 2009). Ces phénomènes pathologiques sont associés à un large éventail d'altérations neurobiologiques telles que : la perturbation des kinases et des protéines clef de l'apoptose (Huang & Jiang, 2009) ; des réactions inflammatoires et immunitaires chroniques initiées par les cellules gliales (Alvarez, Cacabelos, Sanpedro, García-Fantini, & Aleixandre, 2007; Alvarez et al., 2009; Griffin et al., 1989) ; et un dysfonctionnement du métabolisme aérobie (Fukuyama et al., 1994), notamment à travers des dysfonctionnements mitochondriaux accentuant la libération des Espèces Réactives de l'Oxygène (ERO, Manczak et al., 2006).

Ces lésions histopathologiques, longtemps asymptomatiques, vont progressivement se manifester sur le plan clinique par des troubles cognitifs (p. ex., amnésie, aphasie, apraxie, agraphie, acalculie et agnosie), comportementaux (p.ex., apathie, dépression, troubles du sommeil, de l'appétit, agitations) et fonctionnels (p. ex., diminution de la mobilité, de l'équilibre), lesquels vont entraîner une perte d'autonomie dans les activités de vie quotidienne.

4 Cognitions, vieillissement et Maladie d'Alzheimer

« Ne pas perdre la tête ! » ou « Garder toute sa tête ! » mettent en évidence l'intérêt que nous portons sur l'état de fonctionnement de notre cerveau lorsque nous nous projetons dans l'âge avancé. Conséquence ou non de cet intérêt, un des enjeux principaux dans le maintien de l'autonomie de vie s'articule autour de la préservation du fonctionnement de nos cognitions et du ralentissement de son déclin. Il reste encore difficile aujourd'hui d'établir une chronologie précise de l'évolution de nos cognitions avec l'âge, du fait de la composante environnementale du vieillissement. Très simplement, les cognitions correspondent aux processus mentaux impliqués dans la connaissance, la compréhension et la reconnaissance.

4.1 Les Mémoires

La mémoire est un système de mémoires multiples.

- La mémoire sensorielle est un système de réception des informations sensorielles sur un court laps de temps (fraction de seconde).
- La mémoire de travail est un système de maintien temporaire de l'information (quelques secondes) selon deux modalités : (1) le maintien temporaire de l'information pendant la réalisation d'une tâche cognitive ; et (2) la manipulation de l'information maintenue.
- La mémoire à long terme est plus complexe :
 - Le fondement conscient de la mémoire à long terme est la mémoire épisodique. Elle permet à un individu de se souvenir et de prendre conscience des événements personnellement vécus dans un contexte particulier (vie personnelle) et à travers plusieurs étapes : l'encodage, le stockage, la récupération et la consolidation.
 - Le fondement inconscient de la mémoire est multiple :
 - La mémoire sémantique permet l'apprentissage et le rappel de connaissances générales sur le monde.

- Le système de représentations perceptives permet l'acquisition et le rappel de connaissances relatives aux formes et structures des objets, mots, etc. (hors cadre sémantique).
- La mémoire procédurale fait référence à notre savoir faire manuel.

Le vieillissement n'affecte que très peu la mémoire procédurale et le système de représentations perceptives. Il est observé un effet délétère de l'âge sur la mémoire de travail (Gazzaley, Sheridan, Cooney, & D'Esposito, 2007). La mémoire sémantique est peu sensible aux effets de l'âge, à l'exception du rappel des noms propres. La mémoire épisodique est connue pour être la plus sensible aux effets délétères du vieillissement, avec des difficultés au cours des tâches de rappel libre du fait d'un défaut d'élaboration de stratégies qui permettent un apprentissage et une restitution efficace des informations à apprendre, des difficultés pour restituer le contexte spatio-temporel des informations apprises et une augmentation des faux souvenirs (Crawford, Bryan, Luszcz, Obonsawin, & Stewart, 2000 ; Giffard, Desgranges, & Eustache, 2001 ; Guillaume, Guillery-Girard, Eustache, & Desgranges, 2009).

Les troubles de la mémoire constituent le symptôme le mieux reconnu et le plus caractéristique de la MA. Tous les systèmes de mémoire à long terme peuvent être dégradés (Traykov, Rigaud, Cesaro, & Boller, 2007). Néanmoins, la mémoire implicite, qui requiert un rappel sans effort conscient, est habituellement préservée chez des sujets présentant une MA, alors que leurs performances aux tests explicites, exigeant un effort conscient de rappel, sont détériorées (Camus et al., 2003 ; Karlsson, Börjesson, Adolfsson, & Nilsson, 2002). De plus, les sujets présentant une MA ont un déficit de la mémoire de travail dès l'apparition des premiers symptômes de la maladie (Sebastian, Menor, & Elosua, 2001). La mémoire sémantique est également affectée, avec une aphasia qui se caractérise par des compréhensions perturbées, des répétitions conservées et des difficultés à récupérer des connaissances sémantiques (Belin, Ergis, & Moreaud, 2006).

4.2 Fonctions instrumentales

- Le langage est un système de signes linguistiques pour communiquer et exprimer des pensées et des sentiments.
- Les gnosies regroupent les capacités à reconnaître et à identifier un objet par l'un de nos sens.
- Les praxies regroupent les capacités à réaliser des gestes spontanément, sur ordre, imitation, avec ou sans objet, pour gestes courants, significatifs ou non.

Les sujets présentant une MA présentent une apraxie relative à une difficulté de réaliser des gestes concrets, puis sur la coordination des mouvements, ainsi qu'une agnosie visuelle touchant probablement l'espace avec une amnésie topographique, et des troubles de l'orientation dès le début de la maladie (Thomas-Antérion & Mahieux, 2009).

4.3 Fonctions exécutives

Selon Norman et Shallice en 1980 (cité par Friedenberg & Silverman, 2015), un individu se retrouve quotidiennement dans des situations familières qu'il mène de façon automatique (p. ex. conduire sa voiture). Dans ce contexte, il existe un mécanisme de niveau inférieur de prévision de conflits qui régule le traitement de schémas établis relatifs à ces situations quotidiennes afin d'en exprimer uniquement ceux nécessaires (comme des scripts de comportements à adopter). De ce fait, plus une situation se répète et fait appel à des schémas particuliers, plus ce mécanisme de gestion de conflit s'optimise. Lors de situations plus complexes ou nouvelles, nécessitant de s'adapter, de faire des choix ou de résoudre des problèmes (ce qui mobilise plus de ressources), les schémas existants peuvent échouer ou aucun schéma appris ne peut être applicable. Le système de gestion ne suffit pas. Dans ces cas, un mécanisme de contrôle de niveau supérieur, le Système Attentionnel Superviseur

(SAS), vient suppléer celui de niveau inférieur. Le SAS contient des systèmes de planification, plus lents, plus flexibles, plus généraux et applicables à une plus grande variété de situation (comme des programmes). En résumé, il orchestre, de façon délibérée, les stratégies générales de résolution de problèmes que les schémas existants n'ont pu résoudre. Il jouerait ainsi plusieurs rôles :

- L'inhibition, correspondant à (1) l'action de réfréner une action automatique ou (2) d'interrompre une action en cours, ou encore, (3) de ne pas considérer des informations non pertinentes.
- La flexibilité mentale, correspondant à la capacité de passer d'une activité à une autre (par alternance, non simultanément).
- L'« updating », correspondant à la mise à jour, la capacité d'actualiser l'information dans une sorte de mémoire tampon (c.-à-d. la mémoire de travail), ce qui permet de tenir compte de nouvelles conditions.
- L'attention divisée, correspondant à la capacité de réaliser simultanément plusieurs actions.
- La récupération, correspondant à la capacité de récupérer activement des informations en mémoire en développant des stratégies pour se resituer dans un contexte.
- La planification, correspondant à la capacité d'organiser les actions dans une tâche donnée.

Les fonctions exécutives sont au cœur des préoccupations dans le cadre du vieillissement, du fait qu'elles permettent à un individu de s'adapter aux exigences de son environnement et qu'elles puissent être les premières à décliner dans les processus de vieillissement (Hertzog et al., 2008). Les fonctions exécutives sont issues de l'approche neuropsychologique qui s'appuie sur l'hypothèse « frontale exécutive » du vieillissement cognitif, stipulant que l'âge modifie le fonctionnement exécutif (West, 1996). Elle permet en

outre d'expliquer les modifications cognitives observées au cours du vieillissement physiologique. Dans le cadre de cette hypothèse, le modèle HAROLD (Hemispheric Asymmetry Reduction in Older adults) met en évidence que les troubles cognitifs liés à l'âge sont dus à la perte de l'asymétrie de l'activité cérébrale enregistrée au niveau du cortex préfrontal (Dolcos, Rice, & Cabeza, 2002). Cette approche corrobore la grande détérioration structurelle et fonctionnelle du lobe frontal (Kalpouzos et al., 2009), et la suractivation frontale (Reuter-Lorenz & Park, 2010), signes de changement dans l'organisation du fonctionnement préfrontal avec l'âge. Egalement, Raz met en évidence une perte de masse cérébrale proche de 2 % par décennie chez l'adulte, laquelle semble plus prononcée pour le cortex préfrontal par rapport aux autres régions du cortex. De plus, la réduction de volume cérébral semble particulièrement s'accroître aux âges avancés pour la substance blanche du cortex préfrontal et l'hippocampe (Raz et al., 2005).

Les fonctions exécutives déclinent très précocement au cours de la MA (Arnáiz & Almkvist, 2003 ; Broks et al., 1996 ; Lafleche & Albert, 1995). Les patients sont particulièrement en difficulté dans les épreuves nécessitant une manipulation simultanée d'informations différentes, dans toutes les tâches impliquant une grande flexibilité mentale, des capacités d'autocontrôle et de structuration temporelle d'un plan.

4.4 Fonctions attentionnelles

Il faut considérer les fonctions cognitives comme interactives et interdépendantes. Les fonctions attentionnelles en sont le meilleur exemple du fait qu'elles peuvent faire appel à la mémoire ou aux fonctions exécutives. D'ailleurs, elles peuvent faire appel à différents compartiments cérébraux à travers des réseaux neuronaux de l'attention. Les fonctions attentionnelles sont omniprésentes dans nos comportements à chaque instant. Elles constituent des pré-requis pour l'expression des autres fonctions. Elles se constituent de processus

spécifiques relatifs au traitement de l'information. D'après Azouvi, Couillet, Leclercq, & Moroni (2003), les approches relatives aux fonctions attentionnelles distinguent la préparation, l'intensité et la sélectivité :

- La préparation fait référence à l'alerte phasique. L'alerte est un état d'éveil et de préparation de la réponse. L'alerte phasique correspond à la modification rapide de la disponibilité du système mental, volontaire.
- L'intensité fait référence à l'alerte tonique, l'attention soutenue et la vigilance.
 - L'alerte tonique correspond à la modification lente du niveau global des ressources mentales, involontaire.
 - La vigilance représente un état de maintien du niveau d'attention pour détecter dans l'environnement des événements rares et discrets.
 - L'attention soutenue représente un état de maintien du niveau d'attention adéquat et stable au cours d'une activité pendant un temps prolongé.
- La sélectivité fait référence à l'attention focalisée, la flexibilité de l'attention et l'attention divisée.
 - La focalisation de l'attention est plus complexe. L'objet de l'attention peut être d'une part externe, c.-à-d. capturé involontairement par des stimuli extérieurs, inattendus, nouveaux, très souvent captés par nos récepteurs visuels et auditifs. Le contrôle externe du foyer attentionnel est passif, rapide, réflexe et se produit sans effort (notre attention est attirée). D'autre part, l'objet de l'attention peut être interne, c.-à-d. intentionnel, actif et orienté vers un but. Le contrôle interne du foyer attentionnel est lent, dépendant du contrôle volontaire et intimement associé à l'effort (nous nous concentrons).
 - La flexibilité attentionnelle fait référence à la capacité de fixer son attention sur un point précis et à changer rapidement de foyer attentionnel selon trois étapes : (1) la

sélection d'un stimulus sur lequel se fixe l'attention ; (2) le maintien de ce foyer attentionnel et (3) le changement de foyer vers un autre stimulus. La capacité de changer la focalisation, d'alterner à plusieurs reprises le foyer attentionnel pour atteindre un but est très fréquente dans nos activités au quotidien.

- L'attention divisée est la capacité à partager nos ressources attentionnelles.

Au niveau des capacités attentionnelles, l'attention sélective est moins efficace à l'âge avancé (Siéroff & Piquard, 2004) et se traduit par une plus grande difficulté pour se désengager du traitement d'un premier objet pour porter attention sur un autre. Egalement, l'attention divisée perd de son efficacité (Berardi, Parasuraman, & Haxby, 2001) avec un coût attentionnel engendré par une situation de double tâche plus important.

Diverses études ont montré que, dans la phase initiale de la MA, la vigilance et l'attention dirigée étaient affectées de façon relativement moindre que les autres aspects de l'attention (Broks et al., 1996). Les temps de réaction simples ne sont que légèrement allongés chez les sujets présentant une démence, qui conservent la capacité de focaliser leur attention sur une information essentielle pour la réalisation d'une performance déterminée (Traykov et al., 2007). Les problèmes d'attention sont également évident lorsque les sujets sont engagés dans l'exécution de tâches requérant un partage de l'attention simultanément vers plusieurs stimuli ou types de stimulus (Levinoff, Li, Murtha, & Chertkow, 2004 ; Logie, Cocchini, Delia Sala, & Baddeley, 2004).

Chapitre 2 : la prise en charge non-médicamenteuse du vieillissement et de la Maladie d'Alzheimer⁸

1 Retarder le déclin cognitif par la prise en charge non-médicamenteuse

Une grande partie de la prise en charge non-médicamenteuse se porte sur les mécanismes de neuroplasticité. La plasticité cérébrale (ou neuroplasticité) est un processus physiologique adaptatif et dynamique, contraint par des limites biologiques (génétiques) et environnementales (non génétiques). Leurs facteurs modulateurs sont, respectivement, endogènes (p.ex., développemental, maturation, vieillissement, lésions) et exogènes (p.ex., environnement, activités, médications). Les principaux mécanismes biologiques impliqués sont l'angiogénèse (développement de l'architecture vasculaire cérébrale) et la neurogénèse (développement de l'architecture neuronale).

Au fil des années, l'accumulation de données scientifiques sur les différents essais non-médicamenteux a fait ressortir deux hypothèses relatives aux mécanismes favorisant la neuroplasticité du sujet âgé et présentant une MN. Progressivement, les grandes lignes de stratégies d'intervention non-médicamenteuses se sont précisées. Actuellement encore, l'optimisation de ces stratégies est l'une des préoccupations de la recherche. Deux stratégies, non indépendantes l'une de l'autre, sont reconnues :

- La pratique d'une Activité Physique Régulière de type Aérobie (APRA) constitue l'hypothèse métabolique (Dustman, Emmerson, & Shearer, 1994).
- Plus généralement, l'enrichissement de l'environnement à travers des stimulations physiques (p. ex., APRA, apprentissages moteurs, renforcement musculaire), cognitives, sociales, émotionnelles et affectives, constitue l'hypothèse de l'enrichissement cognitif (Hertzog et al., 2008).

⁸ Chapitre issu de l'article

Ben-Sadoun, G., Petit, P.D., Colson, S.S., König, A., Robert, P. (2015). Activité aérobie et environnement enrichi : perspectives pour le patient Alzheimer. *Science & Sports*, 30,1-12.

Les études portant sur ces stratégies ont des intérêts multiples. Elles permettent d'améliorer ces stratégies pour optimiser les prises en charge, sur le plus long terme et avec un coût financier le plus bas possible. Parallèlement, elles permettent de comprendre de manière plus précise les mécanismes favorisant la neuroplasticité chez le sujet âgé et/ou présentant une MN. Ainsi, elles permettent de mieux comprendre comment des facteurs dits environnementaux (non génétiques), notamment les propres comportements d'un individu, agissent sur cette neuroplasticité et peuvent conjointement freiner ou retarder l'apparition de troubles cognitifs. Actuellement, il semble exister plus de données : (1) dans le cadre du vieillissement, du MCI et de la MA que pour l'ensemble des MN ; et (2) chez l'animal que chez l'homme. Les sections suivantes s'appuieront donc à la fois sur les études animales, humaines, dans le cadre du vieillissement sain et pathologique de type MCI et MA.

2 Hypothèse métabolique

2.1 Présentation de l'hypothèse et son évolution

L'hypothèse dite métabolique (ou circulatoire) stipule que la stimulation de la fonction cardiorespiratoire par l'APRA engendrerait une augmentation du flux sanguin cérébral qui permettrait une meilleure oxygénation du système nerveux central. Cette hypothèse, présentée par Dustman et al. (1994) suppose que : du fait des besoins importants des tissus cérébraux en glucose, en oxygène et du fait qu'un approvisionnement suffisant de ces substrats semble indispensable pour le métabolisme neuronal, les changements directs dans la fonction cardiovasculaire affecteraient directement le fonctionnement du système nerveux central. Ainsi, l'APRA pourrait ralentir la vitesse à laquelle se produisent les altérations du métabolisme neuronal pendant le processus de vieillissement. Actuellement, cette hypothèse présente un intérêt croissant du fait de la relation positive observée entre le niveau maximal de l'aptitude aérobie (correspondant au débit maximal d'oxygène par unité de temps, le

VO₂max), les fonctions cognitives et la structure cérébrale, aussi bien chez des populations vieillissantes (Bullitt et al., 2009 ; Colcombe et al., 2003 ; Erickson et al., 2009, 2011) que chez les patients atteints de la MA (Burns et al., 2008 ; Vidoni, Honea, Billinger, Swerdlow, & Burns, 2012). De plus, les dysfonctionnements mitochondriaux pourraient être les probables déclencheurs et amplificateurs de la progression de la voie amyloïdogénique associée à la MA (Swerdlow, Burns, & Khan, 2010). Leuner, Müller, & Reichert (2012) font également l'hypothèse que, dans la forme sporadique de la MA, certains processus candidats au vieillissement, induiraient dans un premier temps des altérations du fonctionnement neuronal associées à des dysfonctionnements mitochondriaux, qui, en conséquence, déclencheraient la production anormale des peptides β -amyloïdes.

Pour rappel, la mitochondrie est un organe des cellules eucaryotes. Sa fonction la plus connue est la production d'énergie chimique (l'Adénosine Triphosphate, ATP). De plus, elle serait impliquée dans d'autres processus cellulaires tels que l'homéostasie du calcium, l'apoptose, la prolifération et la différenciation cellulaire. La mitochondrie possède son propre Acide DésoxyriboNucléique (ADN) qui code pour les quatre sous-unités de complexes enzymatiques constituant la chaîne respiratoire (ou chaîne de transport des électrons ; complexes I, II, III et IV). Ces complexes, par transports successifs d'électrons, réalisent une phosphorylation oxydative, permettant de pomper progressivement des protons de la matrice mitochondriale vers son espace inter-membranaire, générant ainsi un gradient de protons. Ce gradient est ensuite utilisé dans un cinquième complexe (ATPsynthase) pour générer l'ATP. Néanmoins, ce mécanisme n'est pas parfait et 2 % des électrons transférés par la chaîne respiratoire vont être responsables de la formation d'Espèces Réactives de l'Oxygène (ERO). Durant les processus de vieillissement, l'augmentation progressive des niveaux d'ERO décrit un stress oxydatif, conduisant à une accumulation de protéines, de lipides et d'acides nucléiques oxydés. Ce phénomène semble en partie initier les altérations des cellules et les

dysfonctions de la mitochondrie. En effet, les ERO se produisant dans la mitochondrie, celle-ci en serait la première cible. Ces ERO engendreraient principalement des modifications progressives de l'ADN mitochondrial et des altérations du fonctionnement du complexe I (Leuner et al., 2012). Ces mutations successives de l'ADN mitochondrial au cours du temps semblent être un des acteurs majeurs du processus de vieillissement. De ce fait, les dysfonctions mitochondriales résultantes d'un vieillissement pathologique provoqueraient une surproduction d'ERO, lesquelles amplifieraient d'avantage les dysfonctions mitochondriales (Leuner et al., 2012), qui à leur tour engendreraient des dysfonctionnements cellulaires.

Il convient aussi de rappeler que la protéine précurseur de l'amyloïde (β APP) est une glycoprotéine transmembranaire synthétisée dans le réticulum endoplasmique et transportée vers l'appareil de Golgi (Pagani & Eckert, 2011). C'est à partir de celui-ci qu'elle va être clivée et / ou transportée vers d'autres organites ou vers la membrane plasmique. Sa fonction précise, au sein de l'organisme reste relativement peu connue. Il existe deux voies de dégradation l' β APP : la voie non-amyloïdogénique et la voie amyloïdogénique (pathologique, Figure 1, Huang & Jiang, 2009 ; Pagani & Eckert, 2011). Dans la voie non-amyloïdogénique, l' β APP est clivée par les α -sécrétases (enzymes de la famille des *ADAM* *Disintegrin And Metalloproteinase*) au niveau de la membrane (notamment la membrane plasmique et de l'appareil de Golgi), ce qui libère une contrepartie C-terminale membranaire (C83), un fragment N-terminal (sAPP α) soluble et abolie la formation du peptide A β (Pagani & Eckert, 2011). La contrepartie C-terminale membranaire, C83, est ensuite clivée par la γ -sécrétase (multi-complexe protéique) pour produire le peptide p3 et un fragment cytosolique appelé AICD (*APP Intra Cellular Domain*). Le fragment N-terminal soluble, sAPP α , présenterait des propriétés neurotrophiques et neuroprotectrices (Pagani & Eckert, 2011). Dans la voie amyloïdogénique, l' β APP est clivée par les β -sécrétases (enzymes) en amont de la membrane (notamment de la membrane plasmique, de l'appareil de Golgi et des endosomes) ce qui

libère une contrepartie C-terminale membranaire (C99) et un fragment N-terminal (sA β PP β) (Huang & Jiang, 2009 ; Pagani & Eckert, 2011). La contrepartie C-terminale membranaire, C99, est ensuite clivée par la γ -sécrétase (multi-complexe protéique) pour produire le peptide β -amyloïde et un fragment cytosolique appelé AICD (*APP Intra Cellular Domain*). Le peptide β -amyloïde va par la suite, soit rester dans l'organite, soit se déplacer vers la mitochondrie ou vers l'extérieur de la cellule (Pagani & Eckert, 2011).

Les études récentes sur les cultures cellulaires semblent montrer que les ERO dérivés du complexe I initieraient l'augmentation des processus amyloïdogéniques (Leuner et al., 2012). En effet, il semblerait que l'augmentation de la production de certains ERO (comme le peroxyde d'hydrogène) augmente l'activité du BACE 1 (*Beta-site APP Cleaving Enzyme 1*), une enzyme des β -sécrétases impliquée dans la coupure β de la β APP. L'activité du BACE 1 étant aussi liée à l'activité des γ -sécrétases, l'augmentation des ERO pourrait être initiatrice de la génération des peptides β -amyloïdes. De plus, les études récentes sur les modèles animaux de la MA montreraient que ces peptides perturberaient, à leur tour, l'activité des structures de la mitochondrie, notamment la membrane mitochondriale et le complexe IV, ce qui amplifierait la quantité d'ERO produite et les mutations de l'ADN mitochondrial. Un fonctionnement récursif (« cercle vicieux ») se mettrait alors en place, aboutissant à un dysfonctionnement accentué de la mitochondrie, laquelle va activer les voies de signalisation de l'apoptose, conduisant à la mort prématurée des neurones (Figure 1). Il convient de noter que les β -amyloïdes, tout comme les ERO, ne vont pas uniquement cibler la mitochondrie. En effet, de par sa structure, les β -amyloïdes semblent être capables de se lier à une variété de biomolécules, incluant les lipides, les protéines et les protéoglycanes (Huang & Jiang, 2009). Les peptides β -amyloïdes sous formes solubles ou fibrillaires (considérées comme toxiques) pourraient aussi se lier à un sous ensemble protéique de la membrane plasmique des cellules

gliales, neuronales et à leurs récepteurs respectifs (Huang & Jiang, 2009). De ce fait, une grande partie des cellules de notre cerveau semble être en proie à ce peptide.

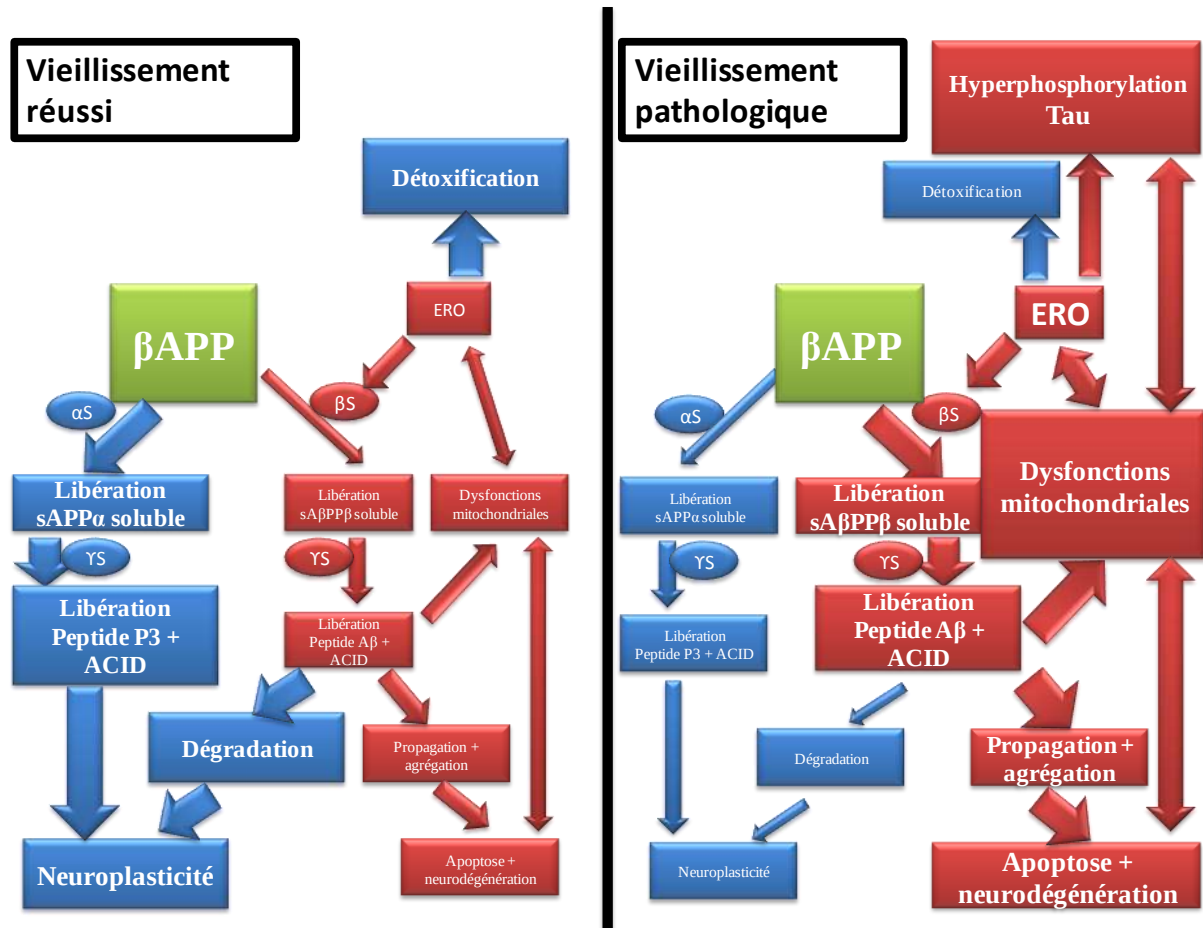


Figure 1 : Schématisation du clivage de la protéine précurseur de l'amyloïde (β APP) et influence des mitochondries. Les plus grosses tailles des flèches et des cases mettent en évidence la voie préférentielle en fonction du type de vieillissement. (A gauche) fonctionnement lors du processus de vieillissement réussi (en bonne santé), caractérisé par un probable clivage non-amyloïdogénique de la β APP (en bleu) supérieur à celui amyloïdogénique et favorisant la neuroplasticité. Ce vieillissement sain limite les dysfonctions mitochondriales, lesquels vont limiter l'activité des β -sécrétases. (A droite) fonctionnement lors du processus de vieillissement pathologique engendrant une MN de type MA, caractérisé par un clivage amyloïdogénique de la β APP (en rouge) supérieur à celui non-amyloïdogénique. Les dysfonctions mitochondriales seraient initiatrices de ce vieillissement pathologique. Elles vont amplifier l'activité des β -sécrétases par les ERO et une hyperphosphorylation Tau, de manière récursive, conduisant ainsi vers l'apoptose cellulaire. Il convient de noter que cette schématisation résume le processus physiologique général du clivage de l' β APP lié aux fonctions mitochondriales sans préciser les différents compartiments cellulaires et enzymes impliqués dans la production, le clivage et le transport des produits issus de l' β APP.

2.2 Considérations physiologiques liées à l'intensité d'une Activité Physique Régulière de type Aérobie

La difficulté mais néanmoins l'enjeu majeur est de définir physiologiquement l'intensité d'exercice. Pour ce faire, la charge de travail évaluée à partir des niveaux d'activation des métabolismes énergétiques est devenue une approche courante. Toutefois, elle nécessite de s'intéresser aux relations complexes entre les métabolismes aérobie et anaérobie, lesquels ne sont pas encore bien clairement établies au regard de la littérature.

Pour résumer, même lorsque le métabolisme aérobie assure majoritairement l'apport nécessaire en énergie à l'exercice (p. ex., à l'exercice dit de faible intensité), il collabore avec le métabolisme anaérobie (p. ex., la glycolyse anaérobie aboutissant à la formation de lactate). Leurs implications respectives dans l'apport d'énergie varient en fonction de l'intensité d'exercice et de la durée d'exercice, elles-mêmes liées au recrutement des différentes unités motrices. A l'exercice d'endurance aérobie sous maximal (inférieur au VO_2max), d'intensité progressive, dans une activité locomotrice, il semble exister des seuils d'intensités où, de manière assez répandue dans la littérature, le débit ventilatoire, les concentrations de lactate (dans le sang et les muscles actifs), les catécholamines et le signal électromyographique (traduisant la qualité de recrutement des unités motrices) ne suivent plus une relation linéaire positive avec l'augmentation de l'intensité d'exercice mais plutôt exponentielle (Beaver, Wasserman, & Whipp, 1986 ; Candotti et al., 2008 ; Faude, Kindermann, & Meyer, 2009 ; Gaskill et al., 2001 ; Lucía, Sánchez, Carvajal, & Chicharro, 1999 ; McMorris & Hale, 2015 ; Pereira et al., 2013). Ces études parlent, respectivement, de : (1) Seuil Ventilatoire (SV), caractérisé par une hyperventilation plus importante liée à une plus grande augmentation de la production de CO_2 par rapport à la consommation d' O_2 ; (2) Seuil Lactique (SL), caractérisé par une surproduction accrue de lactate par rapport à son taux de resynthèse ; (3) Seuil Catécholamine (SCat), caractérisé par des augmentations des concentrations en épinephrine et

norépinephrine plasmatiques accrues et (4) Seuil ElectroMyoGraphique (SEMG), caractérisé par le recrutement progressif des unités motrices suivant leur taille, c.-à-d., des plus petites aux plus grosses (les petites ont un profil plus aérobie et les plus grosses ont un profil plus anaérobie, Beaver, Wasserman, & Whipp, 1986 ; Candotti et al., 2008 ; Faude, Kindermann, & Meyer, 2009 ; Gaskill et al., 2001 ; Kuznetsov, Popov, Borovik, & Vinogradova, 2015 ; Lucía, Sánchez, Carvajal, & Chicharro, 1999 ; Massé-Biron & Préfaut, 1994 ; McMorris et al., 2000 ; Pereira et al., 2013). Ces évolutions non linéaires mais conjointes à l'exercice d'intensité progressive suggèrent une étroite collaboration entre les métabolismes, nécessaire pour exprimer un VO_2max . Elles semblent également faire apparaître un fonctionnement récursif (conduisant à l'arrêt de l'exercice du fait d'une acidose progressive) où il reste difficile d'en déterminer la cascade des événements (un exemple d'approche : augmentation de l'intensité d'exercice → implication progressive des unités motrices plus grosses mais moins oxydatives → amplification de la glycolyse anaérobie → accumulation des ion H^+ diminuant le pH (acidose) → sollicitation de plus en plus importante des systèmes tampons de l'acidité générant du CO_2 (p. ex. bicarbonate) ou non (p. ex. lactate) → amplification de la production de CO_2 → surventilation → altération du fonctionnement biochimique des fibres et de leur efficacité → recrutement supplémentaire de fibres → fonctionnement récursif des étapes précédentes jusqu'à saturation des systèmes tampons et acidose incapacitante ; Candotti et al., 2008 ; Kuznetsov et al., 2015 ; Lucía et al., 1999).

Actuellement, il n'existe pas clairement de consensus autour de la définition précise de chacun de ces seuils, et de ce fait, plusieurs concepts de seuil, impliquant 1 ou 2 seuils en fonction de l'intensité, sont retrouvés dans la littérature (Faude et al., 2009 ; Pires, Lima-Silva, Oliveira, Rumenig-Souza, & Kiss, 2008). Faude et al. (2009) mettent en évidence ce problème pour les SL. Dans l'approche des 2 seuils, ils font état d'une première cassure de la relation linéaire (SL1) à l'exercice d'endurance d'intensité aérobie dit modérée et une seconde

plus marquée (SL2) à l'exercice d'endurance aérobie dit intense, le tout décrivant une courbe exponentielle. L'approche d'un seul SL fait référence au passage de la relation linéaire à exponentielle, souvent analogue au SL2 d'un point de vue physiologique, mais pouvant être compris entre SL1 et SL2 selon les auteurs. L'hétérogénéité des approches des seuils ou des choix d'intensité d'exercice dans les études, indépendamment de ces seuils, peinent en partie à mettre en évidence une relation entre les effets des entraînements sur la cognition en fonction des seuils physiologiques. Toutefois, cette approche qualitative du choix de l'intensité de l'exercice permet de placer un groupe d'individu dans des conditions physiologiques d'entraînement similaires avec plus de précision, ce qui à terme, pourrait aider à d'avantage comprendre les liens entre exercice physique et neuroplasticité.

2.3 Activité physique régulière aérobie chez les rongeurs

2.3.1 Intensité d'exercice

Quoi qu'il en soit, le principe clef de l'hypothèse métabolique est de solliciter de manière intense la fonction cardiorespiratoire par l'APRA sur une période conséquente (p. ex., 1 heure par jour, 5 fois par semaine, pendant 2 à 3 mois sur tapis de course ou roue de course pour les rongeurs, c.-à-d., les souris et / ou les rats). Bien que la littérature scientifique concernant l'APRA chez les rongeurs soit abondante, il est difficile de se représenter l'intensité d'exercice qu'il leur est induite. Toutefois, les études récentes de E, Burns, & Swerdlow (2014) et E, Lu, Burns, & Swerdlow (2013) suggèrent une intensité d'effort égale ou supérieure à un SL, validé chez l'animal et relatif à environ 75 % du VO_2max selon Billat, Mouisel, Roblot, & Melki (2005).

2.3.2 Activité physique régulière aérobie et fonctions mitochondriales

L'APRA semble moduler positivement le fonctionnement cérébral des mitochondries des rongeurs. En effet, Marques-Aleixo, Oliveira, Moreira, Magalhães, & Ascensão (2012) ont recensé 4 effets de cette activité sur les mitochondries du cerveau :

- Elle favoriserait la biogenèse mitochondriale en induisant une augmentation de l'expression des PGC-1 α (*Peroxisome Proliferator Activated Receptor- γ Coactivator 1- α*) par l'augmentation de l'expression des SIRT1 (*Silent Information Regulator T1*, une classe d'enzymes : les histones déacétylases). Le PGC-1 α est un co-activateur transcriptionnel qui serait impliqué dans la duplication de l'ADN mitochondrial (donc duplication des mitochondries) et dans l'augmentation du contenu des complexes de la chaîne respiratoire.
- Elle modulerait les fonctions mitochondriales par augmentation de l'activité des complexes I, III, IV et de l'ATPsynthase. Par exemple, l'augmentation de l'expression du BDNF (*Brain Derived Neurotrophic Factor*, une neurotrophine) agirait positivement sur l'activité du complexe I de façon concentration dépendante. Le BDNF lutterait aussi contre la surcharge de calcium dans la mitochondrie, diminuant ainsi le risque d'apoptose.
- Elle modulerait l'équilibre d'oxydoréduction de la chaîne respiratoire. Les bénéfices de l'APRA sur les fonctions mitochondriales semblent être accompagnés d'une augmentation des taux d'antioxydants SOD-1 et SOD-2 (*Superoxide Dismutase-1 et 2* ; Um et al., 2011) ainsi que d'une conséquente atténuation des marqueurs de dommages oxydatifs qui caractérisent le vieillissement. Il est supposé que les ERO générés pendant l'exercice seraient à l'origine de cette régulation. Il convient de noter que ces mêmes ERO représenteraient une des voies de signalisation des PGC-1 α . Néanmoins, d'autres études sont nécessaires pour préciser le rôle et les effets des ERO générés par l'exercice sur les mitochondries du cerveau.

- Chez les rongeurs âgés mais aussi modèles de la MA, l'APRA diminuerait les réponses excessives des signaux de l'apoptose cellulaire (Marques-Aleixo et al., 2012; Um et al., 2011), lesquels seraient dépendants du fonctionnement mitochondrial. A intensité élevée, l'APRA limiterait les processus d'apoptose au niveau des neurones et augmenterait leur résistance aux dommages cellulaires. Cette diminution serait induite par une réduction de l'expression des protéines pro-apoptotiques (les cytochromes c et les *Bcl-2 Associated X Protein* : Bax), des Cox-2 (*Cyclo-oxygénase-2*), de la Caspase-3 (déclencheur direct de l'apoptose) et une augmentation de l'expression des protéines anti-apoptotiques Bcl-2 (*B-cell lymphoma 2*). Parallèlement, l'augmentation du nombre de protéines chaperonnes de choc thermique HSP-70 (*Heat Shock Proteins*) témoignent d'une augmentation de la résistance des neurones aux dommages cellulaires (Um et al., 2011).

2.3.3 Activité physique régulière aérobie et neuroplasticité

L'APRA aurait des effets neuroplastiques. Le vieillissement normal entraîne une diminution du renouvellement des cellules du cerveau, (notamment dans l'hippocampe, Van Praag, Shubert, Zhao, & Gage, 2005). Toutefois, l'APRA semble favoriser la neurogénèse, aussi bien pour des jeunes rongeurs qu'âgés. Chez ceux âgés, elle permettrait d'augmenter le nombre de nouvelles cellules du cerveau jusqu'à des valeurs similaires à celles observées chez des jeunes sédentaires (Um et al., 2011 ; Van Praag et al., 2005). Cette modulation affecterait plus les neurones que les astrocytes. En effet, le vieillissement semble modifier la composition du cerveau en induisant une diminution du pourcentage de neurones, une augmentation de celui des astrocytes et des autres types de cellules. Néanmoins, l'APRA aurait tendance à augmenter la proportion des neurones sans modifier celle des astrocytes (Van Praag et al., 2005). Elle aurait aussi des effets angiogéniques chez les jeunes rongeurs (surface et périmètre des vaisseaux sanguins ; Van Praag et al., 2005) et âgés via une

augmentation des taux de VEGF (*Vascular Endothelial Growth Factor*, un facteur angiogénique) et une augmentation de la densité des micro-vaisseaux (Ding et al., 2006). Chez les rongeurs âgés et modèles de la MA, l'APRA stimulerait la neurogénèse par l'augmentation des taux des neurotrophines : le BDNF, le NGF (*Nerve Growth Factor*) et le CREB (*C-AMP Response Element-binding protein*, Um et al., 2011). Ces neurotrophines joueraient un rôle dans la survie des neurones, la croissance et la différenciation des nouveaux neurones.

2.3.4 Activité physique régulière aérobie et marqueurs de la Maladie d'Alzheimer

Chez les rongeurs modèles de la MA, l'APRA semble augmenter la clairance des peptides β -amyloïdes (Adlard, Perreau, Pop, & Cotman, 2005 ; Belarbi et al., 2011 ; Nichol et al., 2008 ; Um et al., 2011), les taux de plaques séniles (Um et al., 2011) et diminuer les niveaux des protéines tau pathologiques (Belarbi et al., 2011 ; Um et al., 2011). Chez les rongeurs âgées mais aussi chez les modèles de la MA, l'APRA réduirait les taux de peptides β -amyloïdes 42 (type de peptide β -amyloïdes soluble le plus toxique) et les niveaux de phosphorylation des protéines tau via la régulation des voies de signalisation : des MAPKs (*Mitogen-Activated Protein Kinase*) par augmentation de la phosphorylation de l'ERK (*Extracellular signal-Regulated Kinases*) et diminution de la phosphorylation des p38 MAPK et des JNK (*C-Jun_N-terminal_Kinases*) ; des PI3K / Akt / GSK-3 par augmentation de la phosphorylation du PI3K (*Phosphoinositide 3-Kinase Inhibitor*), des Akt (*Protein Kinase B*) et diminution de l'activité des GSK-3 (*Glycogen Synthase Kinase 3* ; Um et al., 2011). Il convient de noter que, dans la MA, l'hyperphosphorylation des protéines tau serait directement et indirectement induite par l'accumulation des peptides β -amyloïdes et la surproduction des ERO induis par ces A β (Huang & Jiang, 2009, Figure 1). Pour rappel, la protéine tau est une protéine associée aux microtubules du cytosquelette des neurones et joue

un rôle crucial dans leur stabilisation. Les mécanismes réversibles de phosphorylation de cette protéine interviennent dans la régulation des structures neuronales. Dans des cerveaux normaux, le degré de phosphorylation de tau soluble est de 2 à 3 moles de phosphate par mole de protéine. Les kinases (en partie celles citées dans ce paragraphe) seraient impliquées dans la régulation de la phosphorylation de tau. Dans la MA, le degré de phosphorylation est 3 fois plus important. Nous parlons d'hyperphosphorylation, conduisant à une accumulation de fibrilles à l'intérieur du neurone (appelées paires de filaments appariées en hélice) et contribuant au blocage de la transmission axonale (Huang & Jiang, 2009). De part ces effets sur l'A β , le stress oxydatif et la régulation des kinases, l'APRA d'intensité élevée stopperait ce processus d'hyperphosphorylation et rétablirait des degrés normaux de phosphorylation (Um et al., 2011).

Sur le plan cognitif, l'APRA améliorerait les fonctions cognitives chez les rongeurs âgés et modèles de la MA (Adlard et al., 2005 ; Belarbi et al., 2011 ; Nichol et al., 2008 ; Um et al., 2011 ; Van Praag et al., 2005).

2.3.5 Activité physique régulière aérobie et réponse immunitaire

L'APRA semble diminuer les processus inflammatoires et immunitaires induits par la MA. Bien qu'insuffisante, la réponse immunitaire lors de la MA se caractérise par l'activation des microglies et la phagocytose des A β . De plus, les cytokines de ces microglies et les marqueurs pro-inflammatoires (l'IL-1 β : *Interleukin-1 beta* et le TNF α : *Tumor Necrosis Factor*) deviennent toxiques quand ils sont exprimées chroniquement (Nichol et al., 2008). Chez les rongeurs modèles de la MA, l'APRA d'intensité élevée diminuerait la réponse chronique pro-inflammatoire (diminution des taux de IL-1 β et TNF α) et augmenterait la réponse inflammatoire adaptative (augmentation des IFN- γ : *Interférons* ; des MIP-1 α : *Macrophage Inflammatory Proteins alpha* ; des MHC II : *Major Histocompatibility*

Complex II ; et des CD 40, Nichol et al., 2008). Ces auteurs supposent une intervention des monocytes périphériques vers le cerveau pour dégrader les A β .

2.3.6 Activité physique régulière aérobie et effets de la composante anaérobie liée à l'exercice

Il convient de noter que, la part anaérobie durant l'exercice pourrait expliquer en partie les effets de l'APRA sur une grande partie des effets décrits ci-dessus. Plus précisément, le métabolisme du lactate, notamment sa production, sa réutilisation en tant que métabolite au niveau cérébral et l'expression de ses transporteurs, les MCT (*Monocarboxylate transporter isoforms*), semble intervenir dans les mécanismes de la neuroplasticité (p. ex., multiplication des mitochondries, voie de signalisation par les ERO, neurogénèse, angiogénèse, régulation des kinases (Brooks, 2009 ; E et al., 2014, 2013).

2.4 Activité physique régulière aérobie chez le sujet âgé et présentant une Maladie Neurodégénérative

Comment contrôler l'intensité d'exercice chez l'homme ? La mesure directe de la VO₂ nécessite du matériel onéreux et très encombrant au niveau des voies ventilatoires. En revanche, du fait d'une relation linéaire positive entre le VO₂ et la Fréquence Cardiaque (FC, Massé-Biron & Préfaut, 1994), les cardio fréquencemètres sont utilisés pour suivre l'intensité d'exercice. Usuellement, c'est la FC dite de réserve (FCr, relative à la plage d'élévation de la FC entre le repos et le maximum) qui est utilisée pour sa plus grande fiabilité à travers la méthode Karvonen (Larry, Jack, & David, 2015). Pour précision, à l'exercice sous maximal (inférieur au VO₂max), l'intensité d'exercice est considérée comme légère pour des valeurs de $FCr \leq 39 \%$; modérée pour des valeurs comprises entre 40 % et 59 % ; intense pour des

valeurs $\geq 60\%$; et maximale (soit $VO_2\text{max}$) pour des valeurs de FCr maximale (Wilkins, 2013).

Il existe très peu d'études reprenant le principe clef de l'APRA chez les sujets présentant une MA. En effet, chez la personne ayant un vieillissement normal, l'APRA, si elle est suffisamment intense (entre 60 et 80 % de la FCr, 3 à 5 fois par semaine, 30 minutes à 1 heure en continu par séance, pendant 3 mois minimum), provoque une amélioration des fonctions cognitives (Dustman et al., 1984), une réorganisation des réseaux neuronaux vers un mode de fonctionnement similaire à celui des jeunes adultes (Voss et al., 2010) et une augmentation du volume cérébral (notamment au niveau des lobes préfrontal, frontal et l'hippocampe, Colcombe et al., 2006 ; Erickson et al., 2011) *via* les mécanismes d'angiogénèse (Bullitt et al., 2009 ; Murrell et al., 2013) et de neurogénèse (Erickson et al., 2012). Le premier mois du programme, les participants sont généralement entraînés à 50 % de la FCr (soit environ 50 % de l'aptitude aérobie maximale), sur des durées d'exercice augmentant progressivement pour atteindre 40 à 60 minutes en continu par séance (Colcombe et al., 2006 ; Murrell et al., 2013 ; Voss et al., 2010). Ensuite, l'intensité est progressivement augmentée jusqu'à 70 voire parfois 80 % de la FC de réserve (soit environ jusqu'à 70 ou 80 % de l'aptitude aérobie maximale).

Ces deux intensités cibles (50 % et 70 – 80 % de l'aptitude maximale aérobie) semblent respectivement proches des zones d'atteinte des SV1 et SV2 (également les SL1 et SL2). La détermination de ces seuils semble plus précise et efficace pour améliorer le $VO_2\text{max}$ chez le sujet âgé que des données de FCr jugées souvent comme arbitraires. En effet, le SV1 serait justement à utiliser chez le sujet âgé non entraîné (Fabre, Massé-Biron, Ahmaidi, Adam, & Préfaut, 1997 ; Massé-Biron & Préfaut, 1994). Le SV2 serait à utiliser chez le sujet âgé entraîné (Massé-Biron, Mercier, Adam, & Préfaut, 1990).

Malheureusement, chez les sujets présentant un MCI ou une MA, la plupart des études s'intéressant à l'APRA n'impose pas spécifiquement une intensité d'exercice (voir pour revue (Yu, 2011 et Tableau 1). Toutefois, ces interventions rapportent des effets positifs sur les symptômes dépressifs, l'humeur, le niveau global de cognition, les activités de vie quotidienne (Venturelli, Scarsini, & Schena, 2011) et les performances physiques (Roach, Tappen, Kirk-Sanchez, Williams, & Loewenstein, 2011 ; Venturelli et al., 2011 ; Yu, Savik, Wyman, & Bronas, 2011). Seulement deux études chez les sujet présentant une MA ont contrôlé spécifiquement l'intensité d'exercice pour stimuler de manière intense la fonction cardiorespiratoire (c.-à-d. 70 % de la FC maximale, Palleschi et al., 1996 ; et 70 % de la FCr, Kemoun et al., 2010). Ces études rapportent des améliorations significatives sur les différentes fonctions cognitives (Kemoun et al., 2010 ; Palleschi et al., 1996) et sur l'efficacité de la marche (Kemoun et al., 2010). Enfin, Baker et al. (2010) proposent l'APRA très intense mais uniquement chez les sujets présentant un MCI. Dans cette étude, l'APRA d'intensité très élevée (jusqu'à 85 % de la FCr) améliore les fonctions exécutives, l'aptitude maximale aérobie mesurée (VO_2^{Peak}) et l'expression des facteurs neurotrophiques, notamment le BDNF et l'IGF-1 (*Insulin-like Growth Factor 1*). De plus, il aurait tendance à diminuer les niveaux plasmatiques des peptides β -amyloïdes 42.

Tableau 1 : Récapitulatif des études portant sur l'APRA dans le cadre du traitement de la MA. La partie « APRA et MA » expose les études qui ne contrôlent pas l'intensité d'effort à l'entraînement. La partie « APRA d'intensité élevée et MA » expose les études qui imposent l'exercice intense.

Auteurs	Design population /	Intervention	Principaux résultats
APRA et MA			
Roach et al., 2011	RCT MA N = 82 âge : 88 MMSE : 10,1	16 semaines Groupe exercice : APRA (marche) + Entraînement en force, souplesse et mobilité, 5 fois 1 heure par semaines Groupe marche : APRA, 5 fois 30 minutes par semaine Groupe social : conversation, reminiscence thérapie, exercice cognitif, 5 fois 30 minutes par semaine	Amélioration de la mobilité pour le groupe exercice (ACIF) Diminution de la mobilité pour les groupes marche et social Pas de modification de l'aptitude aérobie pour les trois groupes (6MiWT)
Venturelli et al., 2011	Intervention pré-test post-test MA N = 82 âge : 84 MMSE : 12,5	24 semaines Groupe exercice : APRA, 4 fois 1 heure par semaine ("marche à son propre rythme"). Groupe contrôle : activités ludiques et thérapie musicale	Pour le groupe exercice : Amélioration de la performance aérobie (6MiWT) Amélioration dans les ADL (Barthel index) Maintien du niveau global cognitif (MMSE) Pour le groupe contrôle : Diminution du niveau global cognitif et de la performance aérobie Pas de changement dans les ADL
APRA d'intensité élevée et MA			
Palleschi et al., 1996	Intervention pré-test post-test MA N = 15 âge : 74 MMSE : 18 à 21	3 mois APRA, 3 fois 30 minutes par semaine, sur vélo dont 20 minutes à 70 % de la FC max Pas de groupe contrôle	Amélioration des fonctions cognitives
Kemoun et al., 2011	RCT MA N = 33 âge : 82 MMSE : 12,75	15 semaines Groupe exercice : APRA, 3 fois 1 heure par semaine, (marche dont 40 minutes à 60-70 % de la FCr) Groupe contrôle : soins courant	Pour le groupe exercice : Amélioration du niveau global de cognition (ERFC) Amélioration de la performance à la marche (10 mètres) Relation linéaire positive entre ces deux paramètres Pour le groupe contrôle : Diminution aux tests cognitif et physique
Baker et al., 2010	RCT MCI M = 33 âge : 70 MMSE : 27,45	6 mois Groupe exercice : APRA, les 6 premières semaines, augmentation progressive de l'intensité d'entraînement : de 4 fois 45 minutes par semaine à 75 % de la FCr à 4 fois 60 minutes à 85 % de la FCr, puis maintien jusqu'à la fin (tapis de course, bicycle, rameur, vélo elliptique) Groupe contrôle : programme d'étirements	Pour le groupe exercice : Amélioration de l'aptitude aérobie (test d'effort aérobie) et des processus exécutifs Régulation à la hausse des facteurs neurotrophiques (BDNF et IGF-1) Tendence à la diminution des taux plasmatique de l'Aβ Pour le groupe contrôle : Tendence à la diminution de l'aptitude cardiorespiratoire, des fonctions cognitives, de l'expression des facteurs neurotrophiques Tendence à l'augmentation des taux plasmatique de l'Aβ

6MiWT = 6 Minutes Walking Test ; ACIF = The acute care index of function ; ADL = Activity of Daily living ; APRA = Activité Physique Régulière Aérobie ; BDNF = Brain-Derived Neurotrophic Factor ; ERFC = Évaluation Rapide des Fonctions Cognitives ; FC = Fréquence Cardiaque ; FCr = Fréquence Cardiaque de réserve ; IGF-1 = Insulin-like Growth Factor 1 ; MA = Maladie d'Alzheimer ; MCI = Mild Cognitive Impairment ; MMSE = Mini Mental State Examination.

Rappels : FCr = FCmax – FCrepos. Intensité faible ≤ 39 % FCr ; 40 % ≤ Intensité modérée ≤ 59 % : Intense ≥ 60% FCr

3 L'hypothèse de l'enrichissement cognitif

3.1 Présentation de l'hypothèse

Dans une revue de littérature conséquente, Hertzog et al. (2008) émettent une hypothèse très globale sur la neuroplasticité : « l'ensemble des comportements d'un individu (incluant l'activité cognitive, sociale, physique et d'autres comportements) va avoir un impact significativement positif sur le niveau de fonctionnement effectif de notre cerveau aux âges les plus avancés ». Cette théorie ne se limite pas au principe de « Use it or Lose it » (« sers-t-en ou tu le perds ») ou à la théorie de la réserve cognitive (capacité du cerveau, avec notamment l'avancée dans l'âge, à résister aux dommages cérébraux sur le plan fonctionnel, Stern, 2012, 2013), mais elle s'intègre dans un processus évolutif continu où : (1) les niveaux de performances cérébrales, lesquels sont malléables, peuvent s'améliorer en fonction du mode de vie même à des âges très avancés et (2) il existe toutefois des limites hautes liées au vieillissement biologique. Comme résumé dans la Figure 2 (partie du graphique grisée), les individus ont un certain degré de plasticité potentiel relatif à l'amélioration ou à la régression du fonctionnement de leur cerveau tout au long de leur vie (en dehors d'accidents neurotraumatiques aigus). Cette plasticité va être influencée par les différents facteurs environnementaux (c.-à-d. les comportements d'un individu), lesquels vont caractériser un niveau d'enrichissement cognitif. Plus l'environnement d'un individu va être riche en stimulations, plus il favorisera la neuroplasticité, et inversement. Hertzog et al. (2008) ont modélisé 4 profils d'individu (Figure 2). Le profil A (en rouge) correspond à un niveau d'optimisation des fonctions d'un individu tout au long de sa vie, ce qui l'amène à des niveaux de performances hautes et un franchissement du seuil fonctionnel très tard. Le profil D (en jaune) correspond à des comportements mal adaptés menant à un affaiblissement significatif du niveau cognitif, un déclin précipité et une démence très tôt. Le profil B (en bleu) correspond à une situation intermédiaire où l'individu a un style de vie relatif au travail

et aux loisirs modérément enrichi entre le début de l'âge adulte et l'entrée dans l'âge avancé. Enfin, le profile C (en vert) correspond à un individu engageant des comportements d'enrichissement cognitif, non manifestés précédemment, à l'âge avancé, traduisant une évolution du niveau cognitif, de la neuroplasticité et un recul du franchissement du seuil fonctionnel.

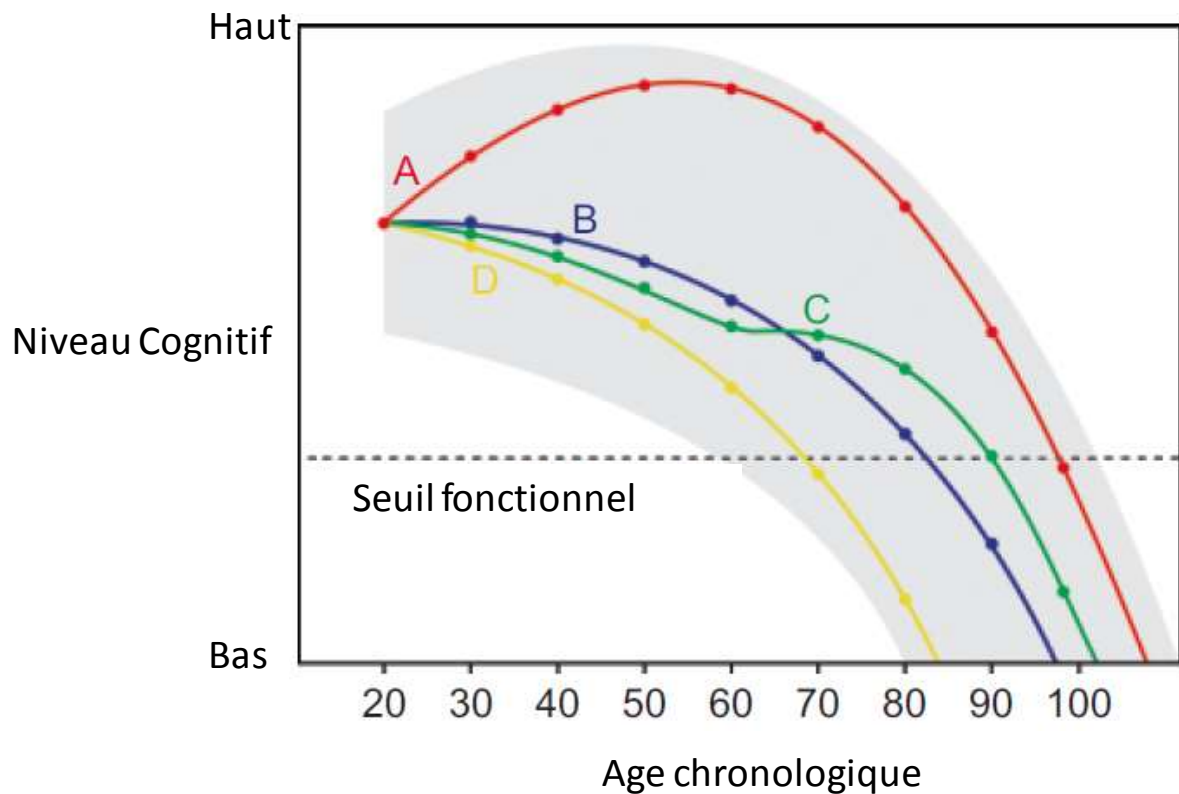


Figure 2 : Illustration de l'hypothèse de l'enrichissement cognitif. Traduite et adaptée de Hertzog et al. (2008). Les pointillés représentent le seuil fonctionnel en dessous duquel les troubles cognitifs peuvent entraîner une démence.

3.2 Les comportements d'enrichissement

En dehors de la démarche médicamenteuse et alimentaire, Hertzog et al. (2008) ont établi un état de l'art relatif à chaque comportement d'enrichissement, lequel pouvant modifier le processus de vieillissement à l'âge avancé et au cours d'une démence. Sommairement, ces comportements regroupent :

- Le développement de compétences : ce comportement fait référence au niveau d'expertise des cognitions, aux programmes d'entraînement des cognitions, aux stratégies d'optimisation des cognitions. Il en ressort principalement l'idée que plus une stimulation est spécifique à une fonction cognitive, plus les effets vont lui être spécifiques et peu transférables. Toutefois, la mémoire de travail et les fonctions exécutives semblent à privilégier. Aussi, les gains peuvent être maintenues sur une longue période. Dans le cadre de la MA, ces gains sont limités et conditionnés par une aide humaine externe.
- La stimulation mentale : ce comportement fait référence aux différentes activités intégrées à notre vie qui ont un potentiel stimulant (le niveau d'éducation, le travail, le jeu, la lecture, la télévision, les activités culturelles, etc.). Il semble en ressortir que plus un individu est engagé dans ces activités, plus les effets peuvent être préventifs d'une démence (à quelques exceptions près comme la télévision).
- L'engagement social : ce comportement fait référence à la quantité des connections sociales (p. ex., nombre de contacts permanents), à leurs qualités (p. ex., superficielles, amis, proches, familles) et à l'engagement dans des activités sociales (p. ex., sorties en groupes, participations au fonctionnement interne d'un groupe).
- L'activité physique : approche issue de l'hypothèse métabolique.
- Le stress psychologique chronique : ce comportement fait référence au névrosisme / neuroticisme (trait de personnalité), relatif à une affectivité négative et à travers des états de dépression, d'anxiété, de colère et de honte. Bien évidemment, plus ce comportement est exprimé et de manière extrême à l'âge avancé, plus le facteur de risque de développer une démence est important.
- Les attitudes et croyances positives : ce comportement fait référence à la fois au sentiment de contrôle (croyance que nos comportements influent directement les buts à atteindre), au sentiment d'auto-efficacité défini par Bandura (1997 ; croyance en nos propres capacités

pour atteindre un but particulier dans une situation particulière), mais aussi à d'autres composantes comme la fixation de but, la planification de but, l'autorégulation émotionnelle (contrôle des affects négatifs et positifs, motivation), certains traits de personnalité comme l'ouverture à l'expérience (être plus entraîné à participer à de nouvelles activités) ou le caractère consciencieux, la « positive attitude » et la résilience (stratégies de résistance au stress de l'existence). Il en ressort globalement, que les individus qui sont optimistes, agréables, ouverts à l'expérience, consciencieux, positivement motivés et orientés vers des buts sont plus susceptibles d'expérimenter un vieillissement réussi, de tirer avantage des opportunités, de faire face plus efficacement aux circonstances de la vie, de réguler plus efficacement les réactions émotionnelles aux événements, de maintenir un sentiment de bien-être et de satisfaction face aux challenges.

3.3 Vers une stratégie optimale et multimodale : l'Environnement Enrichi

3.3.1 Approche générale de l'Environnement Enrichi chez l'animal

Notre vie n'est pas conditionnée que par un seul des facteurs cités précédemment mais par la résultante de l'ensemble de ces facteurs, lesquels peuvent être interdépendants. De ce fait, dans l'optique d'établir une stratégie de stimulation la plus efficace possible, plus les comportements d'enrichissement sont combinés, plus les effets sur les cognitions et la neuroplasticité devraient être positifs. Le meilleur modèle semble être, à deux objections près, l'Environnement Enrichi (EE) utilisé dans les études animales. Chez les rongeurs (c.-à-d. les souris et / ou les rats), cette stratégie favorise principalement les stimulations cognitives (p. ex., utilisation de jouets, jeux), physiques (p. ex., mini attractions) et sociales (p. ex., mettre plus d'animaux dans une plus grande cage). Quels sont les objections ? La première est que l'étude de cette stratégie chez l'animal, très documentée concernant les effets biologiques et cognitifs, est moins fournie pour des rongeurs âgés, modèles ou non d'une MN (voir pour

revue complète Sale, Berardi, & Maffei, 2014). Ainsi, la quantité d'information sur les effets de cette stratégie aux âges avancés et à des stades neurodégénératifs plus ou moins sévères est moins importante. La seconde objection est la présence ou non d'APRA. En effet, contextuellement, l'APRA fait partie intégrante de l'EE. Toutefois, sa présence semble être un facteur explicatif « crucial » des effets de l'EE, à un point où son intégration dans cette stratégie fait débat aujourd'hui. Par exemple, Fabel et al. (2009) suggèrent que les effets de l'EE et de l'APRA sont différents mais peuvent être additifs en cas de combinaison. Aussi, Mustroph et al. (2012) mettent en évidence que les effets d'un EE sans APRA n'ont pas les mêmes effets qu'un EE avec APRA, lequel se rapprocherait plus d'un entraînement classique de type APRA. De ces faits, en essayant de regrouper uniquement les études sur l'EE sans APRA, le nombre d'information pertinente se retrouve à nouveau diminué.

3.3.2 Environnement Enrichi limitant l'impact de l'activité physique aérobie :

quelques données chez l'animal

3.3.2.1 Neuroplasticité

L'EE augmenterait le nombre de nouvelles cellules chez les rongeurs jeunes et âgés sans renverser les effets du vieillissement sur la différenciation neurale. La majorité des nouvelles cellules expriment un phénotype neuronal et en minorité un phénotype gliale (Speisman et al., 2013). Les études comparant rongeurs âgés et modèles de la MA confirment la baisse accrue du renouvellement cellulaire des populations malades (Valero et al., 2011). Néanmoins, l'EE semble augmenter similairement la neurogénèse chez les populations âgées et modèles de MA, notamment par une augmentation du nombre de neurones (Valero et al., 2011). La MA semble aussi induire une diminution des astrocytes dans les premiers stades de la maladie (Beauquis et al., 2012). Cette diminution s'accompagne d'une augmentation du volume et de la taille des ramifications pour les cellules présentes dans les plaques. Pour les

cellules plus éloignées des plaques, la taille des ramifications augmente mais le volume diminue. L'EE favoriserait un retour à la morphologie des astrocytes observée chez les rongeurs sains (Beauquis et al., 2013). De plus, l'EE favoriserait l'augmentation des taux de BDNF (Lazarov et al., 2005).

3.3.2.2 Fonctions mitochondriales

Quelques pistes suggèrent un effet de l'EE sur la diminution de la surcharge oxydative. Si chez les rongeurs âgés, l'EE semble ne pas modifier l'expression des enzymes antioxydantes telles que les SOD-1 et GPX-1 (*la glutathion peroxydase*), la diminution des taux de malondialdéhyde semble témoigner d'un stress oxydant moins important (Kumar, Rani, Tchigranova, Lee, & Foster, 2012).

3.3.2.3 Marqueurs de la Maladie d'Alzheimer

Les études sur les effets de l'EE sur la charge amyloïde dans la MA étudient différentes conditions d'enrichissement. De manière générale, l'EE permet de diminuer les taux de peptides A β (Beauquis et al., 2013 ; Verret et al., 2013) et de freiner la progression des plaques séniles (Beauquis et al., 2013 ; Lazarov et al., 2005). Ces marqueurs de la MA vont être plus atténués suite à un EE de 3 heures par jour par rapport à 1 heure (Lazarov et al., 2005). Aussi, Verret et al. (2013) rapportent sur des rongeurs modèles de MA des effets nettement plus importants de l'EE à des stades précoces (sans symptômes neurobiologiques). Enfin, Beauquis et al. (2013) ont réarrangé tous les 2 jours la cage utilisée pour présenter l'EE afin de renouveler les stimulations cognitives des rongeurs.

Sur le plan cognitif, l'EE améliorerait les fonctions cognitives (Kumar et al., 2012 ; Lazarov et al., 2005 ; Speisman et al., 2013 ; Valero et al., 2011 ; Verret et al., 2013).

Néanmoins, ces effets sont très limités aux stades les plus avancés de la maladie (Lazarov et al., 2005; Verret et al., 2013).

3.3.3 Environnement Enrichi chez le sujet âgé et présentant un MCI ou une MA

Inversement aux études animales, il existe très peu d'études reprenant le principe de l'EE pour en étudier ses effets sur la cognition et la neuroplasticité. Elles proposent d'associer parallèlement ou de combiner deux à trois types de stimulations : l'entraînement physique (exercices d'endurance et de renforcement musculaire), l'entraînement cognitif (exercices cognitifs et techniques de mémorisation) et l'engagement social (conversations et entraînement en groupe). Des études rapportent, chez des sujets présentant une MA, des effets positifs sur l'humeur (Arkin, 2007), l'anxiété, l'apathie, la qualité de vie (Maci et al., 2012), la dépression et les aptitudes physiques (Arkin, 2007 ; Arkin, 2003). De plus, ces interventions mixtes freineraient le déclin cognitif (Arkin, 2003). Toutefois, comme pour l'animal, il est difficile pour ces exemples d'établir si les EE utilisés intègrent une APRA et à quelle intensité du fait du manque de quantification de l'intensité de l'activité physique. Plus récemment, Sacco et al. (2015) ont comparé chez des sujets présentant un diagnostic de MCI les effets d'un entraînement aérobique seul à un entraînement aérobique combiné à de la stimulation cognitive (60 % de la FCr, 2 fois 20 minutes par semaine, pendant 3 mois). Leurs résultats ont montré une amélioration des facultés d'inhibition (à travers le paradigme du Go-No Go) uniquement pour l'entraînement aérobique combiné à la stimulation cognitive.

3.3.4 Résumé des effets globaux de l'Environnement Enrichi intégrant l'activité physique de type aérobie

La Figure 3 met en évidence les principaux effets neuromoléculaires et cognitifs de l'EE dans son approche globale (incluant l'APRA).

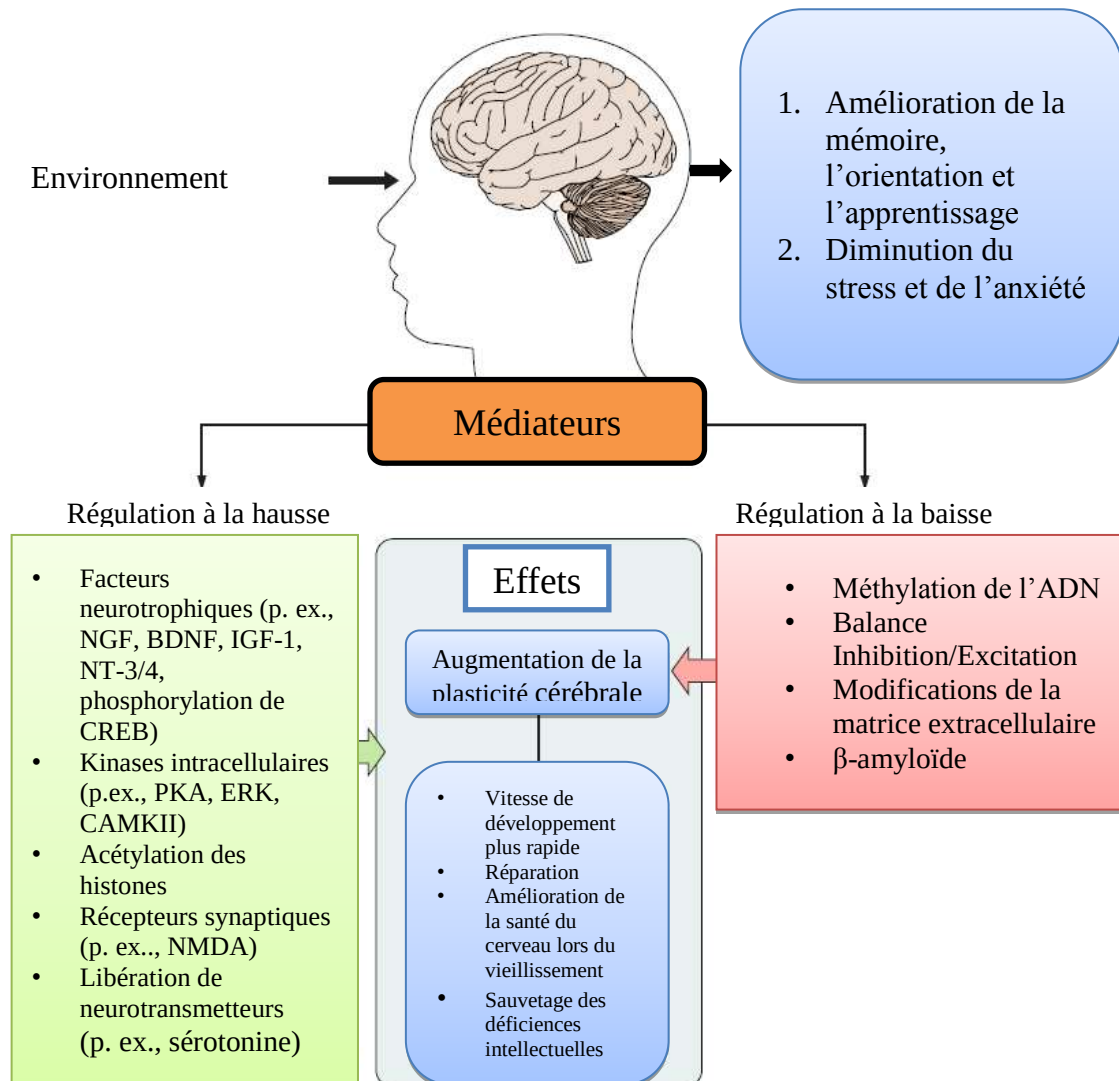


Figure 3 : Approche globale des effets de l'EE incluant l'APRA. Adapté de Sale et al. (2014).

ADN : Acide DésoxyriboNucléique ; BDNF = Brain Derived Neurotrophique Factor ; CaMK II = Ca²⁺/calmodulin-dependent protein kinase II ; CREB = C-AMP Response Element-binding protein ; ERK = Extracellular signal-Regulated Kinases ; IGF-1 = Insulin-like Growth Factor 1 ; NGF = Nerve Growth Factor ; NMDA = N-Methyl-D-aspartate ; NT = NeuroTrophine ; PKA = Protéine Kinase A.

4 Limites d'application de l'Activité Physique Régulière de type Aérobic et l'Environnement Enrichi chez les sujets âgés et présentant un diagnostic de troubles cognitifs légers ou une Maladie d'Alzheimer

Malgré la multiplication des études chez les sujets présentant une MA, une très faible proportion semble appliquer les méthodes d'utilisation de l'APRA d'intensité élevée ou de l'EE, établis à partir des interventions sur les rongeurs et les personnes âgées. La principale raison est d'ordre chronologique. En effet, la plupart des programmes d'entraînement pour des patients présentant une MA ont été réalisés au début des années 2000 (Fang Yu, 2011), avant la parution des études renforçant la pertinence de l'APRA et de l'EE dans le vieillissement et les MN. Une autre limite est le caractère peu motivant et insuffisamment adaptable des protocoles qui, de ce fait, ne favorisent pas l'engagement des patients au quotidien. Ce point est important dans la mesure où l'apathie, définie comme un trouble de la motivation (Marin, 1990), est un trouble du comportement très fréquent dans la MA (Mulin et al., 2011). L'apathie se manifeste au niveau des comportements (p. ex., perte d'initiative), des cognitions (p. ex., perte d'intérêt) et des émotions (p. ex., émoussement affectif). Le défaut d'initiative, en particulier, rend souvent nécessaire l'intervention d'un tiers, notamment l'aidant familial ou professionnel, pour superviser chaque séance, motiver le patient et garantir la meilleure adhésion possible aux programmes d'entraînement (Yu, 2011 ; Steinberg, Leoutsakos, Podewils, & Lyketsos, 2009 ; Tappen, Roach, Applegate, & Stowell, 2000). Concernant plus spécifiquement l'entraînement aérobic, la revue de Schutzer & Graves (2004) met en évidence un certain nombre de barrières à l'adhérence de cette méthode telles que les problèmes de santé physique (p. ex., mobilité, équilibre, douleurs), la méconnaissance des patients et aidants sur le lien entre stimulation cardiorespiratoire et santé, le manque de suivi des patients par les spécialistes, la monotonie induite par l'entraînement aérobic et l'éloignement du domicile des centres de réentraînement. Concernant l'EE, la principale

limite méthodologique est la difficulté de proposer de façon simultanée et efficace des stimulations physiques, cognitives et sociales.

Une question se pose alors, comment rendre ces méthodes plus attractives pour des personnes en perte de motivation ? Même chez le sujet âgé, l'utilisation des JV comme motivateur est suggérée depuis près d'une décennie aussi bien au niveau de l'APRA (Schutzer & Graves, 2004) que de l'EE (Hertzog et al., 2008).

5 Les Jeux Vidéo comme modèle d'Environnement Enrichi chez l'homme

L'idée de percevoir le JV comme un EE à part entière est plus récente (Anderson-Hanley et al., 2012 ; Maillot, Perrot, & Hartley, 2012). Cette idée émane du fait que les JV seraient intrinsèquement divertissants, riches en émotions, jouables à plusieurs et peuvent intégrer de l'exercice physique. Aussi bien chez le sujet jeune qu'âgé, une pratique régulière aux JV semble favoriser la neuroplasticité (Basak, Voss, Erickson, Boot, & Kramer, 2011 ; Colom et al., 2012 ; Hyun et al., 2013 ; Kühn, Gleich, Lorenz, Lindenberger, & Gallinat, 2014). Toutefois, la stimulation cognitive induite par les JV semble dépendre du type de JV (Powers, Brooks, Aldrich, Palladino, & Alfieri, 2013 ; Toril et al., 2014). Les plus connus et les plus testés expérimentalement regroupent les JV d'action, notamment ceux de tir à la première et troisième personne (p. ex., « Counter Strike[®] », « Call of Duty[®] », « Medal of Honor[®] »). Le joueur déplace son avatar pour éviter des projectiles tout en tirant les siens pour détruire des cibles. Une pratique régulière de ce type de JV semble bénéfique pour l'attention visuospatiale et sélective (Belchior et al., 2013 ; Dye, Green, & Bavelier, 2009a ; Shawn Green & Bavelier, 2003 ; Green & Bavelier, 2007), les processus de traitement de l'information (Dye, Green, & Bavelier, 2009b) et la mémoire de travail (Colzato, Van den Wildenberg, Zmigrod, & Hommel, 2013). Les JV de réflexion (« Puzzle video games ») sont également très connus, notamment du fait que certains se sont revendiqués comme « coach

cérébral ». Le joueur doit résoudre des problèmes de type « casse-tête », énigme, logique. Les plus répandus sont ceux compilant des mini-jeux reliés à un scénario principal (p. ex., « Brain Age™ », « Professeur Layton™ »). Une pratique régulière de ce type de JV semble bénéfique pour les fonctions exécutives et les processus de traitement de l'information (Nouchi et al., 2012).

Les JV peuvent également induire de l'exercice physique (exergames). Les plus connus (p. ex., « Wii Sport™ », « Kinect Sport™ ») utilisent des capteurs de mouvement, comme la Wii™ et la Kinect™. Des premières études chez les personnes âgées montrent des effets positifs de ces exergames sur les émotions (meilleure santé mentale, réduction des symptômes de dépression, Rosenberg et al., 2010), les aptitudes physiques (amélioration de la force, souplesse, performance aérobie, Maillot et al., 2012) et les fonctions cognitives (notamment les processus exécutifs, Maillot et al., 2012 ; Rosenberg et al., 2010, Tableau 2). Néanmoins, ces exergames commerciaux semblent induire une APRA d'intensité légère à modérée (41,5 % de la FCr au maximum, Maillot et al., 2012 ; Taylor et al., 2012). Les limitations de capture du mouvement en profondeur en seraient la principale raison. De ce fait, les exergames sur Wii™ et Kinect™ se jouent avec des mouvements stationnaires impliquant principalement les membres supérieurs (Taylor et al., 2012). Les exergames peuvent également utiliser d'autres systèmes. Par exemple, les « Espresso® HD Bike » sont des vélos d'appartement reliés à un JV proposant de réaliser des courses de vélo (Cybercycle). Anderson-Hanley et al. (2012) ont testé ce système chez le sujet âgé (dont certains présentaient un diagnostic de MCI). Une pratique régulière pendant trois mois de ce système à travers une APRA intense (60 % de la FCr, 5 fois 45 minutes par semaines) induirait une amélioration des processus exécutifs et une régulation à la hausse des marqueurs biologiques de la neuroplasticité (BDNF sanguin), supérieure à celle d'un entraînement sur vélo d'appartement seul aux mêmes intensités (Tableau 2).

Le déclin cognitif associé aux MN pose des limites d'utilisation des JV pour les sujets présentant une démence (Robert et al., 2014). En effet, les JV sont conceptualisés pour des personnes jeunes et en bonne santé et très peu de ces JV semblent utilisables pour des sujets présentant une démence (McCallum & Boletsis, 2013). De ce fait, les récentes recommandations suggèrent aux professionnels de la santé et aux industriels du JV de concevoir ensemble des JV spécifiquement pour les sujets âgés et présentant une démence (les SG, Robert et al., 2014). Il existe très peu de SG pour cette population. Par exemple, « MINWII » (Benveniste et al., 2012), est un SG de musique sur WiiTM qui semble destiné aux patients atteints de la MA jusqu'à un stade démentielle modéré. Egalement, « Kitchen and cooking » (Manera et al., 2015), est un SG jouable sur tablette tactile et basé sur la réalisation par étape de recettes de cuisine. A notre connaissance, avant le début de la présente thèse et de la conception d'X-Torp, il n'existait pas de SG induisant de l'exercice physique pour cette population. Nous appellerons ce type de jeu Serious exerGame (SeG).

Tableau 2 : Récapitulatif des études portant sur l'APRA dans le cadre des exergames. La partie « Dépense énergétique et exergame » présente l'étude évaluant la dépense énergétique induite par ces jeux vidéo. La partie « Exergames et vieillissement » expose les études qui proposent un entraînement sur ces jeux vidéo. La partie « Serious Game, Exergame, APRA d'intensité élevée et vieillissement » présente l'étude qui propose un entraînement aérobie intense sur serious game.

Auteurs	Design / population	Intervention	Principaux résultats
Dépense Énergétique et exergames			
Taylor et al., 2012	Etude transversale personnes âgées N = 19 âge : 71	Mesure de la DE sur <i>Wii sports</i> (bowling assis et debout, tennis, boxe), <i>Kinect sports</i> (bowling assis et debout, tennis de table, boxe) et <i>Kinect tai chi</i> 20 minutes de familiarisation, 5 minutes d'activité par jeu avec 5 minutes de récupération entre chaque jeu	DE faible sur jeux vidéo : de 1,46 à 2,97 METs Perception d'effort faible à modérée (RPE scale) DE identique assis debout
Exergames et vieillissement			
Rosenberg et al., 2010	Intervention pré-test post-test personnes âgées N = 19 âge : 79	24 semaines Entraînement sur jeu vidéo <i>Wii sports</i> (bowling, tennis, golf, boxe), 3 fois 35 minutes par semaine Pas de groupe contrôle	Amélioration de la santé mentale relative à la qualité de vie (MOS SF-36) Amélioration de l'humeur (QIDS) Amélioration globale des fonctions cognitives ("RBANS")
Maillot et al., 2012	Intervention pré-test post-test personnes âgées N = 32 âge : 73 MMSE : 28	12 semaines Groupe exercice : Entraînement sur <i>Wii Sports</i> (tennis et boxe), <i>Wii Fit</i> et " <i>Mario & Sonic on Olympic Games</i> " 2 fois 1 heure par semaine en binôme (multi-joueurs) Groupe contrôle : pas de changement de style de vie	DE moyenne par session : 41,5 % de la FCr Amélioration des performances aux jeux vidéo, Amélioration de la performance aérobie (6MiWT), Amélioration des performances physiques (force, souplesse, mobilité, équilibre) Amélioration des fonctions exécutives Amélioration des processus de traitement de l'information
Serious Game, Exergame, APRA d'intensité élevée et vieillissement			
Anderson-Anley et al., 2012	RCT personnes âgées N = 63 âge : 79	3 mois Groupe exercice : APRA sur <i>Cybercycle</i> (jeu vidéo de course sur cycloergomètre), 5 fois 45 minutes par semaine, 1 mois de familiarisation sans jeu vidéo puis 2 mois sur <i>Cybercycle</i> Groupe contrôle : même APRA mais sans réalité virtuelle	Personnes âgées diagnostiquées MCI à la fin de l'étude : groupe exercice = 3 ; groupe contrôle = 9 Groupe exercice : Amélioration des fonctions exécutives Régulation à la hausse plus importante des facteurs neurotrophiques (BDNF)

6MiWT = 6 Minutes Walking Test ; APRA = Activité Physique Régulière Aérobie ; BDNF = Brain-Derived Neurotrophic Factor ; DE = Dépense Énergétique ; FCr = Fréquence Cardiaque de réserve ; MCI = Mild Cognitive Impairment ; MET = Metabolic Equivalent of Task ; MMSE = Mini Mental State Examination ; QIDS = Quick inventory of depressive symptoms ; RBANS = The Repeatable Battery for Assessment of Neurocognitive Status ; RPE scale = Rating of Perceived Exertion scale.

Rappels : 1 METs = 3,5 ml.kg⁻¹.min⁻¹. Intensité faible < 3METs ; 3 < Intensité modérée < 6 ; Intensité forte > 6 METs

Rappels : FCr = FCmax – FCrepos. Intensité faible ≤ 39 % FCr ; 40 % ≤ Intensité modérée ≤ 59 % ; Intense ≥ 60% FCr

Chapitre 3 : Concevoir et tester un Serious Game

1 Petite histoire des Serious Games et domaines d'application

L'origine du terme SG est Etasunien. Abt, universitaire aux Etats-Unis, a écrit au début des années 70 un ouvrage intitulé « *Serious games* » où il avance l'idée d'établir un lien entre des jeux de rôle ou de stratégie et des domaines sérieux, notamment la pédagogie, l'industrie et l'armée (Djaouti, Alvarez, Jessel, & Rampnoux, 2011). Paradoxalement, en 2002, année où le livre d'Abt a été réédité, le terme SG est utilisé pour définir les JV sérieux. De plus, 2002 semble marquer l'avènement du SG avec la diffusion d'« America'S Army[®] », un « Military game » conçu pour entraîner les citoyens américains aux combats militaires et promouvoir le système militaire aux Etats-Unis. Toutefois, les premières applications s'apparentant au concept de SG sont plus anciennes. Ainsi, à l'aube des années 70, les premiers « Edugames » ont vu le jour (pour la diffusion de l'informatique). Les premiers « Military games » sont apparus durant les années 80 (lors du boom économique du JV) et les premiers « Militant games » durant les années 90 (utilisation du JV pour communiquer avec la jeunesse). Ainsi, les domaines d'application des SG sont vastes et peuvent répondre à plusieurs objectifs (p. ex., Edugame plus Militant games). De plus, c'est un processus dynamique qui, en fonctions de divers enjeux (p. ex., économiques, politiques et technologiques), élargit continuellement son champ d'application (Zyda, 2005). D'après Djaouti et al. (2011), les principaux types de SG sont :

- Advergame : SG publicitaire (domaine du marketing)
 - Informative game : SG informatif / actualité (domaine de l'information)
 - Militant game : SG militant (domaine militant)
 - Military game : SG militaire (domaine militaire)
 - Game for health : SG santé (domaine santé)
 - Edugame : SG ludo éducatif (domaine éducation / formation)
- }
 }
 }
 }
 }
 }
- Connaissance

 Pratique, performances psychotechniques

 Connaissance + pratique

- *Simulation* : plus controversé, la simulation n'est pas considérée à proprement dit comme un JV d'un point de vue formel. En effet, les jeux de simulation ne présentent pas de fin (p. ex., gestion d'un peuple virtuel) et sont uniquement basés pour la plupart sur la notion d'échec (p. ex., fin du jeu uniquement lors de la disparition du peuple contrôlé). Dans cette approche, la notion de victoire devient subjective puisqu'aucun objectif n'est clairement établi.

2 Qu'est ce qu'un Serious Game ?

De notre point de vue, il semble exister aujourd'hui, dans la littérature, des confusions entre JV commerciaux, logiciels informatiques et SG. Par exemple, la revue de McCallum & Boletsis (2013) semble considérer comme SG for health toute application informatique pour stimuler le patient (indépendamment du cadre ludique).

D'après Tekinbas & Zimmerman (2003), le jeu est un système dans lequel les joueurs s'engagent dans un conflit artificiel, défini par des règles et où il en résulte un résultat quantifiable. Dans cette idée, Zyda (2005) propose une définition similaire pour le JV : « *défi cérébral, joué avec un ordinateur selon des règles spécifiques, dédié à l'amusement, à la reconstitution simulée, ou pour gagner dans le cadre d'un enjeu* ».

Dans le domaine du JV, le terme SG a été proposé en 2002. Une première définition, formulée par Ben Sawyer en 2004 (citée par Alvarez, 2007) indique qu'il s'agit d'applications informatiques, réalisées par « *des développeurs, des chercheurs, des industriels, qui regardent comment utiliser les jeux vidéo et les technologies associées en dehors du divertissement* ». De façon concordante, Zyda (2005) définit le SG comme « *Un défi cérébral, joué avec un ordinateur selon des règles spécifiques, qui utilise le divertissement en tant que valeur ajoutée pour la formation et l'entraînement dans les milieux institutionnels ou privés, dans les domaines de l'éducation, de la santé, de la sécurité civile, ainsi qu'à des fins de stratégie de*

communication ». Plus récemment, Alvarez (2007), propose une définition plus précise : « Application informatique, dont **l'intention initiale** est de combiner, avec **cohérence**, à la fois des aspects sérieux (Serious) tels que, de manière non exhaustive et **non exclusive**, l'enseignement, l'apprentissage, la communication, ou encore l'information, avec des ressorts ludiques issus du jeu vidéo (Game). Une telle association, qui s'opère par l'implémentation d'un "**scénario pédagogique**", qui sur le plan informatique correspond à implémenter un habillage (sonore et graphique), une histoire et des règles idoines, a donc pour but de s'écarter du simple divertissement. Cet écart semble indexé sur la prégnance du « scénario pédagogique », dont les objectifs sur le **plan formel** se confondent avec ceux du jeu vidéo ».

Cette définition fait ressortir un nombre de points important à préciser :

- Intention initiale : ce terme fait référence au concepteur.
- Cohérence : entre la nature du message pédagogique et le thème du jeu associé.
- Non exclusive : Plusieurs aspects peuvent être combinés dans un seul jeu.
- Scénario pédagogique : « "*Fonction*" dont l'intention s'apparente soit à l'apprentissage d'une connaissance, soit à celle d'une pratique, ou bien des deux à la fois, et dont la propriété est de susciter l'envie d'apprendre, en indiquant comment y parvenir, et dont la réalisation dépend d'un jeu vidéo avec lequel elle puisse s'intégrer ». Plus simplement, un scénario pédagogique est un scénario d'utilisation pour susciter l'envie de jouer et comportant un objectif pédagogique.
- Plan formel : plan qui s'intéresse aux aspects « ordinateur » (c.-à-d. structure interactive et informatique) mais pas à ceux « utilisateur » (c.-à-d. perceptions et représentations).

Pour résumé, un SG est un JV dans lequel l'idée initiale de son concepteur est de combiner des aspects sérieux à buts pédagogiques (p. ex., apprentissage, enseignement, communication, santé) avec des ressorts ludiques issus des JV, par l'implémentation d'un

scénario pédagogique au scénario de jeu. De ce fait, l'intention initiale du concepteur est l'élément clef qui différencie un JV d'un SG. L'aspect sérieux du SG dépend de la prégnance du scénario pédagogique. En effet, l'écartement de l'aspect divertissement du SG dépend directement de l'importance accordée au scénario pédagogique. De ce fait, tout l'enjeu d'un SG réside dans l'incorporation d'un scénario pédagogique pour obtenir une harmonie parfaite entre les aspects ludiques et les aspects pédagogiques. Plus la prégnance du scénario pédagogique est faible, plus le jeu tendrait vers du divertissement, jusqu'à sa limite : sortir de la notion de SG pour devenir JV. Au contraire, plus elle est forte, plus le jeu tendrait vers de l'apprentissage, jusqu'à sa limite : sortir de la notion de SG pour devenir logiciel informatique pour l'apprentissage. De ces faits, Sans connaître l'intention initiale du concepteur, il peut quelque fois être difficile de savoir si un jeu est un JV ou un SG. Par exemple, les systèmes « Espresso[®] HD Bike » ne se revendiquent pas SG mais se destinent à l'activité physique d'endurance. Ils pourraient très bien être classés en tant que SG. Au contraire, les logiciels d'entraînement cognitifs se revendiquant SG mais qui n'incorporent pas d'aspects ludiques peuvent difficilement être assimilés à des SG.

3 Comment concevoir un Serious Game ?

3.1 Principes de base

Sur le plan technique, il existe deux manières de concevoir un SG. D'une part, le principe du « Mods » (modifications) consiste à effectuer une ou plusieurs transformations, par des patches informatiques, sur une application originale au travers de l'habillage graphique, sonore, du scénario ou des règles. D'autre part, le « Custom » consiste à développer directement une application originale. Pratiquement tous les SG répondraient au principe du « Mods » du fait que même ceux se revendiquant « Custom », s'inspirent de gameplay (ensemble des paramètres du jeu traduisant sa jouabilité) existant (Alvarez, 2007).

D'ailleurs, selon Zyda (2005), la pédagogie serait subordonnée au jeu. L'aspect divertissement est élaboré en premier et une fois celui-ci établi, la pédagogie est intégrée.

3.2 Définir le gameplay

Par quels moyens la pédagogie peut être intégrée au jeu ? Par des ajustements sur le gameplay, à travers ses cinq composantes : (1) les règles du jeu (buts généraux et locaux attribués au joueur, moyens d'action et de liberté concédés à l'utilisateur dans l'univers virtuel) ; (2) les modes de commandes ; (3) (4) (5) les structures temporelles, spatiales et dramatiques (Alvarez, 2007).

Un type de JV désigne une classe de JV possédant un gameplay similaire. En se basant sur l'approche empirique de la typologie des JV reprise par les sites internet de JV ou encore des instances plus officielles comme le Centre National du Cinéma et de l'Image Animée (CNC, 2014), il existe une multitude de types de JV (p. ex., action, réflexion, stratégie, jeux de rôle), de sous types (p. ex., jeux de stratégies en temps réel, jeux d'action de tir à la première personne), et de combinaison de JV. Il devient alors difficile d'établir des liens entre l'apprentissage et un type de jeu (soit son gameplay). D'ailleurs, dans les études portant sur les stimulations cognitives induites par les JV, il n'existe pas de consensus pour clairement classer les JV (Powers et al., 2013 ; Toril et al., 2014).

Dans le but de réduire cette classification et de la rendre plus robuste dans l'analyse des JV et pour faciliter la conception de SG, Djaouti et al (2008) ont formalisé une typologie à partir du premier paramètre du gameplay : les règles et buts des JV. Cette approche semble aborder le JV comme une tâche cognitive à réaliser selon un but et des règles. Son utilisation dans la conception d'un SG semble intéressante pour définir de manière plus structurée le premier élément du gameplay (règles et buts), facilitant ainsi la mise en adéquation avec les autres éléments.

Dans cette idée, leur modèle des « briques de gameplay » stipule que chaque JV peut être décrit à travers des briques « play » (moyens) et « game » (buts, Tableau 3, partie haute). Les JV ont vocation à regrouper les aspects *play* et *game*, ce qui leur apporte de l'enjeu et du challenge. Sur le plan formel, c'est la combinaison de deux briques de *gameplay* de nature complémentaire (*play* + *game*) qui donne naissance au challenge : « métabrique » (Tableau 3, partie basse). De plus, une autre brique peut être ajoutée à cette métabrique pour apporter une variante au challenge sans en affecter sa nature profonde. Dans le cas d'ajout de plusieurs briques, cette combinaison reste vraie tant que les briques ajoutées ne constituent pas une autre métabrique. Dans le cas contraire, l'association de métabriques revient à associer leur challenge respectif. Alvarez (2007) avait identifié 20 métabriques distinctes dans les JV constituant ainsi les 20 challenges de base du JV (Tableau 3, partie basse).

Tableau 3: Modèle des briques de gameplay. (En haut), Modèle des briques play et game dans le domaine des jeux vidéo ; (En bas), Liste des 20 métabriques pouvant constituer les challenges de base du jeu vidéo. Il convient de noter que cette approche exclut l'analyse des JV multi-joueurs et des exergames.

Briques Play			Briques Game	
Représentent des moyens liés à l'interface entrante			Représentent l'objectif au niveau local ou global	
SHOOT : tirer	Cette brique met au défi l'utilisateur d'atteindre un ou des élément(s) situé(s) à distance		AVOID : éviter	Cette brique invite l'utilisateur à éviter des éléments, obstacles, ennemis ou adversaires
MANAGE : gérer	Cette brique invite l'utilisateur à gérer des ressources en fonction d'objectifs précis à atteindre		DESTROY : détruire	Cette brique se retrouve dans les jeux où des éléments ou ennemis sont à détruire
MOVE : déplacer	Cette brique se retrouve dans les jeux où le joueur doit diriger/conduire/piloter un élément ou un personnage		MATCH : atteindre	Cette brique invite l'utilisateur à maintenir un ou plusieurs éléments dans un lieu ou à maintenir un état d'équilibre précis
RANDOMIZE : aléatoire	Cette brique invite l'utilisateur à générer une valeur au hasard		CREATE : créer	Cette brique fait appel à la créativité de l'utilisateur en lui demandant d'assembler, de construire, de créer des éléments précis ou non, de colorier, de dessiner à partir de motifs ou brosses prédéfinis
ANSWER : écrire	Cette brique invite l'utilisateur à entrer une chaîne alphanumérique en guise de réponse ou pour déclencher une fonction de jeu			
Brique Play / Game	AVOID	DESTROY	MATCH	CREATE
ANSWER	BRAIN	DOOM	COMMANDER	GIFT
MANAGE	DANDY	POISON	TACTIC	GOD
MOVE	DRIVER	GLUTTON	SOLITARY	ARTIST
RANDOMIZE	ROULETTE	RISK	JACKPOT	MONOPOL
SHOOT	MINE	KILLER	SNIPER	SORCERY

3.3 Définir des critères ergonomiques

Il existe, dans la littérature scientifique, différentes approches abordant les relations entre l'humain et la technologie : technologique, humaine, sociale et combinée (Hammes-Adelé, 2011). Le versant technologique renvoie tout simplement à l'ergonomie d'une nouvelle Technologie de l'Information et de la Communication (nTIC) pour la rendre utilisable (Bastien & Scapin, 1992 ; Brangier & Barcenilla, 2003). La conception de SG pour la stimulation du sujet âgé est très récente (notamment les SG pour les sujets présentant une MN). Elle semble reposer sur une démarche de conception empirique. Toutefois, la considération préalable de critères ergonomiques peut représenter un point de départ dans la structuration du gameplay. L'approche de Bastien & Scapin (1992) se présente comme un guide pour favoriser la relation entre l'humain et la technologie dans une démarche conceptrice. Ces auteurs ont établi une liste de critères ergonomiques :

- Le guidage : pour faciliter l'apprentissage et l'utilisation du système, le guidage regroupe tous les moyens mis en œuvre pour conseiller, orienter, informer et conduire l'utilisateur dans ses interactions avec l'ordinateur afin qu'à tout moment il sache où il en est et qu'est ce qu'il peut faire.
- La charge de travail : pour limiter les risques d'erreurs des utilisateurs, la charge de travail regroupe tous les moyens pour réduire la charge perceptive et mnésique des utilisateurs aux seules informations pertinentes afin de fluidifier les interactions.
- Contrôle explicite : pour limiter les risques d'erreurs de la machine face aux actions des utilisateurs, le contrôle explicite renvoie à la faculté de la machine à exécuter les opérations demandées par les utilisateurs et pas d'autres, au moment où elles sont demandées, afin d'avoir une relation explicite où l'utilisateur garde la main.

- Adaptabilité : pour limiter le caractère linéaire de la relation, la machine doit être capable de s'adapter au contexte et à l'utilisateur afin de proposer un nombre de façons pour atteindre un objectif adapté à l'utilisateur et à son expérience.
- Gestion des erreurs : pour limiter les risques d'erreur de la machine, la machine doit être capable de gérer, soit corriger ou prévenir les erreurs le plus rapidement possible afin de ne pas provoquer d'interruptions dans la relation entre l'utilisateur et la machine.
- Homogénéité / Cohérence : pour identifier au mieux les procédures à réaliser, les commandes à faire, ce critère fait référence aux choix de conception de l'interface qui doivent être identiques dans des contextes identiques et inversement.
- Signifiante des codes et dénominations : pour mieux comprendre l'interface et les informations affichées, les codes et dénominations doivent être en adéquation entre un objet affiché et son référent, exprimant une forte relation sémantique.
- Compatibilité : ce critère fait référence à l'adéquation entre les caractéristiques des utilisateurs (p. ex., cognitions, compétences, âge, attentes) et l'ensemble de l'application et son interface.

3.4 Identifier les attitudes des usagers envers le SG

Le versant humain des relations entre l'humain et la technologie regroupe les théories liées aux notions d'attitudes (quel jugement porte l'utilisateur sur la technologie ?) et d'intention d'utilisation du futur usager (est-ce que l'utilisateur a l'intention d'utiliser cette technologie dans le futur ?). Parmi elles, certaines soutiennent que l'intention développée par l'utilisateur d'utiliser une technologie va l'amener à l'utiliser ou non réellement. Cette intention dépend et dépendra de ses attitudes envers la technologie. Le Modèle d'Acceptation des Technologies (TAM) de Davis (1986, Figure 4, voir Holden & Karsh, 2010), validé

empiriquement et statistiquement dans de nombreuses études, est actuellement le plus consensuel et le plus répandu (Mathieson, 1991 ; S. Taylor & Todd, 1995 ; Venkatesh & Brown, 2001 ; Venkatesh & Davis, 2000 ; Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003). Il considère que l'adhésion à une nTIC par un futur utilisateur (c.-à-d. son intention d'utiliser), dépend principalement, des influences de (1) l'utilité perçue (« est ce que l'utilisation d'une TIC augmente l'efficacité professionnelle ou personnelle du futur utilisateur ? ») et (2) de la facilité d'utilisation perçue (« quelle intensité d'effort nécessite l'utilisation de la TIC pour le futur utilisateur, notamment au niveau mental ? »). Ces deux facteurs vont déterminer les attitudes (c.-à-d. le jugement individuel), lesquelles vont déterminer les intentions (c.-à-d. motivation individuelle à faire des efforts pour utiliser la technologie) et consécutivement des comportements d'usage réel (Turner, Kitchenham, Brereton, Charters, & Budgen, 2010). Le TAM a subi plusieurs modifications successives (TAM 2 et le Unified Theory of Acceptance and Use of Technology [UTAUT], Figure 4, Venkatesh et al. 2003). D'après King & He (2006), le TAM 2 aurait été modifié selon quatre paramètres : les facteurs antérieurs relevant de l'histoire de l'individu ; les facteurs inspirés par d'autres théories ; les facteurs contextuels et individuels ; et les conséquences de l'utilisation sur l'humain. Cette modification a permis d'augmenter la puissance prédictive pour l'intention d'utiliser (40 %, Legris, Ingham, & Colletette, 2003) et pour l'usage réel (30 %, King & He, 2006). L'UTAUT considère que l'adhésion à une nTIC par un futur utilisateur (c.-à-d. son intention d'utiliser) dépend principalement (1) des attentes en termes de performance (reposant sur l'utilité perçue, les motivations, la capacité perçue du système à optimiser ses performances de l'utilisateur et ses attentes sur ses futures performances), (2) des attentes en termes d'effort (reposant sur la facilité d'utilisation du système perçue, opérationnelle et sa compréhension par l'utilisateur), et (3) d'influences sociales (reposant sur les normes sociales subjectives liées à l'utilisation du système et aux influences des personnes de l'entourage qui utilisent le système). L'UTAUT

soulève également l'importance de l'impact des facteurs modérateurs tels que le genre, l'âge, l'expérience, et le caractère volontaire de l'usage dans la modulation des attitudes et de l'intention d'utiliser. Enfin, ce modèle s'intéresse aux conditions qui favorisent l'utilisation d'un système dans l'usage opérationnel. Du fait de son grand nombre de variables, l'UTAUT et sa version améliorée (l'UTAUT 2 incluant en plus les motivations liées au plaisir, le prix de la technologie et les habitudes, Venkatesh, Thong, & Xu, 2012) peuvent dépasser les 50 % de puissance prédictive. Dans le domaine des JV, il existe quelques études utilisant les TAM et UTAUT (Ibrahim & Jaafar, 2011). Dans le domaine des JV, du fait qu'une grande partie des études s'orientent vers l'utilisation des JV comme outil éducatif, Ibrahim & Jaafar (2011) proposent d'adapter l'UTAUT pour l'usage des JV (Educational games acceptance model, Figure 4). Ils gardent ainsi les trois points importants de l'UTAUT, auxquels ils rajoutent comme facteurs d'influence l'opportunité d'apprendre par le jeu et l'amusement perçu par le futur usager. Ils soulèvent également l'importance de l'impact des facteurs modérateurs tels que le genre et l'expérience de jeu.

Dans le domaine de la santé et de la stimulation du sujet âgé par les JV, l'utilisation de ces modèles est à ses débuts. La démarche consiste généralement à explorer le comportement des thérapeutes (Walker, 2014) ou des usager (Nawaz et al., 2014). Par exemple, Nawaz et al. (2014) ont tenté d'interpréter les items d'un questionnaire sur l'utilisation d'une nTIC présenté aux participants jouant à des exergames sur l'équilibre en fonction des dimensions de l'UTAUT.

Au final, le TAM, dans sa version standard reste une approche centrée sur l'humain (utilité perçue et facilité d'utilisation), alors que toutes ses évolutions jusqu'à aujourd'hui semblent l'orienter vers une approche également sociale (influence sociale). Le renouveau des technologies en termes de complexité et d'intérêt semble nécessiter de faire continuellement évoluer l'approche humaine et sociale de la relation homme – nTIC, ce qui favorise les

démarches empiriques de ces modèles et limite l'utilisation d'un questionnaire (principal outil d'évaluation) faisant consensus à long terme (p. ex., les 4 évolutions successives du TAM présentées ci-dessus se sont opérées entre 1986 et 2011). Toutefois, comme tenté par (Nawaz et al., 2014), cette approche permet de donner un cadre théorique dans l'exploration des facteurs humains et sociaux qui peuvent influencer une population à utiliser les JV dans un contexte spécifique.

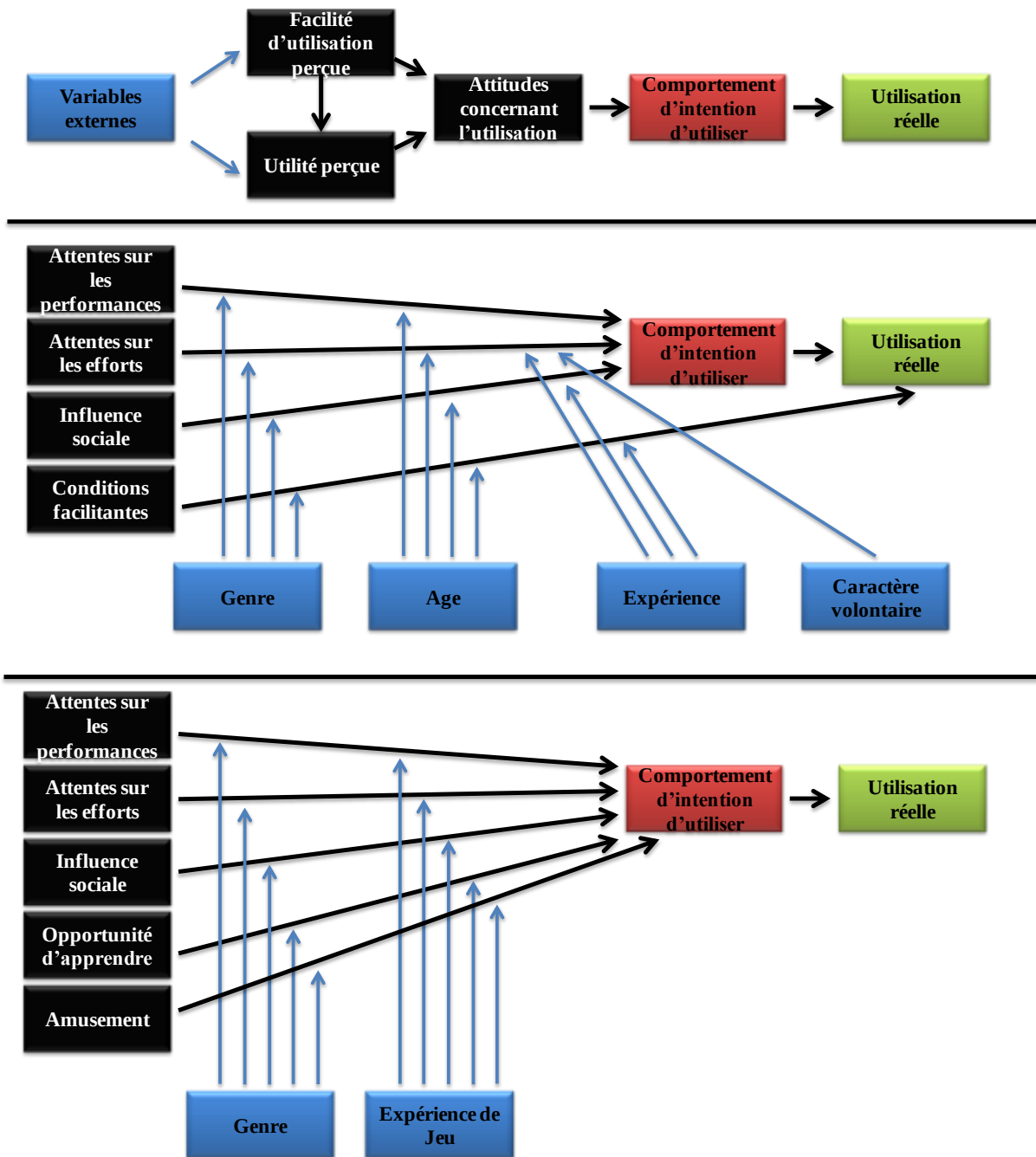


Figure 4 : Modélisations de la relation entre l'humain et la technologie. (En haut), Technology Acceptance Model (TAM). (Au milieu), Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). (En bas), Educational games acceptance model.

4 Conclusion sur la conception d'un Serious Game

Pris ensemble, les éléments précédents mettent en évidence la complexité de la démarche de conception d'un SG. Le projet doit être murement réfléchi et tenir compte d'un grand nombre de variables afin de mettre en adéquation la technologie avec les objectifs du SG (santé, entraînement, éducation, etc.) et les futurs usagers. La démarche de conception ne va pas dans un seul sens. En effet, même en structurant au maximum la démarche de conception (et de la formaliser sur le cahier des charge du SG) il reste difficile d'anticiper de manière précise tous les critères influençant l'utilisabilité du SG. Les premiers tests sur les futurs usagers permettent de vérifier les choix de gameplay, les règles ergonomiques définies et l'adhésion des usagers. Ainsi, comme mis en évidence par (Benveniste et al., 2012) des modifications du gameplay et des choix ergonomiques peuvent s'en suivre, aboutissant à une nouvelle version du jeu.

Partie 2. X-Torp

Chapitre 4 : Gamedesign d’X-Torp Version 1

1 Méthode de conception d’X-Torp Version 1

A l’aube de la conception d’X-Torp, en 2012, il n’existait pas de recommandations relatives au gamedesign de SG à activité physique pour les sujets âgés et ceux présentant une MN associée à des troubles cognitifs légers (MCI) ou une MA. En effet, les technologies employées pour les SG de Benveniste et al. (2012) et Manera et al. (2015) ne permettaient pas d’extraire des recommandations pour X-Torp. Toutefois, les résultats de ces études ne permettent pas de conclure de l’intérêt d’utiliser des SG à des stades de la MA avancés. Au final, les choix dans le type de jeu (principalement action) et son environnement ont été proposés par l’équipe de conception de jeu du projet. Parallèlement, l’étude approfondie de la littérature scientifique (p. ex., portant sur les effets cognitifs des JV en fonction de leur typologie) a permis de valider leurs propositions et de préciser davantage les choix de gameplay pour répondre aux besoins des populations cibles.

Ensuite, quelques sujets présentant des troubles cognitifs légers ou une MA et des sujets âgés en bonne santé (non inclus dans l’étude présentée au Chapitre 5) ont brièvement testé, lors d’une consultation avec leur médecin, un autre SG, « Voracy Fish⁹ ». Le joueur incarnait un avatar (un poisson dans l’eau) et devait se déplacer dans les fonds marins en utilisant la Microsoft® Kinect™ pour dévorer d’autres poissons et gagner en expérience. Nous avons utilisé ce SG pour vérifier que la projection dans un environnement marin incluant des phases de combat et l’utilisation de la Microsoft® Kinect™ pour commander l’avatar étaient possibles. Nous avons pu également relever des informations importantes nous permettant de définir les futures commandes de jeu d’X-Torp avec la préoccupation de rendre le jeu stimulant physiquement. En revanche, les futurs participants de l’étude d’utilisabilité

⁹ Voracy Fish, site internet : <http://www.voracy.com/?lang=fr>

(cf. Chapitre 5) n'ont pas été intégrés au développement de la première version d'X-Torp (V1). Ce choix peut s'expliquer par la crainte d'être influencé par les goûts personnels de chaque participant, novice en JV. Ainsi, ils risquaient de donner des orientations très personnelles à X-Torp, limitant la projection d'autres joueurs.

Par la suite, deux axes ont été définis pour concevoir X-Torp. D'une part, les paramètres du gameplay devaient directement s'inspirer des JV issus du divertissement et répondant à la même typologie qu'X-Torp (principe « Mods », Alvarez, 2007). D'autre part, les choix ergonomiques (p. ex., définis à partir des critères issus de Bastien & Scapin, 1992) ont été décidés suite à plusieurs phases de tests entre les partenaires scientifiques et industriels du projet et des réunions de concertation. En conséquence, X-Torp a été testé en intégralité à plusieurs reprises par les membres de l'équipe avant l'expérimentation clinique. Toutes ces démarches se sont étalées sur près d'un an et demi (4 mois pour un état de l'art, 10 mois pour la conception et 3 mois pour les nombreux tests effectués par les équipes). Les différentes sections de ce chapitre vont présenter le gamedesign de la V1 d'X-Torp, laquelle a été testée cliniquement par la suite (cf. Chapitre 5).

2 Populations cibles

Le but d'X-Torp V1 est de stimuler simultanément le joueur par l'activité cognitive, physique dans une activité émotionnellement positive et motivante. Ce SeG est conçu pour les sujets âgés et ceux présentant une MN associée à des troubles cognitifs légers (MCI) ou une MA. A ces stades, les capacités d'apprentissages et l'autonomie dans les activités de vie quotidienne ne sont pas sévèrement affectées. Cette population a été ciblée du fait des plus grosses difficultés pour stimuler par les SG les sujets présentant une MN aux stades plus avancés de démence (Benveniste et al., 2012 ; Manera et al., 2015). De plus, l'utilisation de l'EE, chez les rongeurs modèles de la MA met en évidence des effets neuroprotecteurs plus

importants quand l'intervention prend place aux stades précoces de la maladie comparée à une intervention très tardive, vraisemblablement moins bénéfique (Verret et al., 2013).

3 Quelques considérations sur l'usage des jeux vidéo chez ces populations cibles

Même si la conception du premier JV « Pong » remonte à 1967, la démocratisation du JV est beaucoup plus récente (années 90), tout comme l'émergence des SG (en 2002, Alvarez, 2007). Dans le domaine de la santé du sujet âgé, les SG commencent à peine à susciter de l'intérêt. Quoi qu'il en soit, aujourd'hui, le JV est le premier bien culturel en France (CNC, 2014 ; SNJV, 2014). Ces dernières études rapportent que plus de 30 millions des français jouent à des JV tous types confondus (en ligne, sur ordinateur, sur téléphone, sur console, etc.). Ce nombre est en constante augmentation. La moyenne d'âge du joueur se situe entre 30 et 40 ans. Toutefois, les 50-65 ans sont les moins nombreux à jouer aux JV et aucune donnée n'existe pour les plus de 65 ans (CNC, 2014 ; SNJV, 2014). De ce fait, même si les recommandations à l'usage des JV et SG se sont multipliées pour la population âgée dans un but de proposer une activité plus stimulante que la marche, le vélo d'appartement ou d'exercices cognitifs scolaires, quel peut être le niveau de motivation du sujet âgé dans l'usage des JV ? Les voient-ils comme un moyen de se divertir ? Quels peuvent être leurs niveaux culturel et opérationnel ? Il n'existe pas à notre connaissance de données statistiques relatives à l'utilisation des JV par les plus de 65 ans, et leurs motivations associées. Selon l'approche de la théorie de l'autodétermination, la motivation peut se représenter sur un spectre allant de la motivation intrinsèque (p. ex., « je le fais par ce que j'aime ça ») à l'absence de motivation (p. ex., « je ne vois pas pourquoi je le ferai »), passant par des étapes intermédiaires de motivation dites extrinsèques (p. ex., « je le fais pour faire plaisir à ma famille », Ryan & Deci, 2000 ; Vallerand & Bissonnette, 1992). Basé sur ce modèle, Ryan, Rigby, & Przybylski (2006) émettent l'hypothèse que des facteurs de motivation intrinsèque

chez le jeune joueur novice en JV seraient associés à un fort sentiment d'autonomie et de compétence (c.-à-d. le besoin de challenge), lesquels seraient associés au plaisir de jouer et à l'envie de rejouer, mais également au sentiment de présence (associé au déplacement de l'attention du joueur du monde physique au monde virtuel, Bélanger-Gagnon, 2010) et au contrôle intuitif des modes de commandes du jeu. Chez le sujet âgé, Bird, Clark, Millar, Whetton, & Smith (2015) ont très récemment montré que les perceptions d'amusement pour des exergames stimulant l'équilibre étaient davantage positives à la fin d'un programme d'entraînement qu'au début, mais initialement modérées. Ces points sont à considérer dans la conception d'X-Torp car le type de motivation envers une activité peut affecter l'adhésion à cette activité et probablement sa réussite. Pris ensemble, il semble plus approprié d'émettre l'hypothèse que les personnes âgées ne présentent pas initialement un haut niveau de motivation (p. ex., intrinsèque). Par exemple, il est possible qu'elles ne voient pas les JV comme un moyen de divertissement pour elles, mais également qu'elles n'aient jamais eu l'occasion d'expérimenter les JV, d'intégrer la culture et les codes du JV qui facilitent son contrôle intuitif (p. ex., la jauge de vie est rouge, celle de l'énergie est bleue). Ce phénomène devrait être plus important chez les sujets présentant un diagnostic de MCI et de MA, lesquels semblent progressivement développer des troubles de la motivation (Mulin et al., 2011) et des troubles de la personnalité, notamment une augmentation du neuroticisme, une diminution de l'extraversion et du caractère consciencieux (Lykou et al., 2013).

Il semble nécessaire de porter une attention particulière à ces facteurs pouvant influencer l'utilisabilité (en plus des troubles cognitifs liés à la maladie) à travers des aménagements spécifiques dans les choix ergonomiques et dans le gamedesign. Le but recherché est de rendre le plus accessible possible X-Torp aux populations cibles pour favoriser des hauts niveaux de motivation par l'expérience de jeu.

4 Le Gameplay d’X-Torp – Mode Scénario

4.1 Typologie d’X-Torp

Basé sur la typologie populaire des JV (CNC, 2014), X-Torp est un hybride entre jeu d’action/aventure à la première et/ou à la troisième personne, jeu de réflexion et intègre des dynamiques de jeu de rôle (Rôle Play Game, RPG). Il combine à fois une action en temps réel (« action game ») avec une dynamique d’exploration dans un environnement ouvert, de résolution d’énigme (« puzzle game »), de collecte d’objet et un système de points d’expérience (RPG). Du fait des différents troubles cognitifs retrouvés dans le diagnostic de MCI et de MA. X-Torp reste principalement un SG d’action pour son plus large potentiel stimulateur sur les fonctions cognitives (Belchior et al., 2013 ; Colzato et al., 2013 ; Dye et al., 2009 ; Dye et al., 2009 ; Shawn Green & Bavelier, 2003 ; Green & Bavelier, 2007). L’insertion d’une composante de RPG d’X-Torp (le système de point d’expérience) repose sur une dynamique de progression qui permet d’augmenter la durée du temps de jeu et de motiver le joueur à rester actif sans forcément suivre le scénario principal.

Selon le modèle de « brique de gameplay » de Djaouti et al. (2008), les principaux challenges dans X-Torp sont : (1) « Killer » action de tirer pour atteindre une cible, soit détruire les autres navires ; (2) « Driver », action de se déplacer pour éviter une cible, éviter d’être détruit ; « Solitary », action de se déplacer pour atteindre une cible, soit explorer pour croiser des navires ou atteindre une île (Tableau 3). Les challenges « Driver » et « Killer » correspondent aux phases de combat du jeu. Ils sont systématiquement retrouvés dans les JV d’action et/ou de tir à la première et troisième personne (Alvarez, 2007). Le challenge « Solitary » est quand à lui lié à l’exploration. Chaque mission dans X-Torp est une succession d’étapes de quêtes dont une sur deux est sous forme de mini-jeux (détaillés plus bas).

X-Torp est un exergame. Il est développé pour être utilisé avec la camera RGB-D (Red Green Blue + Depth) Microsoft® Kinect™ et utilise les logiciels de cette dernière pour reconnaître, de façon suffisamment précise, un corps humain et ses mouvements (Clark et al., 2012). Cette camera détecte les mouvements des jambes, des bras et du tronc du joueur pour les utiliser comme modes de commandes.

Selon la typologie des SG (Djaouti et al., 2011 ; Zyda, 2005). X-Torp est un SeG for Health (santé) de stimulation/entraînement. En effet, les challenges et les commandes de jeu ont pour but d'améliorer la santé des utilisateurs présentant un trouble cognitif. Il est utilisé en temps qu'EE basé sur la stimulation cognitive, physique, favorisant les émotions positives et, à terme, l'engagement social.

4.2 Règles du jeu

X-Torp est un jeu de bataille navale (Figure 5). Il propose un monde ouvert où le joueur se déplace librement dans un environnement marin, représentant la planète recouverte par les eaux. Seules quelques îles apparaissent à la surface. Le joueur prend le contrôle d'un sous-marin. Le but est de collecter autant de points d'expérience que possible, à travers la destruction d'autres vaisseaux mais également par la réalisation de missions accessibles sur les îles. Le scénario principal du jeu prend fin lorsque le joueur collecte suffisamment de points d'expérience pour devenir « Amiral 5 étoiles » et quand toutes les missions ont été réalisées. Le système de point d'expérience est inspiré des RPG. L'expérience du joueur est marquée par des niveaux d'expérience (des rangs Militaires pour X-Torp). Le joueur commence le scénario au niveau 1 « matelot » et termine au niveau 15 « Amiral 5 étoiles ». La distribution des points d'expérience par niveau décrit une courbe exponentielle. De ce fait, plus le joueur a un haut rang, plus il aura davantage besoin de collecter des points d'expérience pour passer au niveau suivant. Le joueur peut toutefois continuer de collecter

des points d'expérience une fois le scénario terminé en continuant de détruire d'autres vaisseaux. En effet, X-Torp intègre un système de classement entre joueurs. Son classement par rapport aux autres joueurs, accessible durant la partie, est basé sur le nombre total de points d'expérience. De ce fait, le joueur qui collecte le plus de points d'expérience est classé premier. Ce système de points d'expérience, ainsi que le système de management des ressources personnelles (voir partie structures temporelles, spatiales et dramatiques), rajoutent des challenges motivationnels au scénario d'X-Torp. Ces dynamiques conduisent le joueur à réaliser toutes les activités du jeu pour finir le scénario (rejoindre les îles, réaliser les missions, combattre en mer).

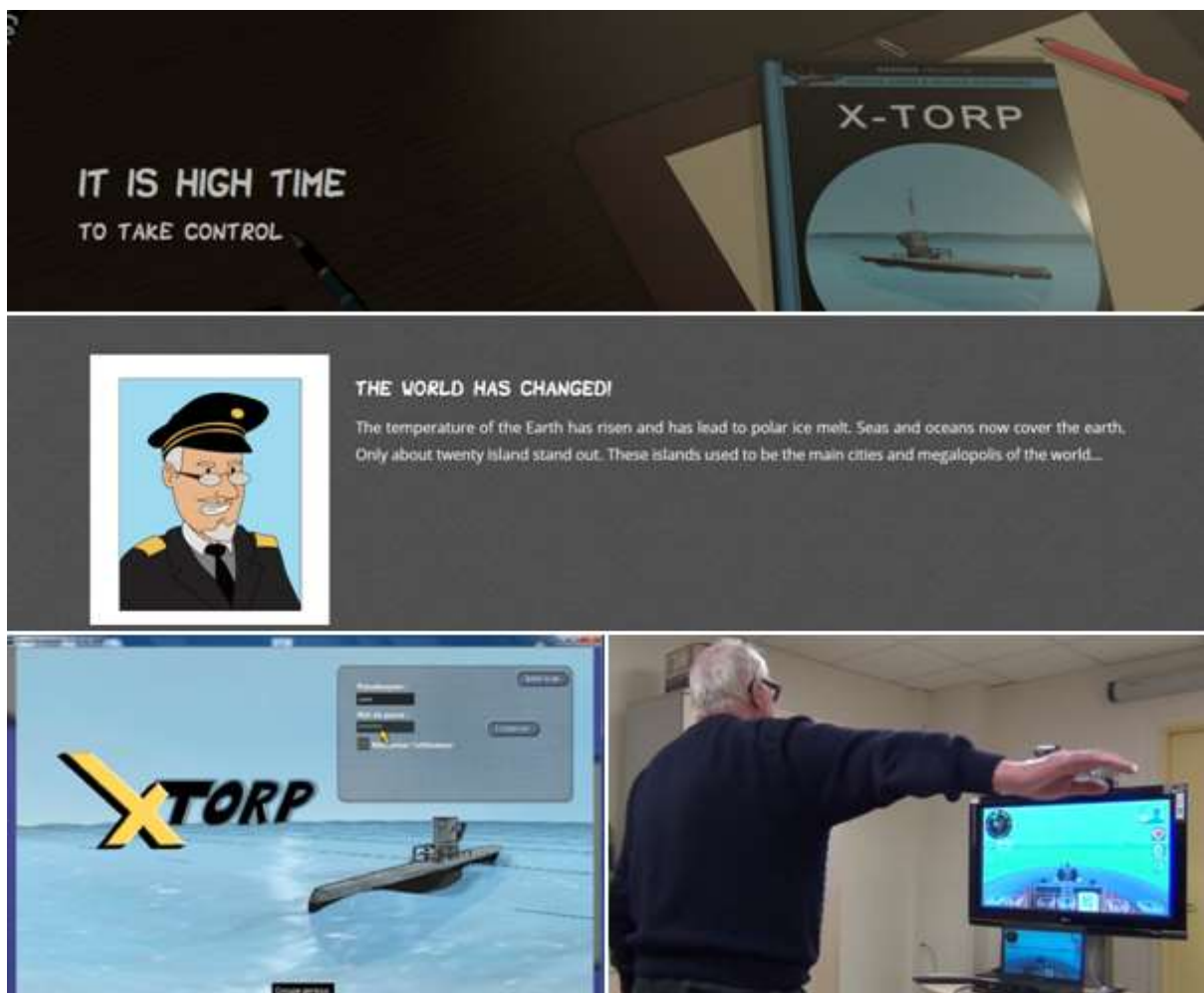


Figure 5: X-Torp V1. (En haut), le synopsis de la V1. (En bas à gauche), la page d'identification d'X-Torp. (En bas à droite), un exemple d'un patient en train de jouer.

4.3 Les commandes de jeu

Pour jouer, X-Torp doit être lancé depuis la plateforme de l'équipe réalisatrice du jeu. Préalablement, chaque joueur doit être enregistré sur cette plateforme par le clinicien responsable du patient/joueur. Pour démarrer X-Torp, le joueur doit entrer son pseudonyme et son mot de passe (Figure 5, en bas à gauche). Quand une session de jeu démarre, il est proposé au joueur de suivre, s'il le souhaite, un tutoriel pour apprendre ou revoir les commandes principales du jeu. Une fois cette mise en train terminée, le joueur se retrouve à bord de son sous marin, placé aléatoirement près d'une île (Figure 6). Les actions ordonnées au sous-marin se font en temps réel grâce à la Kinect[™]. Des icônes des mouvements associés à ces actions (des rétrocontrôles supplémentaires) sont affichés sur le bas de l'écran (Figure 6). Lorsque le joueur effectue un mouvement pour produire une action, en plus de la réponse du sous-marin, l'icône du mouvement se met en vert (Figure 6). L'action du sous-marin se maintient tant que le joueur maintient son mouvement. Lorsque le joueur stoppe son mouvement (p. ex., baisser le bras droit pour arrêter de tourner à droite), le sous-marin arrête son action. Plusieurs types d'action peuvent se combiner (p. ex., faire avancer le sous-marin et tourner). Il convient de noter qu'en se basant sur le critère d'ergonomie « contrôle explicite » (Bastien & Scapin, 1992), le faible nombre de commandes choisis permet au joueur de combiner des actions rapidement en limitant les erreurs d'interprétations du jeu. De plus, en se basant sur le critère « compatibilité », les mouvements à effectuer ont été voulus simples. En accord avec le critère « signifiante des codes et dénominations », ils ont été voulus proches de la réalité (p. ex., utiliser les jambes pour avancer, les bras pour tourner) pour faciliter leur apprentissage et leur exécution en toute sécurité. Aussi, ces commandes laissent une marge de liberté au joueur en fonction de sa condition physique. Pour faire avancer le sous-marin, le joueur peut choisir de courir sur place au lieu de marcher sur place, rendant

l'action plus stimulante sur le plan physique. Le but recherché est d'induire une APRA d'intensité d'effort au moins modérée.

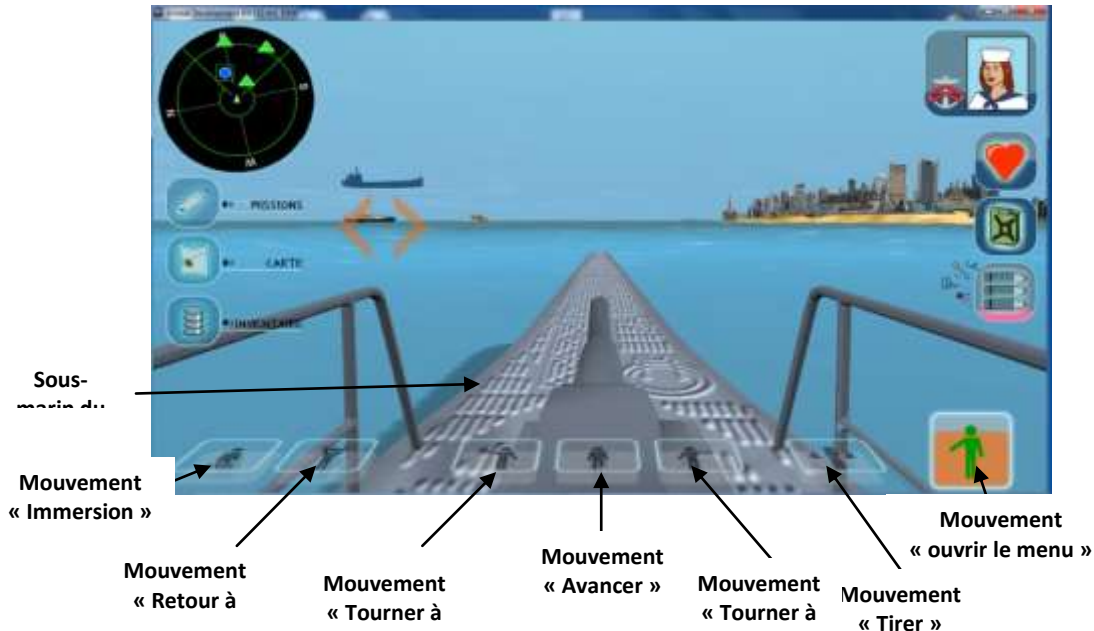


Figure 6 : Les commandes d'X-Torp relatives aux actions dans l'environnement virtuel.

-  « Immersion » le Sous-marin passe sous l'eau : le joueur lève les bras au dessus de la tête.
-  « Retour à la surface » le sous-marin passe sur l'eau : le joueur abaisse ces bras et fait une flexion de jambe.
-  « Tourner à gauche » le sous-marin tourne sur sa gauche : le joueur étend son bras gauche sur le côté en l'alignant à la ligne des épaules.
-  « Avancer » le sous-marin avance : le joueur marche ou court sur place.
-  « Tourner à droite » le sous-marin tourne sur sa droite : le joueur étend son bras droit sur le côté en l'alignant à la ligne des épaules.
-  « Tirer » le sous-marin tire une munition : le joueur ramène ces deux mains devant lui à hauteur de sa cage thoracique.
-  « Ouvrir le menu » le joueur lève son bras gauche sur le côté à un angle de 45 ° par rapport à l'axe de son corps, une jauge orange sur apparaît l'icône. Quand le joueur fait le mouvement et le maintient, la jauge se charge jusqu'à faire apparaître le menu quand elle est pleine.

L'action « Ouvrir le menu » ouvre une fenêtre en 2 Dimensions (2D). Cette fenêtre de menu permet au joueur de : (1) consulter son avancée dans les missions, visualiser la carte,

visualiser les ressources personnelles restantes et changer la prise de vue à l'écran ; (2) voir sa progression générale dans le jeu et (3) voir sa place son classement par rapport aux autres joueurs (Figure 7). Le menu se parcourt à l'aide d'une main virtuelle apparaissant à l'écran lors de l'ouverture du menu. Le joueur étend son bras devant lui pour être reconnu par la Kinect™ et quand il le bouge devant lui (p. ex., lever, baisser, à gauche, à droite), la main virtuelle suit son mouvement (Figure 7). Pour sélectionner une option du menu, le joueur doit placer sa main virtuelle sur l'icône du menu correspondant et maintenir la position de son bras. Une barre rouge de chargement apparait autour de la main virtuelle et, quand celle-ci est pleine, l'option choisie est sélectionnée.

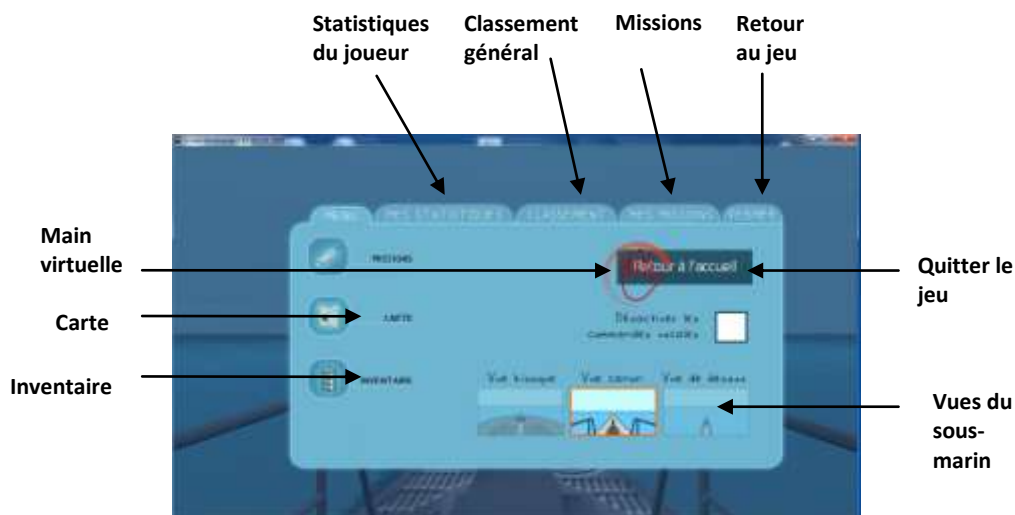


Figure 7 : Menu d'X-Torp. La main virtuelle sélectionne l'action « retour à l'accueil », permettant de quitter le jeu. Pour revenir à la partie, le joueur doit sélectionner l'icône « fermer ».

4.4 Structures temporelles, spatiales et dramatiques

La V1 d'X-Torp est constituée de 15 niveaux et 4 missions. Les graphismes se veulent dans un style bande dessinée aux couleurs vives. Le but est de limiter le côté réaliste du jeu pour éviter une perception négative et violente des combats en mer. L'habillage sonore est dans un style humoristique. Dans le monde d'X-Torp, il est nécessaire de réaliser l'action

« Avancer » pendant 5 minutes pour traverser la planète d'Est en Ouest et 3 minutes pour la traverser du Nord au Sud. Sur la mer, le joueur dispose de deux moyens pour s'orienter : la carte du monde, accessible depuis le menu, et le radar, toujours visible (Figure 8). En accord avec le critère d'ergonomie « signifiante des codes et dénominations » (Bastien & Scapin, 1992), le radar (sonar) est une version similaire à celle des bateaux. Deux éléments ont été ajoutés pour améliorer sa lisibilité : la présence en permanence des objets à proximité (pas de rafraichissement comme pour l'écholocalisation) associées à des formes et des couleurs distinctes. L'environnement d'X-Torp se compose de trois îles (Washington, Paris et Moscou) et de trois types de vaisseaux : les cargos (vaisseaux inoffensifs), les destroyers et sous-marins (vaisseaux agressifs, Figure 8). Le positionnement des îles et les déplacements des vaisseaux demandent au joueur de rester physiquement actif plusieurs minutes pour rejoindre une île ou un groupe de vaisseaux adverse (Figure 8).

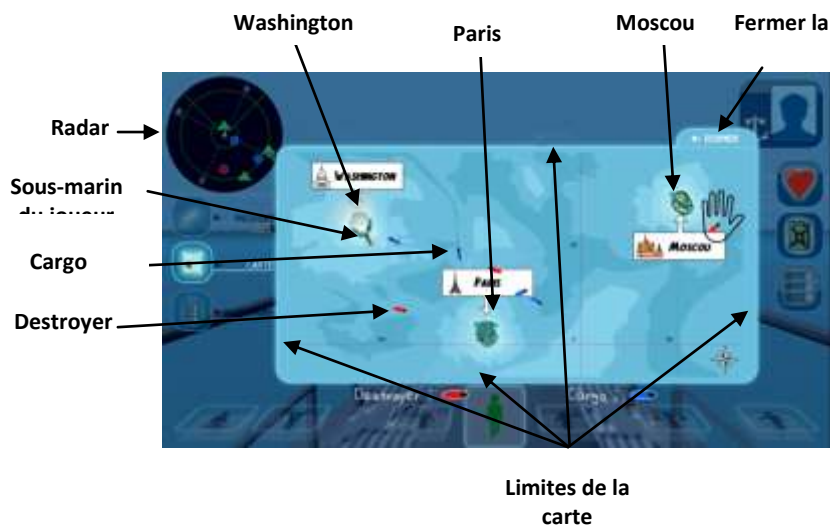


Figure 8 : Carte du monde d'X-Torp V1. Si le joueur arrive aux limites de la carte, son orientation est réajustée légèrement en direction du centre de la carte pour ne pas le désorienter. Le joueur a deux moyens pour s'orienter : (1) la carte du monde, montrant la position du joueur (en gris), celle des autres vaisseaux et des îles ; (2) le radar. Trois types de vaisseaux sont représentés : (1) les Cargos, inoffensifs, lents, peu résistants, représentés de couleur bleu sur la carte et le radar ; (2) les destroyers, agressifs, lents, résistants, représentés en rouge sur la carte et le radar ; et (3) les sous-marins, agressifs, rapides, peu résistants représentés en rouge sur la carte et le radar. Sur l'océan, 8 vaisseaux sont en permanence en déplacement d'une île vers une autre. La première île, Moscou (Mission 1) est située au Nord-Ouest, la seconde, Washington (Mission 2) au Nord-est et la troisième, Paris (Missions 3 et 4) au Sud.

Le joueur peut rester en surface, ou aller sous l'eau. En surface, il/elle peut changer de point de vue (première personne, vues « canon » et « pont » ; troisième personne, vue « vaisseau »). Sous l'eau, le sous-marin dispose uniquement d'un point de vue à la première personne. Le joueur gagne des points d'expérience et de l'argent pour chaque vaisseau détruit, plus pour les vaisseaux agressifs que pour ceux inoffensifs. Le verrouillage de la cible est automatique. Quand le vaisseau se trouve dans le champ de portée du viseur, le ciblage du vaisseau et sa barre de vie apparaissent autour de lui. Le joueur doit alors réaliser la commande « Tirer » pour blesser le vaisseau ennemi (Figure 9). Le sous-marin du joueur dispose d'une plus grande portée de tir comparée à celle des vaisseaux agressifs, limitant ainsi le risque d'échec. Pour éviter les combats, le joueur peut pénétrer dans l'eau, le rendant ainsi invisible. Toutefois, il peut toujours cibler et continuer à détruire des vaisseaux. Quand un vaisseau est détruit, un autre apparaît aléatoirement sur la carte. Quand le sous-marin du joueur est détruit, un message apparaît à l'écran l'informant qu'il a été détruit et qu'il va être téléporté près d'une île dans 5 secondes. Le joueur repartira néanmoins avec la mise de départ du scénario de jeu (10 000 \$). Cette dynamique de jeu assure au joueur d'être toujours confronté aux autres vaisseaux et le force à combiner plusieurs actions, rendant le jeu cognitivement et physiquement plus stimulant.



Figure 9 : Environnement virtuel d’X-Torp et description de l’interface de jeu. (En haut), vue « canon », un cargo est à portée de tir (cible verrouillée), sa vie restante apparaît en bleu au dessus du viseur. Dans cette image, le joueur active simultanément les commandes « Avancer » et « Tirer ». Les triangles verts sur le radar indiquent les îles et le point bleu entouré d’un rectangle vert indique le cargo verrouillé. (A gauche), vue « sous l’eau », un destroyer est à portée de tir. (A droite), vue « canon », un message indique la victoire face à un vaisseau ennemie. Les munitions et l’énergie sont différentes sous l’eau (batterie et torpille) et en surface (essence et obus).

Le joueur doit gérer l’état de fonctionnement de son propre sous-marin. Ce fonctionnement reste toutefois simple et en partie automatisé. La vie du sous-marin, les munitions et les énergies nécessaires pour se déplacer sont limitées (Figure 9). Pour réparer le sous-marin et refaire le plein de munitions, le joueur peut tout acheter sur les îles. Pour rentrer sur une île, le joueur doit juste foncer sur l’île avec la commande « Avancer », aussi bien sous l’eau que hors de l’eau. Une animation se lance automatiquement montrant l’arrivée du sous-marin sur l’île (Figure 10). L’achat des ressources se fait de manière automatique et est exposé au joueur par une fenêtre en 2D (Figure 10). Cette dynamique incite le joueur à voyager davantage entre la mer et les îles. Sur les îles, le joueur doit compléter 4 missions : 1 à Moscou, 1 à Washington et 2 à Paris. Une fois les ressources achetées, il lui est proposé de faire la mission de l’île. S’il accepte, la mission commence (Figure 10). S’il refuse ou s’il n’y a plus de missions à réaliser, le sous-marin est renvoyé de l’autre côté de l’île en mer. Chaque mission est composée de 6 étapes, 4 sous forme de mini-jeux en 2D et 2 sous forme de combat en mer (Figure 10). Tout comme la fenêtre du menu, les mini-jeux sont réalisés avec

l'utilisation de la main virtuelle. Une partie de ces mini-jeux est construite sur la base des tests neuropsychologiques relatifs aux fonctions exécutives, la mémoire et l'attention visuelle. Ces mini-jeux utilisent des items alternatifs aux tests standards pour ne pas interférer avec les prescriptions des bilans cognitifs pratiqués avec les thérapeutes. Dans le but de garder à la fois les dynamiques ludiques et d'entraînement, ces mini-jeux donnent plus d'informations en temps réel sur les performances, permettant ainsi de potentialiser la compréhension et la motivation au jeu (Figure 10, cf. section Le Gameplay d'X-Torp – Mode Thérapeute). Leur design est également adapté au scénario d'X-Torp. Le joueur progresse dans les missions étape par étape. Les mini-jeux et les combats en mer alternent. A chaque étape, le but est de réaliser le meilleur score dans le temps imparti. Cette dynamique de jeu permet au joueur de ne pas rester bloqué sur une étape. Les consignes nécessaires à la réalisation d'un mini-jeu et pour passer à l'étape suivante d'une mission sont présentées en haut de l'écran, ce qui permet de guider continuellement le joueur tout au long de la mission. Chaque étape de mission permet au joueur de gagner des points d'expérience et une somme d'argent. Chaque mission permet au joueur de trouver un trésor (p. ex., une œuvre d'art), indépendamment du système de points d'expérience (Figure 10). Cette dynamique associée aux missions permet au joueur d'alterner des phases physiquement inactives (mini-jeux) avec des phases physiquement actives (navigation et combat en mer).



Figure 10 : Exemple d'une mission d'X-Torp. (En haut à gauche), arrive sur l'île de Washington. (En haut à droite), achat automatique des ressources. (Au milieu à gauche), demande de réalisation d'une mission. (Au milieu à droite), présentation des étapes de mission pour trouver le trésor. (En bas à gauche), un exemple d'étape de mission, un mini-jeu en 2D faisant appel aux fonctions exécutives et attentionnelles. (En bas à droite), la fin de la mission et sa récompense associée.

5 Le Gameplay d'X-Torp – Mode Thérapeute

Un Mode Thérapeute (MT) a aussi été conçu dans X-Torp. Avec un identifiant et un mot de passe personnel, le thérapeute peut se connecter à sa session (Figure 11), dans laquelle il peut visualiser la liste de ses patients et accéder à une batterie de tests cognitifs. Sur la plateforme du concepteur, il peut aussi consulter les résultats des patients aux MT (résultats aux tests) et Mode Scénario (MS, classement, points d'expérience, temps de jeu, vaisseaux détruits, résultats détaillés des missions etc.).



Figure 11 : Interface du mode thérapeute d’X-Torp. A gauche se trouve la liste des patients ; à droite, la liste des tests neuropsychologiques.

Les tests du MT sont des versions virtuelles de certains tests neuropsychologiques utilisés en pratique clinique. Les seules différences sont qu’ils sont conceptualisés avec les graphismes d’X-Torp et utilisent aussi des items alternatifs aux tests standards (Figure 12). En accord avec les tests neuropsychologiques classiques, un minimum de retour d’information sur les performances est donné au joueur. Ces tests sont prévus pour être réalisés en présence du thérapeute.

Excepté pour le X-Torp Go Non-Go Reaction Time Test (X-Torp GNGRTT), les tests cognitifs du MT d’X-Torp se réalisent via le Kinect™. Ces tests incluent une version virtuelle des tests d’évaluation des fonctions exécutives (X-Torp Trail Making Test [X-Torp TMT], X-Torp Digit Symbol Substitution Test [X-Torp DSST], X-Torp GNGRTT), de la mémoire (X-Torp Delayed Matching to Sample 48 [X-Torp DMS 48]) et l’attention visuelle et sélective (X-Torp Cancellation Test, X-Torp CT). Le X-Torp TMT consiste à sélectionner, aussi vite que possible, des nombres dans l’ordre ascendant (de 1 à 20, version A) et

sélectionner alternativement des nombres et des lettres, toujours dans l'ordre ascendant (de 1 à 10 et de A à J, version B). Le X-Torp DSST consiste à sélectionner directement le symbole correspondant sur une liste de paires (1 symbole apparié avec un chiffre), suivant une liste de chiffres le plus rapidement possible durant 120 secondes. Pour les X-Torp TMT et X-Torp DSST, le joueur doit sélectionner la bonne réponse pour passer à l'item suivant. S'il ne sélectionne pas la bonne réponse, rien ne se passe. Le X-Torp GNGRTT et le X-Torp DMS 48 sont très similaires à leurs équivalents standards. Enfin, le X-Torp CT est une version virtuelle adaptée du CT (Della Sala, Laiacona, Spinnler & Ubezio, 1992) mais utilisant des images. Il consiste à sélectionner directement 30 images (p. ex., des missiles), le plus vite possible, noyées dans une multitude d'images distrayantes (p. ex., des boucliers, des mines). Le joueur doit sélectionner l'icône « valider » une fois qu'il pense avoir terminé l'exercice.



Figure 12 : Exemples de tests du MT d'X-Torp. (En haut à gauche), X-Torp TMT B. (En haut à droite), X-Torp DSST. (En bas à gauche) X-Torp DMS 48. (En bas à droite), X-Torp CT.

6 Choix ergonomiques propres aux populations cibles

Suivant le critère « compatibilité », relatif aux caractéristiques du futur utilisateur, lequel présente une pathologie cognitive, les critères ergonomiques renvoyant directement à la compréhension du joueur ont été définis de la manière suivante :

- **Guidage** : dans X-Torp, les informations relatives aux tâches à accomplir sont en permanence affichées sur le haut de l'interface. De cette manière, si le joueur oublie la consigne, il pourra la relire. Egalement, un retour d'information supplémentaire sur les commandes de jeu (autre que les mouvements de l'avatar) est permanent, de façon à ce que le joueur identifie ce qu'il fait et mémorise plus facilement les commandes.
- **Adaptabilité ; Homogénéité / Cohérence** : au détriment de l'adaptabilité, il semble nécessaire de rendre fortement homogène toutes les situations de jeu qui se ressemblent pour faciliter leurs apprentissages. Les situations pourraient prendre ainsi des formes plus linéaires que recommandées par Bastien & Scapin (1992).
- **Signifiante des codes et dénominations** : les joueurs cibles n'ont probablement aucune expérience dans le domaine. Les objets sur l'interface et les commandes de jeu se veulent simples, explicites, non en rapport avec les codes usuels des JV mais en accord avec les connaissances sémantiques des populations cibles. Ainsi, le choix d'icônes (d'images) a été privilégié pour définir les objets de l'environnement du joueur plutôt que des codes de couleur (p. ex., un cœur pour définir la santé de l'avatar au lieu d'une simple jauge de couleur rouge habituellement utilisée dans les MMORPG).

7 L'assistance

La présence d'un thérapeute ou clinicien ou de l'aidant non novice doit être envisagée. Cette aide rajoutera d'une part un aspect social supplémentaire (partenaire de jeu). D'autre part, il complètera le niveau de guidage proposé par le jeu et dosera la charge d'apprentissage

ou d'effort physique en fonction du joueur en séance (similairement à un moniteur d'auto-école). Aussi, il pourrait progressivement expliquer au joueur lors de l'exploration du jeu les côtés stimulants (physiques et cognitifs) d'X-Torp en rapport avec le vieillissement et les MN. Enfin, il peut donner plus de retours sur les progrès du joueur au cours des séances, et procéder à de nouvelles évaluations si besoin.

Chapitre 5 : Utilisabilité d’X-Torp Version 1

Expérimentation : Stimulation physique et cognitive à travers un exergame chez les sujets présentant un vieillissement normal, des troubles cognitifs légers et modérés¹⁰

1 Introduction

Dû au vieillissement de la population, le nombre de personnes présentant une MN conduisant à une démence, un déclin des capacités mentales qui interfèrent avec les activités de vie quotidienne, devrait progresser ces 50 prochaines années (Alzheimer’ s Disease International, 2014). La démence peut résulter de différentes causes, la plus connue étant la MA. Elle est souvent précédée par un stade de pré-démence, connu sous le nom de MCI, caractérisé par un déclin cognitif plus important que celui attendu pour un âge donné mais qui n’interfère pas significativement avec les activités de vie quotidienne (Alzheimer’ s Disease International, 2014 ; Petersen et al., 1997). Dépendant de son étiologie et du stade de la maladie, la démence peut être caractérisée par des symptômes cognitifs, comportementaux, moteurs et fonctionnels. Les processus biologiques impliqués dans les MN sont très hétérogènes, et incluent des inflammations neuronales, des glioses, des pertes synaptiques, des neurodégénérations, une atrophie cérébrale et des altérations de la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (Raz et al., 2015). Ces altérations moléculaires sont dues, entre autres, à des altérations dans le métabolisme bioénergétique (liées à des dysfonctions des mitochondries des cellules cérébrales), à un phénomène d’hypoperfusion/hypoxie et à des dysfonctions cérébrovasculaires (principalement dues à des atteintes des petites vaisseaux sanguins du cerveau, Raz et al., 2015). D’un point de vue thérapeutique, de nombreuses recherches se concentrent sur la modification de l’avancée de la maladie ou sur la réduction des symptômes cliniques. Les interactions sociales, les activités et la motivation peuvent avoir

¹⁰ Ben-Sadoun, G., Sacco, G., Manera, V., Bourgeois, J., König, A., Foulon, P., Fosty, B., Bremond, F., d’Arripe-Longueville, F., Robert, P.H. (2016). Physical and cognitive stimulation using an exergame in subjects with normal aging, mild and moderate cognitive impairment. *Journal of Alzheimer’s Disease: JAD*, 53(4), 1299-1314.

un impact majeur dans la progression de la maladie. De ce fait, les approches non-médicamenteuses ciblant le style de vie des individus présentent un intérêt particulier.

L'hypothèse de l'Enrichissement Cognitif (Hertzog et al., 2008), stipule que « l'ensemble des comportements d'un individu (incluant l'activité cognitive, sociale, physique et d'autres comportements) va avoir un impact significativement positif sur le niveau de fonctionnement effectif de notre cerveau aux âges les plus avancés. » Cette hypothèse assigne un rôle clef à la stimulation cognitive, l'activité physique (APRA d'intensité modérée à intense), l'engagement social, les émotions et la personnalité. Ces facteurs sont supposés moduler la neuroplasticité quel que soit l'âge. De ce fait, une amélioration du fonctionnement cognitif et un délai du déclin cognitif peuvent être possibles même si les comportements d'enrichissement ont débuté à l'âge avancé. Une des idées de l'hypothèse de l'Enrichissement Cognitif est de concevoir des EE pour stimuler simultanément plusieurs facteurs (p. ex., les cognitions associées à de l'activité physique), dans le but d'optimiser le fonctionnement du cerveau). Cette approche est en ligne avec les récentes recommandations faites pour la prévention de la démence (Alzheimer's Disease International, 2014 ; O'Donnell, Manera, Köhler, & Irving, 2015). L'APRA, seul ou dans le contexte d'un EE (voir pour une complète revue Sale et al., 2014), semble être une activité à fort impact pour retarder les processus neurodégénératifs. Des données scientifiques montrent des effets positifs de l'APRA intense (comme, la marche, le vélo ou le rameur) sur les cognitions (meilleure mémoire et fonctions exécutives), la neuroplasticité (dans la région frontale et l'hippocampe) et l'aptitude cardiorespiratoire maximale (aussi nommée « l'aptitude maximale aérobie » ou « la consommation maximale d'oxygène par unité de temps », le $VO_2\text{max}$) chez les personnes âgées et les sujets présentant une démence (Baker et al., 2010 ; Ben-Sadoun, Petit, Colson, König, & Robert, 2015 ; Yu, 2011). De plus, les études animales ont montré des effets positifs de l'APRA d'intensité modérée à intense sur le métabolisme aérobie cérébral, qui peut réduire

les altérations du métabolisme bioénergétique (p.ex., augmentation du fonctionnement des mitochondries dans les cellules du cerveau, Marques-Aleixo et al., 2012). Ces effets sont associés à des améliorations des fonctions cognitives, la neuroplasticité, et la réduction des processus neuropathologiques chez les animaux modèles d'une MN (Marques-Aleixo et al., 2012 ; Um et al., 2011).

L'idée d'utiliser les JV comme EE est très récente (Anderson-Hanley et al., 2012 ; Maillot et al., 2012). Elle dérive du fait que les JV sont intrinsèquement divertissants et peuvent impliquer de l'activité physique, conduisant à des effets synergiques sur les fonctions cognitives et la neuroplasticité (Anderson-Hanley et al., 2012 ; Ben-Sadoun et al., 2015 ; Maillot et al., 2012). Les SG sont des JV (c.-à-d. un challenge mental ludique, joué avec une technologie informatisée) conçus initialement pour éduquer ou entraîner le joueur. Les JV impliquant de l'exercice physique sont nommés exergames. Les cognitions stimulées par les JV dépendent du type de JV (Basak, Boot, Voss, & Kramer, 2008 ; Powers et al., 2013 ; Toril et al., 2014). Les JV peuvent favoriser la neuroplasticité quel que soit l'âge (Basak et al., 2011 ; Hyun et al., 2013 ; Kühn et al., 2014). Les JV d'action, nécessitant au joueur de déplacer son avatar pour éviter des projectiles et tirer pour détruire des cibles (souvent joués à la première ou troisième personne), semblent améliorer plusieurs habilités cognitives et perceptives, tels que l'attention visuospatiale et sélective (Belchior et al., 2013 ; Dye et al., 2009a ; Green & Bavelier, 2003 ; Green & Bavelier, 2007), les processus de traitement de l'information (Dye et al., 2009b) et la mémoire de travail (Colzato et al., 2013). De plus, les JV de réflexion ou mini-jeux de résolution de problèmes sont très répandus et semblent améliorer les fonctions exécutives et les processus de traitement de l'information chez les sujets âgés (Nouchi et al., 2012). Ils peuvent également produire des changements au niveau de la structure cérébrale chez les sujets jeunes (Colom et al., 2012).

Les exergames (p. ex., « WiiTM Sport ») utilisent généralement des dispositifs de capture des mouvements tels que la WiiTM et la KinectTM. Des études chez les sujets âgés ont montrés des effets positifs des exergames sur les émotions (p. ex., meilleurs qualité de vie ressentie et réduction des symptômes dépressifs), l'aptitude physique (p. ex., amélioration de la force, de la souplesse et des performances aérobies), les fonctions exécutives et des processus de traitement de l'information (Maillot et al., 2012 ; Rosenberg et al., 2010). Toutefois, la plupart des exergames existant induisent une APRA d'intensité légère (Taylor et al., 2012). Ce phénomène est principalement dû au fait que les systèmes des WiiTM et KinectTM sont limités en capture du mouvement en profondeur, ce qui a pour conséquence d'impliquer des mouvements stationnaires principalement à partir des membres supérieurs (Taylor et al., 2012). Le cybercycle utilisant l'« Espresso[®] HD bike » (courses virtuelles jouées sur vélo d'appartement) cible spécifiquement l'entraînement aérobie. L'APRA intense sur cybercycle, chez les personnes âgées (et chez quelques sujets présentant un MCI), améliore les fonctions exécutives et régule à la hausse les facteurs de neuroplasticité, plus qu'une même APRA seule (Anderson-Hanley et al., 2012).

Le déclin cognitif associé aux MN questionne l'utilisabilité des JV, destinés initialement aux joueurs en bonne sante (Ben-Sadoun et al., 2015 ; McCallum & Boletsis, 2013 ; Robert et al., 2014). Par ailleurs, il existe peu de SG utilisables chez les sujets présentant une démence et ils ciblent principalement les cognitions (Benveniste et al., 2012 ; Manera et al., 2015). Récemment, le SeG X-Torp (Ben-sadoun, données non publiées) a été développé pour offrir un EE incluant des stimulations cognitives, émotionnelles et physiques pour les sujets présentant des troubles cognitifs légers à modérés dus à une MN, tels que un MCI et la MA. Toutefois, aucune étude d'utilisabilité ou d'efficacité n'a été conduite sur ce SeG.

Le but de cette étude était d'évaluer l'utilisabilité d'X-Torp chez les sujets présentant une MN incluant un MCI et la MA, lors d'un programme d'entraînement d'1 mois, qui visait à induire une APRA d'intensité modérée. L'utilisabilité était évaluée à travers les temps de jeu, les performances au jeu, le niveau d'intensité aérobie atteint, les émotions perçues et l'utilisabilité perçue. L'utilisabilité des sujets présentant une MN était également comparée à des sujets âgés en bonne santé afin de détecter des possibles problèmes d'utilisabilité relatifs à la maladie, ce qui pourrait aider à trouver certaines règles ergonomiques concernant l'usage et la conception de SeG pour ces populations. Les hypothèses suivantes ont été avancées : (H1) tous les participants devraient être capables de finir le jeu, mais les temps de jeu et les performances au jeu devraient être moins importants chez les sujets présentant une MN, dus à leurs déclin aux niveaux cognitifs, physiques et de la capacité d'apprentissage ; (H2) tous les participants devraient être capables d'augmenter le niveau d'intensité aérobie durant le mois d'entraînement, pour atteindre une APRA d'intensité modérée à la fin du programme, grâce aux modes de commandes de jeu d'X-Torp ; (H3) tous les participants devraient rapporter principalement des émotions positives, mais celles-ci devraient être plus basses chez les sujets présentant une MN, qui sont souvent plus apathiques ; (H4) la compétence perçue devrait augmenter durant le mois d'entraînement chez tous les participants, due à l'expérience de jeu et l'aide du clinicien ; (H5) la difficulté perçue devrait être comparable chez les deux groupes, et ne devrait pas changer durant l'entraînement, principalement due à une augmentation conjointe de la compétence perçue ; (H6) l'intérêt perçu devrait être moins important chez les sujets présentant une MN au début du programme d'entraînement comparé aux sujets en bonne santé (dû à nouveau à l'apathie) mais devrait augmenter à la fin du programme d'entraînement, dû à une meilleure compréhension du jeu ; et (H7) les effets pré- post-entraînement sur les performances cognitives et physiques sont exploratoires mais devraient être différentes entre les deux groupes, avec une augmentation des performances physiques

pour les sujets présentant une MN, du fait de leur plus faible niveau physique de base ; et avec une petite augmentation des performances cognitives, plus importantes pour les sujets âgés en bonne santé, due à leurs capacités d'apprentissage préservées.

2 Méthodes

2.1 Participants

Dix sujets âgés présentant des troubles cognitifs de type MCI ou MA (groupe MN, incluant 3 sujets présentant une MA, 1 présentant une MA mixte, 4 présentant un MCI non-amnésique et 2 présentant un MCU amnésique ; 4 femmes, 6 hommes ; âge $82,3 \pm 6,4$ ans ; taille = $167,3 \pm 11,2$ cm ; poids = $78,5 \pm 17,8$ kg) et 8 sujets Agés de Contrôle en bonne santé (groupe AC, 5 femmes, 3 hommes, âge = $71,4 \pm 10,1$ ans ; taille = $167,1 \pm 11,8$ cm ; poids = $68,5 \pm 14,1$ kg) étaient volontaires pour participer à cette étude. Les participants étaient recrutés au CMRR¹¹ de Nice en France. Tous les participants étaient à la retraite ou sans activité professionnelle depuis au moins 2 ans. Les participants étaient inclus dans le groupe MN s'ils avaient un diagnostic de MCI ou de MA ou de MA mixte aux stades légers à modérés en accord avec la Classification Internationale des Maladies (CIM 10, 2010) et les critères de Petersen (Petersen et al., 1997). Les participants n'étaient pas inclus s'ils avaient des troubles visuels majeurs, des troubles moteurs nécessitant une aide à la marche, des antécédents d'infarctus du myocarde, une tachycardie et une hypertension non contrôlée. L'étude était réalisée en accord avec la déclaration d'Helsinki, et était approuvée par un comité d'éthique (ID RCB: 2013-A00979-36). Tous les participants ont reçu des explications écrites détaillées des buts et procédures de l'étude et ont exprimé leur consentement par écrit avant de prendre part à l'étude.

¹¹ Centre de Mémoire de Ressource et de Recherche

2.2 Matériels

Le SeG était contrôlé par un ordinateur de bureau (Dell Precision M4600, Intel Core i7 2x2.2 GHz processor, 3Gbytes of RAM, AMD Fire Pro M5950 graphic card) et présenté sur un écran haute définition (68 cm × 121 cm). Les participants interagissaient avec le SeG grâce à la caméra RGB-D Kinect™ (V.1, Microsoft, U.S.A) et ses logiciels (Software Development Kit, Microsoft, USA).

Les pressions sanguines et la FC de repos des participants étaient mesurées avant chaque entraînement par un tensiomètre (Omron, M6W, IntelliSense). Les FC des participants étaient enregistrées en continue durant les sessions d'entraînement par un cardiofréquencemètre portable (Polar®, RS400, Finland). Un logiciel était utilisé pour extraire et traiter les données de FC.

Le 6MiWT était réalisé sur un tapis de marche non motorisé (Striale ST-678 Mag-Jogger II).

2.3 Le SeG X-Torp

X-Torp est un jeu d'action jouable avec la Kinect™.

Le MS combine des dynamiques d'action avec l'exploration d'un monde ouvert et des mini-jeux. Il inclut un système de points d'expérience, qui reflète la vitesse de progression du joueur dans le MS. Pour finir le MS, le joueur doit collecter assez de points d'expérience et d'argent en détruisant les autres vaisseaux dans l'océan et en accomplissant toutes les missions sur les îles. Le joueur contrôle un sous-marin en temps réel avec ses propres mouvements, stationnaires et impliquant (contrairement à la plupart des exergames) principalement les membres inférieurs (p. ex., marcher ou courir sur place pour faire avancer le sous-marin, utiliser les bras pour tirer). De ce fait, plusieurs actions impliquant les membres inférieurs et supérieurs peuvent être combinées. Quand le joueur fait un mouvement pour

réaliser une commande, le sous-marin réalise l'action aussi longtemps que le joueur maintient son mouvement. Quand le joueur stoppe, le sous-marin stoppe l'action. Les missions prennent la forme de mini-jeux en 2D inspirés des (1) tests neuropsychologiques utilisés en pratique clinique et (2) des JV de réflexion. Durant les mini-jeux, le joueur utilise sa main pour faire apparaître une main virtuelle qui suit ses mouvements. Le joueur sélectionne une icône en positionnant la main virtuelle dessus et en gardant sa position pendant 1 seconde. De ce fait, le joueur est considéré comme physiquement actif quand il navigue ou combat en mer et physiquement inactif quand il réalise les mini-jeux sur les îles. Les résultats dans une étude pilote chez des sujets jeunes suggéraient que le MS de X-Torp peut se réaliser en 2 heures.

Le MT contient des versions virtuelles des tests neuropsychologiques. Les seules différences sont qu'ils ont le design d'X-Torp et sont réalisables avec la Kinect™. Ces tests étaient utilisés pour initialement définir les mini-jeux inclus dans le MS d'X-Torp, lesquels utilisent différents items. Le MT contenait également un test physique réalisable dans un environnement virtuel.

2.4 Procédure

Les participants ont suivi 13 sessions d'entraînement avec X-Torp pendant 5 semaines, pour un total de 10 heures de stimulation par le jeu. Des évaluations cliniques étaient réalisées avant de débiter le programme. Des évaluations complètes des fonctions physiques et cognitives (2 à trois heures) étaient réalisées par un médecin 1 semaine avant de démarrer l'entraînement au jeu (tests pré-entraînement) et une semaine après avoir fini l'entraînement (tests post-entraînement).

2.4.1 Évaluations cliniques

Les caractéristiques de base des participants incluaient les données anthropométriques : le genre, l'âge, la taille, le poids, l'Indice de Masse Corporelle (IMC) et le niveau d'éducation. L'inventaire apathie (Apathy Inventory, [AI], Robert et al., 2002) et l'inventaire neuropsychologique (Neuropsychological Inventory, [NPI], Cummings et al., 1994) étaient utilisés pour évaluer respectivement, la présence d'apathie et les troubles du comportement. Le Mini Mental State Examination (MMSE, Folstein, Folstein, & McHugh, 1975) et l'échelle de démence clinique (Clinical Dementia Rating [CDR], Morris, 1993), mesuraient, respectivement, le niveau cognitif global et la sévérité de la démence.

2.4.2 Évaluation de la condition physique et des fonctions cognitives avant et après

l'entraînement au jeu

L'évaluation de la condition physique incluait 3 tests standardisés évaluant la condition physique des membres inférieurs durant la posture, la locomotion et le transfert assis-debout : le Short Physical Performance Battery (SPPB, Guralnik et al., 1994) ; le 10-Meter Walk Test, (10MeWT, (Bohannon, 1997; Kemoun et al., 2010) ; et le Time Up and Go (TUG, Podsiadlo & Richardson, 1991). La capacité d'exercice aérobie était également mesurée par le 6MiWT sur tapis roulant (ATS Committee on Proficiency Standards for Clinical Pulmonary Function Laboratories, 2002 ; Laskin et al., 2007). Les évaluations cognitives incluaient : le MMSE ; la Frontal Assessment Battery (FAB, Dubois, Slachevsky, Litvan, & Pillon, 2000) ; la batterie cognitive courte mémoire et fluence verbale (Short Cognitive Battery [SCB] Memory and Fluency, Robert et al., 2003) ; deux tests des fonctions exécutives (le TMT, Reitan, 1958 ; le DSST, Christensen, Girard, & Bagby, 2007) ; et un test de mémoire (le DMS 48, Barbeau et al., 2004 ; Rullier et al., 2014).

2.4.3 Sessions d'entraînement sur X-Torp

2.4.3.1 Entraînement 1

La première session d'entraînement (E1) était la plus longue (80 minutes, voir Tableau 4), mais incluait des pauses régulières pour permettre aux participants de récupérer. Les participants ont réalisé les tests cognitifs inclus dans le MT d'X-Torp dans le but de se familiariser avec les mini-jeux et pour évaluer leurs performances à ces tests avant de démarrer l'entraînement sur le MS d'X-Torp. Ces tests incluaient des versions d'X-Torp des : TMT (le X-Torp TMT) ; DSST (le X-Torp DSST) ; DMS 48 (le X-Torp DMS 48); de l'inhibition à travers le paradigme du Go-No Go Reaction Time Test (le X-Torp GNGRTT, Houghton & Tipper, 1996) et de l'attention visuelle et sélective à travers le paradigme du Cancellation Test (le X-Torp CT, Della Sala, Laiacona, Spinnler, & Ubezio, 1992). Au début et à la fin de cette session, les participants effectuaient également le X-Torp 6MiWT, reprenant les mêmes principes que le 6MiWT.

2.4.3.2 Entraînement 2 – Entraînement 12

Les 11 sessions d'entraînement suivantes (E2-E12) ont débuté 1 semaine après l'E1 et à raison de 3 fois par semaine sur une période de 4 semaines. Durant ces sessions, les participants étaient entraînés avec le MS d'X-Torp, pour une durée totale de 7 heures et 40 minutes d'entraînement (Tableau 4). Après chaque première session d'une semaine (E2, E5, E8 et E11), il était demandé aux participants de reporter leurs émotions perçues à travers le Positive Affect Negative Affect Scale (PANAS, Watson, Clark, & Tellegen, 1988) et leur utilisabilité perçue par questionnaire (voir Tableau 5). Les entraînements sur le MS d'X-Torp avaient deux objectifs spécifiques : la durée de session et le niveau d'intensité aérobie, lesquels évoluaient d'une semaine sur l'autre (Tableau 4). De ce fait, les deux premières semaines d'entraînement sur le MS d'X-Torp étaient considérées comme phase

d'apprentissage (Semaines 2-3) et les deux dernières comme phase d'optimisation physique et cognitive (Semaines 4-5). Un clinicien accompagnait les participants pour les aider à accomplir les objectifs de session en utilisant un chronomètre et un cardio fréquencemètre portable (p. ex., durant la phase d'optimisation, le clinicien demandait aux participants de marcher plus vite ou de courir sur place pour augmenter l'intensité d'exercice). Les participants étaient autorisés à (1) faire des pauses durant les sessions s'ils étaient fatigués, (2) stopper la session s'ils étaient trop fatigués ou peu disposés à continuer quelle qu'en soit la raison et (3) continuer l'entraînement quelques minutes après la fin d'une session pour finir une tâche en cours.

2.4.3.3 Entraînement 13

Durant la dernière session d'entraînement (E13), les participants utilisaient le MS pendant 20 minutes (pour ne faire que des phases d'activité physique).

Ensuite, les participants utilisaient le MT pendant 40 minutes pour faire à nouveau les tests d'X-Torp déjà effectués à l'E1 (mais pas le X-Torp 6MiWT) dans le but d'évaluer les améliorations aux tests du MT.

2.5 Données analysées

Temps de jeu durant l'entraînement au MS d'X-Torp : (1) le temps de jeu total (2) le temps de jeu physiquement inactif (mini-jeux), (3) le temps de jeu physiquement actif (navigation et combat en mer), enregistrés par le cardio fréquencemètre (qui était stoppé durant les pauses et les phases de jeu physiquement inactives) étaient mesurés.

Les performances durant l'entraînement au MS d'X-Torp : le nombre total de fois où le jeu a été terminé a été relevé. De plus, la vitesse de progression au MS durant tout le programme d'entraînement était évaluée par le nombre de points d'expérience cumulés (Performance-1)

et l'argent cumulé (Performance-2) entre E2 et E13 divisé par le temps total (en minute) passé à jouer. De meilleures Performance-1 et Performance-2 indiquaient une progression plus rapide au MS.

Le niveau d'intensité aérobie atteint durant l'entraînement au MS d'X-Torp : du fait que l'aptitude cardiorespiratoire semble décliner davantage chez les sujets présentant une MA dès les stades légers comparée à celle des sujets âgés en bonne santé (exprimée en FC^{peak} et VO_2^{peak} durant un exercice maximal d'intensité progressive sur tapis roulant, Burns et al., 2008 ; Vidoni et al., 2012), le niveau d'intensité aérobie atteint n'était pas exprimé en pourcentage de FCr relative aux équations d'estimation de la FC maximale, lesquels sont généralement utilisées chez les sujets âgés en bonne santé (voir pour exemple Anderson-Hanley et al., 2012). Pour chaque session d'entraînement (E2-E13), durant les phases physiquement actives, le niveau d'intensité aérobie moyen était exprimé en termes de pourcentage de la FCr relative au peak de la FC mesurée lors du 6MiWT ($moy\%FCr^{peak}$). Il était calculé suivant les équations :

$$moy\%FCr^{peak} = ((MoyFC_{exercice} - FC_{repos}) / FCr^{peak}) \times 100 ; \text{ avec :}$$

$$FCr^{peak} = FC^{peak} - FC_{repos}.$$

Du fait du caractère intermittent de l'activité physique induite par le MS d'X-Torp, la plus haute valeur de la FC durant chaque session d'entraînement était exprimée en utilisant le pourcentage maximal de la FCr^{peak} ($max\%FCr^{peak}$) et était calculée suivant l'équation :

$$max\%FCr^{peak} = ((maxFC_{exercice} - FC_{repos}) / FCr^{peak}) \times 100).$$

Ensuite, les moyennes des $moy\%FCr^{peak}$, $max\%FCr^{peak}$ et des temps de jeu physiquement actifs durant la phase d'apprentissage (Semaines 2-3) et d'optimisation (Semaines 4-5) étaient calculées.

Emotions perçues durant l'entraînement au MS d'X-Torp : chaque item du PANAS était scoré à travers une échelle en 5 points de type Likert allant de 1 = « pas du tout » à 5 =

« énormément ». Pour chaque premier entraînement de chaque semaine (E2, E5, E8 et E11), les scores d'affects positifs (/50) et négatifs (/50) du PANAS étaient mesurés en faisant les sommes respectives des scores des 10 items positifs et des 10 négatifs. Ensuite, les sommes des affects positifs (/100) et négatifs (/100) durant la phase d'apprentissage (Semaines 2-3) et la phase d'optimisation (Semaines 4-5) étaient calculées.

Utilisabilité perçue durant l'entraînement au MS d'X-Torp : les questions portant sur l'utilisabilité perçue étaient conçues selon l'approche des deux dimensions du modèle du TAM de Davis (voir revue pour information, Holden & Karsh, 2010) : « la facilité d'utilisation » (3 questions sur la compétence perçue et 3 questions sur la difficulté perçue) et « l'utilité perçue » (3 questions sur l'intérêt perçue, voir Tableau 5). Les questions étaient scorées à travers une échelle en 7 points de type Likert allant de 1 = « pas du tout » à 7 = « énormément ». Après chaque première session de chaque semaine (E2, E5, E8 et E11), la compétence perçue (/21), la difficulté perçue (/21) et l'intérêt perçu (/21) étaient mesurés par la somme des scores de leurs 3 questions respectives. Ensuite, les sommes des scores de compétence (/42), difficulté (/42) et intérêt (/42) durant la phase d'apprentissage (Semaines 2-3) et la phase d'optimisation (Semaines 4-5) étaient calculées.

Evaluations cliniques : l'IMC était mesuré en utilisant l'équation : $IMC = Taille / poids^2$. Le niveau d'éducation était mesuré sur une échelle de 5 points : 1 = « aucun niveau scolaire » ; 2 = « primaire » ; 3 = « collège » ; 4 = « lycée » et 5 = « post-bac ». Les scores aux AI, NPI, MMSE et CDR sum of box étaient calculés.

Evaluation de la condition physique (tests standards) : le score au SPPB, les temps aux 10MeWt et TUG ainsi que la distance au 6MiWT étaient évalués durant les sessions de tests pré- et post-entraînement. Dans le but de relever la plus haute valeur de FC^{peak} durant le 6MiWT, l'inclinaison du tapis de marche était de 5 % et la résistance magnétique était à un

niveau intermédiaire. La plus grande distance parcourue entre les deux 6MiWT était gardée comme performance aux tests pré- et post-entraînement.

Evaluation de la condition physique (MT d'X-Torp) : durant le X-Torp 6MiWT (T1), le participant marchait sur le tapis de marche simultanément avec un avatar qui marchait dans une ville virtuelle. La plus grande FC relevée entre les deux 6MiWT et les deux X-Torp 6MiWT était gardée comme FC^{peak} .

Evaluation des fonctions cognitives (tests standards) : les scores aux MMSE, FAB, SCB Fluency et SCB Memory étaient évalués durant les sessions de tests pré- et post-entraînement. Les temps aux TMT (A et B), les scores aux DSST et DMS 48 (uniquement étape une en mémoire explicite, Barbeau et al., 2004 ; Rullier et al., 2014) étaient évalués durant les sessions de tests pré- et post-entraînement.

Evaluation des fonctions cognitives (MT d'X-Torp) : le X-Torp TMT consistait à sélectionner des nombres dans l'ordre croissant (de 1 à 20, X-Torp TMT A, placés différemment du test standard) et en alternant les nombres et lettres dans l'ordre ascendant (de 1 à 10 et de A à J, X-Torp TMT B, placés différemment du test standard) aussi vite que possible. Le X-Torp DSST consistait à sélectionner le symbole correspondant dans une liste où ces symboles étaient associés à un chiffre (séquence différente du test standard), suivant une liste de chiffre, aussi vite que possible en 120 secondes. Le X-Torp DMS 48 utilisait des images alternatives. Le X-Torp CT consistait à sélectionner 30 images cibles parmi plusieurs images distractrices aussi vite que possible. Pour le X-Torp GNGRTT, les participants cliquaient sur la souris aussi vite que possible quand une sphère de couleur verte apparaissait et ne rien faire quand un carré de couleur vert rayé apparaissait. Les temps aux X-Torp TMT (A et B), les scores aux X-Torp DSST, X-Torp DMS 48, les performances au X-Torp CT (score et temps) et au X-Torp GNGRTT (Actions justes moins actions fausses ; temps de réaction moyen) étaient évalués à E1 et E13.

2.6 Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques étaient réalisées avec STATISTICA 7.0.

Du fait d'un petit nombre de sujets, les évaluations cliniques, les temps de jeu, les performances au jeu entre les deux groupes (MN vs. AC) étaient comparés en utilisant le U de Mann-Whitney avec un $\alpha = .05$.

Pour comparer l'utilisabilité durant la phase d'apprentissage (Semaines 2-3) et la phase d'optimisation (Semaines 4-5) de l'entraînement au MS d'X-Torp, le niveau d'intensité aérobie atteint, les niveaux d'émotions perçues et d'utilisabilité perçue étaient soumis séparément à des ANOVAs à deux facteurs pour mesures répétées : « Groupes » (MN vs. AC) et « Phases d'entraînement » (Semaines 2-3 vs. Semaines 4-5). Lorsqu'un effet d'interaction était significatif, un test post-hoc, le PLSD de Fisher, était utilisé. Les différences étaient considérées comme significatives pour $p < .05$. Avec l'hypothèse d'aucune différence statistique pour la difficulté perçue (H5), les différences n'étaient pas significatives pour un $p > .01$ dans le but de réduire le risque d'erreur de type 1.

Concernant l'utilisabilité perçue, les consistances internes des items composant chaque dimension étaient évaluées en utilisant le coefficient Alpha de Cronbach (Cronbach, 1951).

Les évaluations de la condition physique et des fonctions cognitives (incluant les tests du MT d'X-Torp) avant et après l'entraînement au MS d'X-Torp étaient soumises séparément à des ANOVAs à deux facteurs pour mesures répétées : « Groupes » (MN vs. AC) et « Temps » (tests pré-entraînement vs. tests post-entraînement). Lorsqu'un effet d'interaction était significatif, un test post-hoc, le PLSD de Fisher, était utilisé. Les différences étaient considérées comme significatives pour $p < .05$.

3 Résultats

Tous les participants ont terminé l'étude. Après le recueil de données, un participant du groupe AC a été exclu des analyses car ses performances à plusieurs tests cognitifs étaient supérieures à deux écarts types de la moyenne des participants AC (suggérant la présence d'une MN autre que celles des patients inclus dans l'étude). Ainsi, les résultats reportés se réfèrent à 17 participants, 10 sujets présentant un MN et 7 participants AC.

Une liste complète des résultats des ANOVAs (valeurs de p et F) est consultable au Tableau 6.

3.1 Evaluations cliniques

Les données anthropométriques, les MMSE et CDR sum of box, sont reportés au Tableau 7. Les participants du groupe MN étaient significativement plus âgés ($p=.02$) et avaient un niveau d'éducation plus bas ($p=.03$) que les participants AC, mais les deux groupes ne différaient pas concernant l'IMC ($p=.14$). Par ailleurs, même si la différence n'est pas à un niveau significatif, les sujets présentant une MN semblent avoir des scores à l'AI plus importants que les participants AC ($p=.056$). Aucune différence entre les sujets présentant une MN et les participants AC n'a été trouvée pour les scores au NPI ($p=.08$). Les sujets présentant une MN ont rapporté des scores plus bas aux MMSE ($p=.001$) et plus haut à la CDR sum of box ($p<.0001$) que les participants AC.

3.2 Utilisabilité durant l'entraînement au Mode Scénario d'X-Torp

3.2.1 Temps de jeu et performances au jeu

Les participants AC ont joué plus longtemps durant l'entraînement au MS d'X-Torp que les sujets présentant une MN ($p=.003$), dû à des temps plus longs (plus d'une heure au

total) passé à jouer durant les phases physiquement actives ($p=.007$, voir Tableau 8). Aucune différence durant les phases physiquement inactives a été trouvée ($p=.79$).

Concernant les performances au jeu, les participants AC ont complété le MS d'X-Torp plus de fois que les sujets présentant une MN ($p=.003$) et ont gagné une plus grande proportion de points d'expérience par minute (Performance-1, $p=.003$) et d'argent par minute (Performance-2, $p=.003$, voir Tableau 8).

3.2.2 Le niveau d'intensité aérobie atteint

L'ANOVA pour mesures répétées pour $\text{moy}\%FCr^{\text{peak}}$ avec les facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » a révélé un effet principal significatif du facteur « Phases d'entraînement » ($p=.005$) et un effet significatif d'interaction entre les facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » ($p=.045$, voir Tableau 9). Les tests post-hoc ont révélé que $\text{moy}\%FCr^{\text{peak}}$ augmentait entre les Semaines 2-3 et Semaines 4-5 seulement pour les participants AC (36,3 % d'augmentation, $p=.002$). L'ANOVA pour mesures répétées pour $\text{max}\%FCr^{\text{peak}}$ a révélé seulement un effet principal du facteur « Phases d'entraînement », avec une augmentation de 16,3 % entre les Semaines 2-3 et les Semaines 4-5 ($p=.005$). Curieusement, et bien que l'effet d'interaction ne soit pas à un niveau significatif, l'analyse des effets simples suggère une augmentation de $\text{max}\%FCr^{\text{peak}}$ entre les Semaines 2-3 et Semaines 4-5 seulement pour les participants AC ($F_{(1,6)}=7.04$, $p=.04$).

L'ANOVA pour mesures répétées pour le temps moyen par séance à être physiquement actif a montré seulement un effet principal des facteurs « Groupes » ($p=.001$) et « Phases d'entraînement » ($p=.006$). Les participants AC sont restés plus longtemps actifs par séance que les sujets présentant une MN. Cependant, tous les participants étaient physiquement actifs plus longtemps de 43,3 % entre les Semaines 2-3 et les Semaines 4-5.

3.2.3 Emotions et utilisabilité perçues

Les résultats au PANAS suggèrent que les participants ont rapporté avoir perçu « modérément » des émotions positives et avoir perçu « peu » à « pas du tout » d'émotions négatives. L'ANOVA pour mesures répétées avec les facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » a révélé un effet principal significatif du facteur « Groupes » seulement pour les affects positifs ($p=.01$, voir Tableau 8). Les participants AC ont perçu plus d'émotions positives que les sujets présentant une MN.

La consistance interne (Alpha de Cronbach) des trois items évaluant la compétence, la difficulté et l'intérêt perçu était respectivement de 0,95, 0,78 et 0,88, suggérant que les trois items de chaque composante évaluaient bien la même chose.

Les participants ont rapporté être « modérément » compétant et entre « modérément » et « très » intéressés par le jeu. Ils ont également rapporté que le jeu était de difficulté « modérée ». L'ANOVA pour mesures répétées avec les facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » a révélé des effets principaux significatifs des facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » seulement pour la compétence perçue ($p=.045$ and $p=.002$, respectivement, voir Tableau 8). Les participants AC se percevaient plus compétents que les sujets présentant une MN. Néanmoins, la compétence perçue augmentait pour tous les participants entre les Semaines 2-3 et les Semaines 4-5.

Bien que non significative, les sujets présentant une MN tendaient à avoir des plus hautes perceptions de difficulté que les participants AC ($p=.105$). L'ANOVA pour mesures répétées a révélé un effet d'interaction significatif entre les facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » pour la difficulté perçue ($p=.05$, expliqué par une augmentation de la difficulté perçue entre les Semaines 2-3 et les Semaines 4-5 seulement pour les sujets présentant une MN, $p=.03$ et par des plus hautes perceptions de difficulté aux Semaines 4-5 que celles des participants AC à cette même période, $p=.02$, voir Tableau 8).

Finalement, l'ANOVA pour mesures répétées a révélé un effet d'interaction significatif entre les facteurs « Groupes » et « Phases d'entraînement » pour l'intérêt perçu ($p=.05$). Les tests post-hoc ont révélé une augmentation de l'intérêt perçu entre les Semaines 2-3 et les Semaines 4-5 seulement pour les sujets présentant une MN ($p=.05$, voir Tableau 8).

3.3 Effets d'entraînement du Mode Scénario d'X-Torp

L'ANOVA pour mesures répétées avec les facteurs « Groupes » et « Temps » a révélé un effet principal du facteur « Groupes » pour les tests standards d'évaluation de la condition physique (SPPB, 10MeWT, TUG, 6MiWT) et pour la plupart des tests d'évaluation des fonctions cognitives (MMSE, FAB, SCB Fluency, TMT A, TMT B, DSST, DMS 48, X-Torp TMT A, X-Torp TMT B, X-Torp DSST et X-Torp DMS 48, voir Tableau 9). Les sujets présentant une MN montraient des performances plus basses que celles des participants AC.

Egalement, un effet principal du facteur « Temps » a été trouvé pour les SPPB, X-Torp TMT A, X-Torp TMT B, X-Torp DSST, X-Torp DSM48 et X-Torp CT (Temps), avec de plus grandes performances aux tests post-entraînement que celles aux tests pré-entraînement de, respectivement, 7,3 %, 13,8 %, 20,3 %, 17,1 %, 30,6 %, 6,9 % et 24,2 %.

Curieusement, et même si l'interaction n'est pas significative, l'analyse des effets simple suggère des meilleures performances au TMT A pour les participants AC ($F_{(1,6)}=40.79$, $p<.001$) et des meilleures performances seulement pour les participants AC ($F_{(1,6)}=8.3$, $p=.03$) aux tests post-entraînement que celles aux tests pré-entraînement.

L'interaction entre les facteurs « Groupes » et « Temps » était significative seulement pour le 6MiWT ($p=.04$) et le X-Torp DMS 48 ($p=.03$, voir Tableau 9). Les tests post-hoc ont révélé que cette interaction était due à un effet du facteur « Temps » seulement pour les sujets présentant une MN (les performances aux tests post-entraînement étaient 23,2 % supérieures

pour le 6MiWT, $p=.02$ et 15,3 % supérieures pour le X-Torp DMS 48, $p=.03$, que celles aux tests pré-entraînement). Néanmoins, les performances des sujets présentant une MN aux tests post-entraînement étaient toujours moins importantes que celles des participants AC (6MiWT, $p=.09$; X-Torp DMS 48, $p=.02$).

L'ANOVA pour mesures répétées n'a révélé aucun effet significatif pour les SCB Memory, X-Torp CT (score) et X-Torp GNGRTT (score et temps de réaction).

4 Discussion

Cette étude testait l'utilisabilité et les effets d'X-Torp, un SeG ciblant les fonctions cognitives et l'activité physique chez les sujets présentant une MN (MCI et MA) et chez les participants AC.

Les résultats portant sur les temps de jeu et les performances au jeu montrent que les sujets présentant une MN ont joué moins longtemps que les participants AC. Les participants AC ont respecté les exigences du programme en termes de participation aux entraînements, durées des séances et des objectifs. Un niveau d'adhésion similaire a été trouvé par Maillot et al. (2012) avec un taux de participation de 97,5 %. Les sujets présentant une MN étaient généralement fatigués après 30 à 40 minutes d'entraînement et avaient besoin d'arrêter plus tôt la séance ou de faire des pauses. De plus, 3 sujets présentant une MN ont manqué une séance d'entraînement. Ces résultats suggèrent que la durée maximale d'une séance d'entraînement sur SeG doit être plus courte chez les personnes présentant des troubles cognitifs légers à modérés. Les sujets présentant une MN ont gagné moins de points d'expérience par minute et d'argent par minute que les participants AC. En accord avec l'H1, les sujets présentant une MN ont progressé à un rythme plus lent au MS que les participants AC. Ces résultats ne sont pas surprenants mais soulèvent une question : quels facteurs cognitifs peuvent expliquer les différences de performances au jeu entre les sujets présentant

une MN et les participants AC ? X-Torp combine des dynamiques de JV d'action, de réflexion et d'exergame dans le but de stimuler plusieurs fonctions cognitives à la fois, particulièrement les fonctions exécutives, la mémoire et l'attention (Anderson-Hanley et al., 2012 ; Belchior et al., 2013 ; Colom et al., 2012 ; Dye et al., 2009a ; Dye et al., 2009b ; Green & Bavelier, 2003 ; Green & Bavelier, 2007 ; Maillot et al., 2012 ; Powers et al., 2013 ; Rosenberg et al., 2010 ; Toril et al., 2014). Il est de ce fait difficile d'explorer les relations entre les performances à X-Torp et les troubles cognitifs.

Les résultats sur le niveau d'intensité aérobie relevés montrent que les participants AC suivaient mieux les objectifs du programme d'entraînement que les sujets présentant une MN. En conséquence, les valeurs de moy%FCr^{peak} augmentaient entre les deux premières semaines et les deux dernières seulement pour les participants AC (+ 45 % de la FCr^{peak} aux Semaines 4-5). Maillot et al. (2012) ont relevé une intensité aérobie de 41,5 % de la FCr (relative aux équations d'estimation de la FC maximale) pour les exergames « Wii™ Sport » et « Mario et Sonic au jeux olympiques ». Taylor et al. (2012) ont également relevé, dans des exergames similaires, une intensité aérobie de 3 MET (Metabolic Equivalent of Task) seulement pour ceux de boxe et 1, 5 à 2,5 MET pour les autres (tennis, golf, tai chi). Dans l'étude présente, la méthode d'estimation des valeurs de moy%FCr^{peak} a été utilisée du fait du probable déclin de l'aptitude cardiorespiratoire maximale chez les sujets présentant une démence (Burns et al., 2008 ; Vidoni et al., 2012) mais elle pourrait par conséquent surestimer celle des participants AC. De ce fait, il est difficile de conclure qu'X-Torp, qui implique principalement les membres inférieurs, soit plus stimulant physiquement que les autres exergames. Les résultats montrent que les valeurs de max%FCr^{peak} augmentaient entre les deux premières et deux dernières semaines atteignant près de 60 % de la FCr^{peak} pour les participants AC. Les phases physiquement actives (navigation et combat en mer), duraient généralement entre 2 et 5 minutes et étaient alternées avec des phases physiquement inactives

(missions). Les valeurs de $\text{max}\% \text{FCr}^{\text{peak}}$ suggèrent que le mode MS d'X-Torp pourrait être plus intenses physiquement pour les participants AC si les phases physiquement actives duraient plus longtemps ou étaient permanentes. Pris ensemble, les résultats de FCr^{peak} suggèrent que l'entraînement au MS sur X-Torp semble induire une APRA d'intensité légère chez les sujets présentant une MN ($< 40\%$ de la FCr) et une APRA d'intensité modérée chez les participants AC (entre 40% et 59% de la FCr, Wilkins, 2013). La stimulation induite chez les sujets présentant une MN n'est pas suffisante pour induire une amélioration du métabolisme aérobie, de l'aptitude cardiorespiratoire maximale (VO_2max) et, par conséquent, pour favoriser des améliorations des fonctions cognitives, les processus de neuroplasticité ou pour freiner les processus neuropathologiques induits par les MN par l'activité physique (Ben-Sadoun et al., 2015). En effet, les fonctions bioénergétiques (principalement le métabolisme aérobie) et l'aptitude aérobie seraient associées au fonctionnement cognitif (Erickson et al., 2009, 2012). Elles joueraient également un rôle majeur dans le développement des neuropathologies de la MA (Ben-Sadoun et al., 2015 ; Leuner et al., 2012 ; Swerdlow et al., 2010). Chez le sujet âgé sain ou présentant un diagnostic de MCI ou une MA, l'APRA devient efficace si l'intensité d'exercice excède 50% de la FCr (Baker et al., 2010 ; Ben-Sadoun et al., 2015 ; Fabre et al., 1997 ; Palleschi et al., 1996 ; Raz et al., 2005). Dans la présente étude, la faible augmentation de stimulation aérobie chez les sujets présentant une MN entre les deux premières et les deux dernières semaines d'entraînement pourrait s'expliquer par leur incapacité à courir sur place, contrairement aux participants AC. Toutefois, aucune étude portant sur la stimulation aérobie durant la marche vs. la course sur place et sur l'apraxie posturale durant ces mouvements n'existe pour confirmer cette hypothèse. De ce fait, ces résultats suggèrent que X-Torp et les exergames utilisant ces modes de commandes ne semblent pas représenter une stratégie appropriée pour induire une APRA d'intensité modérée à intense chez les sujets présentant une MN, rejetant ainsi la seconde

hypothèse (H2). Dans le but d'induire une APRA à ces intensités, X-Torp devrait être interfacé avec un tapis de marche (comme réalisé pour le X-Torp 6MiWT) ou un vélo d'appartement. Par exemple, dans l'étude portant sur le cybercycle, les participants âgés ont pu être entraînés à 60 % de la FCr (Anderson-Hanley et al., 2012).

Tous les participants ont reporté avoir vécu des émotions positives et aucune émotion négative durant le programme d'entraînement (PANAS), similairement à une récente étude sur un SG pour les patients présentant un diagnostic de MCI ou une MA (Manera et al., 2015). Les participants AC ont reporté des émotions positives plus importantes (de « modérément » à « beaucoup ») que les sujets présentant une MN (de « un peu » à « modérément »). Ces résultats suggèrent qu'X-Torp représentait une expérience émotionnelle positive, non stressante, confirmant ainsi la troisième hypothèse (H3). L'hypothèse de l'Enrichissement Cognitif (Hertzog et al., 2008) avançait que l'expérience d'émotions positives serait un facteur protecteur des dysfonctions cérébrales. En cohérence avec cette théorie, Kühn et al. (2014) ont montré un effet maximum des JV sur la neuroplasticité chez des jeunes adultes durant le premier mois d'entraînement, quand les émotions positives (p. ex., le désir de jouer) étaient les plus importantes. Ils ont conclu que le pouvoir divertissant des JV pourrait partiellement déclencher la neuroplasticité induite par les challenges cognitifs des JV. Dans la présente étude, les compétences perçues étaient différentes entre les sujets présentant une MN et les participants AC, lesquels ont reporté respectivement être « modérément » et « très » compétents. La compétence perçue augmentait entre les deux premières et les deux dernières semaines d'entraînement au MS d'X-Torp pour les deux groupes, suggérant que les participants ont développé une expérience de jeu, confirmant la quatrième hypothèse (H4). Contre tout-attente, la difficulté perçue tendait à être supérieure chez les sujets présentant une MN comparée à celle des participants AC. Ils ont rapporté que le jeu était légèrement plus difficile durant les deux dernières semaines du programme

d'entraînement, rejetant ainsi la cinquième hypothèse (H5). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les sessions d'entraînement devenaient progressivement plus longues et de ce fait plus fatigantes. Egalement, malgré une évolution positive du sentiment de compétence, les sujets présentant une MN auraient développé une meilleure compréhension des challenges d'X-Torp et ainsi pourraient évaluer la difficulté avec plus d'objectivité. Tous les participants ont reporté un niveau d'intérêt « modéré » à « haut » pour X-Torp. L'intérêt perçu était plus faible pour les sujets présentant une MN au début du programme d'entraînement comparé à celui des participants AC, mais a augmenté à la fin du programme, ce qui confirme la sixième hypothèse (H6). Cette augmentation peut être expliquée par leur meilleure compréhension au jeu associée à l'augmentation des compétences et des difficultés perçues, faisant paraître le jeu plus motivant. De plus, beaucoup de sujets présentant une MN (et leurs accompagnants) ont exprimé le désir de continuer l'entraînement après la fin de l'étude. L'intérêt n'a pas évolué chez les participants AC, probablement dû au fait que le MS était trop court pour eux et de ce fait répétitif. Ces résultats suggèrent qu'X-Torp devrait proposer un MS plus long afin de retenir la curiosité et la motivation du joueur plus qu'un mois (ou plus que 10h) .

Finalement, une autre explication concernant les différences dans l'utilisabilité d'X-Torp entre les sujets présentant une MN et les participants AC est que les participants AC étaient plus jeunes et présentaient un plus haut niveau d'éducation. Par conséquent, ils pourraient vraisemblablement avoir plus vécu d'expériences personnelles avec les technologies informatisées que les sujets présentant une MN (p. ex., plus haut statut socioéconomique, plus jeune lors de l'avènement des JV commerciaux). Des études futures devraient tenter d'apparier les groupes sur ces deux variables.

Les résultats aux tests de pré- et post-entraînement montrent une amélioration significative au SPPB. Cette petite amélioration peut être expliquée par le fait que les modes de commandes d'X-Torp demandent aux participants de rester debout, de marcher ou courir

sur place et de faire des squats, similairement aux composantes du test. En accord avec une étude précédente (Maillot et al., 2012), cette étude montre également une amélioration au 6MiWT (+ 36.6 mètres), mais seulement pour les sujets présentant une MN. Toutefois, les performances au X-Torp 6MiWT (à E1) semblent similaires à celles de la session post-entraînement. Durant ce test, les sujets présentant une MN n'ont pas semblé avoir utilisé l'environnement virtuel pour se motiver. De ce fait, l'amélioration trouvée au 6MiWT ne peut pas refléter un effet d'entraînement. Ainsi, il est difficile de conclure que les sujets présentant une MN présentaient une amélioration de leur condition physique entre le début et la fin du programme d'entraînement sur le MS d'X-Torp, ceci expliqué par leur incapacité à réaliser une APRA d'intensité modérée à travers X-Torp, rejetant ainsi la septième hypothèse (H7). Les résultats aux tests de pré- et post-entraînement montrent des améliorations significatives aux TMT A et B seulement pour les participants AC. Chez une population similaire, Maillot et al. (2012) ont montré un effet d'entraînement sur les fonctions exécutives à travers de nombreux tests incluant les TMT et DSST. L'étude portant sur le cybercycle (Anderson-Hanley et al., 2012) a montré un effet d'entraînement sur les fonctions exécutives à travers d'autres tests. Les faibles effets d'entraînement chez les participants AC, comparés à ceux de ces études, peuvent être expliqués par la durée d'entraînement d'un mois. Toutefois, comme montré par Nouchi et al. (2012) en 4 semaines d'entraînement sur « Brain Age™ », un JV de réflexion, des améliorations des fonctions cognitives à court terme sont possibles. Les résultats montrent également de meilleures performances aux tests post-entraînement chez tous les participants aux X-Torp TMT A, X-Torp TMT B, X-Torp DSST et X-Torp CT (temps). Il semblerait que les améliorations aux tests du MT d'X-Torp n'ont pas été transférées sur leurs équivalents standards, excepté pour les TMT chez les participants AC. Pour les sujets présentant une MN, ces résultats peuvent être expliqués par leur plus grande difficulté à transférer les améliorations cognitives d'une tâche à une autre non entraînée

directement (des tests du MT aux tests standards), déjà affectée par le processus de vieillissement (Hertzog et al., 2008). Plus vraisemblablement, ces résultats suggèrent que les améliorations aux tests du MT d'X-Torp peuvent être principalement expliquées par un meilleur contrôle des modes de commandes Kinect™. Basak et al. (2008) ont observé une augmentation du volume du cervelet après un entraînement aux JV chez personnes âgées novices. Ces auteurs ont attribué ce résultat à une amélioration de la coordination visuomotrice, induite par un meilleur contrôle de la souris. Les résultats au X-Torp CT sembleraient renforcer cette hypothèse. Le fait de ne pas avoir trouvé de plus basses facultés d'attention visuelle et sélective chez les sujets présentant une MN que chez les participants AC n'était pas prévue et suggère que ce test n'est pas été bien conçu (Della Sala et al., 1992). Le CT classique demande de trouver une image cible parmi d'autres images distractrices. Les modes de commandes de la Kinect™ imposaient de positionner les symboles à une certaine distance les uns des autres pour éviter de générer des interférences dans la commande de sélection. Cette contrainte a réduit la difficulté de la tâche et par conséquent les ressources attentionnelles nécessaires. De ce fait, les améliorations au X-Torp CT seraient dues uniquement à un meilleur contrôle des modes de commandes Kinect™, confirmant que les changements dans les performances aux tests du MT d'X-Torp doivent être interprétés avec prudence. Il convient de noter que le programme d'entraînement avait pour objectif de tester l'utilisabilité et n'était pas assez long et intense pour espérer de hauts niveaux d'améliorations dans les fonctions cognitives.

Finalement, la présence du clinicien durant toute la durée du programme pourrait être un facteur important dans la détermination de l'utilisabilité, l'adhésion à l'entraînement et les effets d'entraînement, particulièrement pour les sujets présentant une MN. La présence du clinicien a enrichi l'expérience de jeu par une composante sociale, laquelle peut favoriser la neuroplasticité (Hertzog et al., 2008). Une étude de faisabilité devrait être conduite dans le

futur dans le but d'évaluer l'impact du clinicien dans l'utilisabilité des JV et des performances obtenues par les sujets âgés, de manière à évaluer objectivement le rôle joué par cette composante sociale.

En conclusion, cette étude de faisabilité indique que le SeG X-Torp représente un outil utilisable, non stressant, proposant un EE combinant activité cognitive, physique et des stimulations émotionnellement positives pour les personnes présentant des troubles cognitifs légers à modérés et chez les sujets âgés en bonne santé. Les sujets présentant une MN ont progressé à travers le MS à un rythme plus lent que les participants AC. Ils possédaient également moins de capacité d'entraînement, suggérant que le temps maximal des séances d'entraînement pour les sujets présentant une MN devrait être plus court que celui des sujets âgés en bonne santé. La difficulté du jeu semble bien calibrée en fonction de la compétence des sujets, rappelant ainsi l'importance de concevoir les SG et SeG en fonction des caractéristiques physiques ou cognitives des joueurs, comme suggéré par Bastien & Scapin (1993) à travers le critère d'ergonomie « compatibilité ». Néanmoins, les modes de commandes de la Kinect™, basés sur des mouvements stationnaires, ne semblent pas une solution adéquate pour induire une stimulation aérobie suffisante, limitant par conséquent le potentiel stimulant d'X-Torp chez les sujets présentant une démence. Les effets d'entraînement devraient être testés dans de futures études sur une plus longue période, avec un MS d'X-Torp plus long, avec plus de participants, et selon la méthode des essais contrôlés randomisés, dans le but de tester l'efficacité de ce SeG comme EE chez les populations présentant une démence.

5 Remerciements

Cette étude fait partie du projet Az@game (Alzheimer and Associated Pathologies Game for Autonomy Maintenance) et était soutenue par une subvention du ministère de

l'industrie (Investissements d'Avenir Développement de l'Economie Numérique AAP e-santé n°1: Santé et autonomie sur le lieu de vie grâce au numérique) et par l'association innovation Alzheimer. Remerciements également aux ingénieurs de Genious pour leur soutien indéfectible et à tous les participants.

Tableau 4 : Résumé des entraînements sur X-Torp. La durée d'activité physique est incluse dans la durée totale d'entraînement (p.ex. l'E2 dure 30 minutes dont 10 d'APRA d'intensité légère : 30 % de FCr^{peak}). Les Semaines 2-3 sont considérées comme période d'apprentissage et les Semaines 4-5 comme période d'optimisation.

Programme d'entraînement sur X-Torp														
Semaines	S1	S2			S3			S4			S5			
Modes de jeu	MT	MS												MT
Entraînements	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	
Durées (minutes)	80	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	60	20	40
APRA incluse au programme d'entraînement sur le MS d'X-Torp														
Durées (minutes)		10	10	10	15	15	15	20	20	20	25	25	20	
Intensités (Moy%FCr ^{peak})		30	30	30	40	40	40	50	50	50	50	50	50	

MS = Mode Scénario ; MT = Mode Thérapeute ; moy% FCr^{peak} : niveau d'intensité aérobie moyen exprimé en termes de pourcentage de la FCr relative au peak de la FC mesurée lors du 6MiWT ; S = Semaine ; E = Entraînement.

Tableau 5 : Questionnaire d'utilisabilité perçue

Facilité d'utilisation	Compétence perçue : Likert 1 « pas du tout... », 7 « très... »
	Est-ce que vous pensez être compétent à ce jeu vidéo ?
	Est-ce que vous pensez posséder des capacités à ce jeu vidéo ?
	Est-ce que vous avez le sentiment que votre niveau à ce jeu vidéo est ...
	Difficulté perçue : Likert 1 « pas du tout difficile », 7 « très difficile »
	Est-ce que vous avez le sentiment que le niveau de difficulté de ce jeu vidéo est...
	Est-ce que vous avez le sentiment que maîtriser les commandes de ce jeu est...
	Est-ce que vous avez le sentiment que gagner à ce jeu vidéo est...
Utilité	Intérêt perçu: Likert 1 « pas du tout intéressé », 7 « très intéressé »
	Est-ce que vous êtes intéressé par ce jeu vidéo ?
	Est-ce que vous êtes intéressé par le divertissement proposé par le jeu vidéo ?
	Est-ce que vous êtes intéressé par les bienfaits que peuvent apporter ce jeu vidéo à votre santé ?

Tableau 6 : ANOVAs F et p.

Participants		ANOVA effet principal (MN-AC)	ANOVA effet principal (pré-post-entraînement)	ANOVA effets d'interaction
Evaluation physique	SPPB (/12), moy (ET)	F(1, 14)=22,534, p=,00031	F(1, 14)=5,4108, p=,03554	F(1, 14)=,00643, p=,93720
	10MeWT (m), moy (ET)	F(1, 13)=14,473, p=,00219	F(1, 13)=1,6098, p=,22677	F(1, 13)=,25239, p=,62380
	TUG (s), moy (ET)	F(1, 13)=15,936, p=,00153	F(1, 13)=3,7803, p=,07382	F(1, 13)=1,8606, p=,19570
	6MiWT (m), moy (ET)	F(1, 13)=14,687, p=,00208	F(1, 13)=2,0831, p=,17260	F(1, 13)=5,5006, p=,03553
Evaluation Cognitive standard	MMSE (/30), moy (ET)	F(1, 15)=22,042, p=,00029	F(1, 15)=,29014, p=,59803	F(1, 15)=1,0810, p=,31494
	FAB (/18), moy (ET)	F(1, 15)=8,2087, p=,01180	F(1, 15)=,81114, p=,38202	F(1, 15)=3,6151, p=,07664
	SCB Fluency (items), moy (ET)	F(1, 15)=38,476, p=,00002	F(1, 15)=,08542, p=,77409	F(1, 16)=,70124, p=,41470
	SCB Memory (/10), moy (ET)	F(1, 15)=3,5476, p=,07917	F(1, 15)=2,9549, p=,10618	F(1, 15)=,08208, p=,77842
	TMT A (s), moy (ET)	F(1, 15)=13,572, p=,00221	F(1, 15)=3,9126, p=,06660	F(1, 15)=,01009, p=,92133
	TMT B (s), moy (ET)	F(1, 15)=15,468, p=,00133	F(1, 15)=6,1522, p=,02547	F(1, 15)=,30874, p=,58665
	DSST (items), moy (ET)	F(1, 15)=10,898, p=,00485	F(1, 15)=1,0071, p=,33152	F(1, 15)=1,0071, p=,33152
	DMS 48 (/48), moy (ET)	F(1, 15)=12,729, p=,00281	F(1, 15)=1,8099, p=,19850	F(1, 15)=,08181, p=,77878
Evaluation Cognitive via X-Torp	X-Torp TMT A (s), moy (ET)	F(1, 14)=7,2640, p=,01742	F(1, 14)=6,6897, p=,02154	F(1, 14)=,21664, p=,64877
	X-Torp TMT B (s), moy (ET)	F(1, 14)=18,270, p=,00077	F(1, 14)=15,004, p=,00169	F(1, 14)=1,3907, p=,25795
	X-Torp DSST (items), moy (ET)	F(1, 15)=27,588, p=,00010	F(1, 15)=29,877, p=,00007	F(1, 15)=1,2373, p=,28351
	X-Torp DMS 48 (/48), moy (ET)	F(1, 12)=15,340, p=,00205	F(1, 12)=8,2051, p=,01424	F(1, 12)=5,9282, p=,03146
	X-Torp CT (/30), moy (ET)	F(1, 13)=2,1407, p=,16719	F(1, 13)=,93301, p=,35171	F(1, 13)=,00415, p=,94964
	X-Torp CT (s), moy (ET)	F(1, 13)=4,1920, p=,06138	F(1, 13)=9,6607, p=,00831	F(1, 13)=,00008, p=,99297
	X-Torp GNGRTT (/40), moy (ET)	F(1, 10)=,00411, p=,95016	F(1, 10)=1,9329, p=,19461	F(1, 10)=,14377, p=,71249
	X-Torp GNGRTT (s), moy (ET)	F(1, 10)=1,2293, p=,29351	F(1, 10)=,42938, p=,52708	F(1, 10)=,10112, p=,75703
		ANOVA effet principal (MN-AC)	ANOVA effet principal (Semaines 2-3 vs. 4-5)	ANOVA effets d'interaction
Activité physique (/ Entraînement)	Moy%FCr (%), moy (ET)	F(1, 14)=1,2761, p=,27761	F(1, 14)=11,403, p=,00452	F(1, 14)=4,8007, p=,04586
	Max%FCr (%), moy (ET)	F(1, 14)=,87012, p=,36673	F(1, 14)=11,375, p=,00455	F(1, 14)=1,6472, p=,22018
	Temps moyen (hh:mm:ss), moy (ET)	F(1, 14)=10,583, p=,00578	F(1, 14)=40,771, p=,00002	F(1, 14)=1,0143, p=,33096
PANAS (Somme des items / 2 semaines)	Affects positifs (10-100), moy (ET)	F(1, 15)=8,9653, p=,00908	F(1, 15)=,04512, p=,83464	F(1, 15)=1,6244, p=,22186
	Affects négatifs (10-100), moy (ET)	F(1, 15)=,29144, p=,59722	F(1, 15)=3,8299, p=,06922	F(1, 15)=,00419, p=,94924
Utilisabilité (Somme des items / 2 semaines)	Compétence (6-42), moy (ET)	F(1, 14)=4,8361, p=,04518	F(1, 14)=13,708, p=,00237	F(1, 14)=1,0168, p=,33039
	Difficulté (6-42), moy (ET)	F(1, 14)=3,0017, p=,10514	F(1, 14)=,88881, p=,36179	F(1, 14)=4,7390, p=,04709
	Intérêt (6-42), moy (ET)	F(1, 14)=2,2216, p=,15827	F(1, 14)=,50020, p=,49102	F(1, 14)=4,6611, p=,04870

6MiWT = 6 Minutes Walking Test ; 10MeWT = 10 Meters Walking Test ; AC = Agé contrôle ; CT = Cancellation Test ; DMS 48 = Delayed Matching to Sample 48 explicit working memory ; DSST = Digit Symbol Substitution Test ; ET = Ecart Type ; FAB = Frontal Assessment Battery ; GNGRTT = Go-NoGo Reaction Time Test ; MMSE = Mini Mental State Examination ; MN = Maladie Neurodégénérative ; moy%FCr^{peak} et maxFCr^{peak} : niveau d'intensité aérobie moyen et maximal exprimé en termes de pourcentage de la FCr relative au peak de la FC mesurée lors du 6MiWT ; PANAS = Positive Affect Negative Affect Scale ; SCB Fluency = Short Cognitive Battery semantic verbal Fluency ; SCB memory = Short Cognitive Battery memory ; SPPB = Short Physical Performance Battery ; TMT A = Trail Making Test A ; TMT B = Trail Making Test B ; TUG = Time Up and Go.

Tableau 7 : Caractéristiques et comparaisons entre les groupe MN et AC.

Participants	MA/Mixte (n=4)	MCI (n=6)	MN (n=10)	AC (n=7)	Z-ajustés
Age (ans). moy (ET)	86 (4)	81 (5)	83 (5)	70 (10)*	2.4
Niveau d'éducation (0-4). moy (ET)	2 (0.8)	2.5 (1.5)	2.3 (1.3)	3.6 (0.5)*	-2.24
IMC. moy (ET)	28.1 (4.9)	27.7 (5)	27.8 (4.7)	25.3 (3.7)	1.47
AI (/12). moy (ET)	6 (3.9)	2.3 (3.7)	3.8 (4)	0.6 (1.5)	1.91
NPI (/60). moy (ET)	11.5 (11.7)	10.8 (13.9)	11.1 (12.4)	4.3 (7.8)	1.99
MMSE (/30). moy (ET)	20.5 (3.3)	24.7 (2.7)	23 (3.5)	28.6 (1.5)**	-3.19
CDR sum of box (/18). moy (ET)	5.5 (2.4)	1.4 (1.1)	3.1 (2.7)	0 (0)***	-3.55

Comparaisons par le U de Mann-Whitney U (* p < .05, ** p < .01, *** p < .001).

AC = Agé contrôle ; AI = Apathy Inventory CDR sum of box = Clinical Dementia Rating sum of box ; ET = Ecart Type ; IMC = Indice de Masse Corporelle ; MA/Mixtes = Maladie d'Alzheimer et/ou composante mixte ; MCI = Mild Cognitive Impairment ; MMSE = Mini Mental State Examination ; MN = Maladie Neurodégénérative ; NPI = Neuropsychiatric Inventory.

Tableau 8 : Temps et performances au MS d’X-Torp.

Participants	MN	AC	Z-ajustés
Temps de jeu total (hh:mm:ss). moy (ET)	06:59:54 (01:11:24)	08:08:06 (00:12:36)**	-2.98
Temps de jeu physiquement actif (hh:mm:ss). moy (ET)	02:59:36 (00:48:54)	04:15:11 (00:39:21)**	-2.69
Temps de jeu physiquement inactif (hh:mm:ss). moy (ET)	03:56:18 (00:37:54)	03:52:56 (00:33:49)	0.26
MS terminés (nombre de fois). moy (ET)	2.4 (0.7)	3.8 (0.5)**	-2.94
Performance-1 (points d’expérience/minute). moy (ET)	185.6 (74.4)	298 (29.9)**	-2.93
Performance-2 (\$/minute). moy (ET)	84.2 (78.3)	230.9 (44.2)**	-3.03

Comparaisons par le U de Mann–Whitney U (* p < .05, ** p < .01, *** p < .001).

AC = Agé contrôle ; ET = Ecart Type ; MN = Maladie Neurodégénérative.

Tableau 9 : Résultats des groupes MN et AC sur la stimulation aérobie, le PANAS, l'utilisabilité perçue durant la période d'apprentissage (Semaines 2-3) et la période d'optimisation (Semaines 4-5).

		ANOVA effet principal (MN-AC)		ANOVA effet principal (Semaines 2-3 vs. 4-5)		ANOVA effets d'interaction			
		MN	AC	Semaines 2-3	Semaines 4-5	MN		AC	
						Semaines 2-3	Semaines 4-5	Semaines 2-3	Semaines 4-5
Activité physique (/ Entraînement)	Moy%FCr (%), moy (ET)	32 (12)	39 (13)	32 (11)	39 (13)**	31 (11)	33 (12)	33 (9)	45 (16) μ
	Max%FCr (%), moy (ET)	50 (17)	57 (14)	49 (15)	57 (16)**	48 (17)	53 (18)	51 (12)	63 (17)
	Temps moyen (hh:mm:ss), moy (ET)	00:16:16 (00:03:49)	00:21:30 (00:03:52) ££	00:15:15 (00:03:09)	00:21:52 (00:05:41) ***	00:13:26 (00:02:56)	00:19:07 (00:04:41)	00:17:36 (00:02:43)	00:25:25 (00:05:02)
PANAS (Somme des items / 2 semaines)	Affects positifs (10-100), moy (ET)	52 (15)	74 (14)££	60 (19)	62 (18)	50 (15)	54 (17)	75 (15)	72 (16)
	Affects négatifs (10-100), moy (ET)	24 (11)	22 (3)	24 (10)	22 (8)	25 (12)	23 (11)	23 (6)	20 (1)
Utilisabilité (Somme des items / 2 semaines)	Compétence (6-42), moy (ET)	25 (9)	33 (6)£	27 (8)	31 (8)**	24 (8)	26 (10)	31 (6)	35 (5)
	Difficulté (6-42), moy (ET)	20 (6)	17 (7)	17 (7)	19 (6)	19 (7)	21 (6) α	17 (7)	16 (6)
	Intérêt (6-42), moy (ET)	30 (8)	36 (7)	32 (9)	34 (7)	29 (10)	32 (7) μ	36 (7)	35 (8)

Comparaisons par une ANOVA pour mesure répétées, avec les facteurs « Groupe » (MN vs AC) et « Phase d'entraînement » (Semaines 2-3 vs. Semaines 4-5).

£ p < .05, ££ p < .01, £££ p < .001, effet principal du groupe

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001, effet principal de la phase d'entraînement

μ p < .05, effet d'interaction

α p < .1, effets pour la difficulté perçues

AC = Agé contrôle ; ET = Ecart Type ; MN = Maladie Neurodégénérative ; moy%FCr^{peak} et maxFCr^{peak} : niveau d'intensité aérobie moyen et maximal exprimé en termes de pourcentage de la FCr relative au peak de la FC mesurée lors du 6MiWT ; PANAS = Positive Affect Negative Affect Scale.

Tableau 10 : Résultats des groupes MN et AC sur les performances physiques et cognitives avant (pré-entraînement) et après (post-entraînement) le programme d'entraînement.

		ANOVA effet principal (MN-AC)		ANOVA effet principal (Pré-post-entraînement)		ANOVA effets d'interaction			
		MN	AC	Pré-entraînement	Post-entraînement	MN		AC	
						MN	AC	MN	AC
Evaluation physique Evaluation Cognitive standard	SPPB (/12), moy (ET)	7.9 (1.7)	10.9 (0.9) £££	8.9 (2.1)	9.6 (2)*	7.6 (1.7)	8.2 (1.6)	10.6 (1)	11.3 (0.8)
	10MeWT (m), moy (ET)	9.9 (1.7)	7.1 (1.4)££	8.9 (2.4)	8.4 (1.8)	10.3 (2)	9.5 (1.3)	7.2 (1.6)	6.9 (1.3)
	TUG (s), moy (ET)	13.9 (2.8)	9 (2)££	12 (3.5)	11.2 (3.5)	14.5 (2.2)	13.2 (3.3)	9.1 (2.1)	8.9 (2.1)
	6MiWT (m), moy (ET)	178.5 (66.8)	318.7 (79.6)££	235.1 (108.3)	252.8 (96.2)	157.5 (51.2)	194.1 (76.8)µ	323.7 (84.2)	313.7 (81)
	MMSE (/30), moy (ET)	191.9 (61.1)	319.3 (68.1)	255.6 (90.7)		191.9 (61.1)		319.3 (68.1)	
Evaluation Cognitive via X-Torp	FAB (/18), moy (ET)	23.5 (3)	28.7 (1.4) £££	25.4 (4.1)	25.8 (3.2)	23 (3.5)	23.9 (2.5)	28.9 (1.5)	28.6 (1.5)
	SCB Fluency (items), moy (ET)	14.7 (2.3)	17.1 (1)£	15.4 (2.5)	15.9 (2)	14.1 (2.4)	15.3 (2.2)	17.3 (0.8)	16.9 (1.2)
	SCB Memory (/10), moy (ET)	11.6 (3)	21.3 (5.1) £££	15.6 (6.2)	15.5 (6.5)	11.2 (2.7)	11.9 (3.4)	22 (3.2)	20.6 (6.7)
	TMT A (s), moy (ET)	8.8 (1.5)	9.9 (0.5)	9.4 (1.1)	9.1 (1.4)	9 (1.3)	8.6 (1.6)	10 (0)	9.7 (0.8)
	TMT B (s), moy (ET)	64.9 (22.5)	33.4 (9.1)££	55.2 (23.3)	48.6 (24.9)	68.3 (21.2)	61.5 (24.4)	36.4 (8.3)	30.3 (9.5)
	DSST (items), moy (ET)	213.6 (83.8)	85.9 (33.1)££	172.9 (94.1)	149.1 (92.1)*	223.2 (90.3)	204 (80.4)	101 (33.3)	70.7 (27.1)
	DMS 48 (/48), moy (ET)	37.5 (17)	61.3 (10.6)££	46.2 (17.7)	48.4 (20.2)	35.6 (14.1)	39.4 (20)	61.3 (9.3)	61.3 (12.5)
	X-Torp TMT A (s), moy (ET)	38.7 (6.4)	47.4 (1.1)££	42.7 (6.9)	41.8 (6.4)	39.2 (7.1)	38.1 (6)	47.7 (0.5)	47 (1.4)
Evaluation physique	X-Torp TMT B (s), moy (ET)	76.6 (32.2)	45.9 (11.1)££	70.3 (31.4)	56 (26)*	84.8 (34.4)	68.8 (27.7)	51.6 (13)	40.1 (4.6)
	X-Torp DSST (items), moy (ET)	167.4 (62.6)	63.1 (23.4) £££	133.2 (72)	110.4 (72)**	181.8 (55.8)	153.1 (69)	70.7 (26.7)	55.4 (18.4)
	X-Torp DMS 48 (/48), moy (ET)	15.5 (8)	35.6 (9.3) £££	20.6 (12.4)	26.9 (13.4) ***	12.9 (7)	18.1 (8.4)	31.7 (9.6)	39.6 (7.8)
	X-Torp CT (/30), moy (ET)	37.4 (6.6)	46.5 (1.7)££	40.4 (7.8)	43.2 (4.9)*	34.7 (7.5)	40 (4.9)µ	46 (1.5)	46.4 (1.9)
	X-Torp CT (s), moy (ET)	29.3 (0.6)	29.9 (0.4)	29.4(0.9)	29.7 (1)	29.1 (1.1)	29.4 (1.4)	29.7 (0.5)	30 (0)
	X-Torp GNGRTT (/40), moy (ET)	117.3 (40.2)	82.1 (37)	114.8 (49.5)	87 (28.5)**	131.3 (47.2)	103.4 (28.5)	96 (48.4)	65.3 (13.5)
	X-Torp GNGRTT (s), moy (ET)	38.1 (2.4)	38 (2.6)	37.6(3)	38.5 (1.6)	37.5 (2.8)	38.7 (1.8)	37.7 (3.4)	38.3 (1.6)
	SPPB (/12), moy (ET)	759.2 (252.3)	708.7 (109.3)	745.3 (107.1)	722.6 (88.5)	765 (87.3)	753.3 (77.7)	725.5 (129)	691.8 (94.5)

Comparaisons par une ANOVA pour mesure répétées, avec les facteurs « Groupe » (MN vs AC) et « Temps » (pré-entraînement vs. post-entraînement).

£ p < .05, ££ p < .01, £££ p < .001, effet principal du groupe

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001, effet principal de la phase d'entraînement

µ p < .05, effet d'interaction

6MiWT = 6 Minutes Walking Test ; 10MeWT = 10 Meters Walking Test ; AC = Agé contrôle ; CT = Cancellation Test ; DMS 48 = Delayed Matching to Sample 48 explicit working memory ; DSST = Digit Symbol Substitution Test ; ET = Ecart Type ; FAB = Frontal Assessment Battery ; GNGRTT = Go-NoGo Reaction Time Test ; MMSE = Mini Mental State Examination ; MN = Maladie Neurodégénérative ; SCB Fluency = Short Cognitive Battery semantic verbal Fluency ; SCB memory = Short Cognitive Battery memory ; SPPB = Short Physical Performance Battery ; TMT A = Trail Making Test A ; TMT B = Trail Making Test B ; TUG = Time Up and Go.

Chapitre 6 : Gamedesign d’X-Torp Version 2

1 Méthode de conception d’X-Torp Version 2

Une fois l’utilisabilité d’X-Torp V1 rigoureusement testée, la méthode de conception d’X-Torp V2 choisie était la suivante. Dans un premier temps, les résultats de l’étude d’utilisabilité ont permis de définir des axes d’évolution du jeu. Dans un second temps, l’expérimentateur avait en charge de relever, sur le cahier d’étude, tout ce qui pouvait justifier de faire évoluer X-Torp vers une nouvelle version : (1) les bugs non remarqués préalablement ; (2) l’existence de difficultés en termes de perception visuelle non attendue pour les populations testées ; (3) l’utilité ou non des différents éléments présents sur l’interface visuelle et (4) les ressentis et souhaits récurrents de l’ensemble des populations cibles dans l’objectif de faire évoluer X-Torp. Ensuite, une liste de propositions selon un ordre de priorité a été établie par l’équipe scientifique et proposée à l’équipe de concepteur du jeu pour définir, ensemble, les axes de développement. Enfin, X-Torp V2 a été testé auprès de patients présentant une MN (sur un plus large spectre que la MA) lors de séances de stimulation par les SG prévues par le CMRR et sous l’encadrement d’un interne en médecine formé pour être l’assistance (c.-à-d. formé sur l’intérêt du jeu, son utilisation du point de vue médical, son utilisation du point de vue technologique et comment aider les joueurs à évoluer dans le jeu). Cette dernière étape a permis d’optimiser les derniers détails en termes d’ergonomie.

2 Evolution du Mode Scénario

Tous les participants ont terminé le jeu au moins une fois. Les participants AC de l’étude d’utilisabilité trouvaient le jeu trop monotone et répétitif. Chez les sujets présentant un trouble cognitif, il semblait également nécessaire de les guider même entre les missions, (manque comblé par l’assistance). De plus, d’autres retours subjectifs des participants

suggéraient que l'assistance était probablement nécessaire pour compenser le manque d'aspect motivant dans la V1. La question qui s'est posée en fin d'expérimentation était la suivante : en supposant que les joueurs maîtrisent les commandes de jeu, le scénario est-il suffisant pour induire une motivation forte pour jouer et rejouer ?

Dans la nouvelle version d'X-Torp, les aspects du gameplay relatifs au scénario ludique, pédagogique ainsi qu'à certains critères d'ergonomie ont été reconsidérés.

3 Evolution des règles

La règle principale du jeu reste inchangée puisqu'elle s'intègre dans l'approche du mode multi-joueurs : collecter les points d'expérience nécessaires à l'atteinte du grade le plus haut « amiral 5 étoiles ». Les dynamiques qu'elle implique n'ont donc pas changé (missions et affrontements). En revanche, la règle secondaire du jeu change en fonction de l'approche :

1) Règle multi-joueurs : sous forme de tournoi, le but est d'être le mieux classé en fonction du grade, du nombre de victoires et de l'argent en possession. Cette approche n'est pas que compétitive mais peut impliquer aussi la collaboration entre joueurs. Il convient de noter que cette approche n'a pas été encore testée à ce jour, la priorité étant donnée au mode solo.

2) Règle solo : spécifiquement conçu pour nos populations cibles. Le but est de suivre le scénario qui suit le déroulement d'une histoire. L'intrigue porte sur la recherche d'un ancien navire de la marine disparu sur la planète.

4 Evolution des structures temporelles, spatiales et dramatiques

Si les règles changent, les structures temporelles, spatiales et dramatiques ont été modifiées.

Le but principal est de faire jouer les participants plus longtemps (minimum 20 heures) pour influencer de manière significative la neuroplasticité. Sur la base du critère

performance-1 (nombre de points d'expérience par minutes), les sujets présentant des troubles cognitifs ont avancé presque deux fois moins vite que les participants de contrôle. Si la durée initiale du scénario était de 2 heures, une durée minimale de 10 heures pour des personnes en bonne santé a été fixée pour la V2. Pour les sujets présentant des troubles cognitifs, elle pourrait ainsi dépasser 20 heures. Dans cette approche sont exclus le mode multi-joueurs qui peut motiver le joueur à rester plus longtemps sur X-Torp et l'éventuelle envie de refaire une seconde fois le jeu.

Comment garder une motivation forte tout ce temps et en minimisant l'impact de l'assistance progressivement ? Fidèle au MMORPG, le mode solo d'X-Torp suit un scénario prédéfini et très guidé. Ainsi, la quête principale du joueur s'inspire d'une histoire vraie et consiste à retrouver un ancien navire de la marine disparu sur la planète. Le joueur se met donc à suivre une enquête pour le retrouver. Le scénario se décompose en 20 missions réparties sur trois grands actes, pour fixer au joueur des buts intermédiaires (Acte 1 : chercher des indices sur le bateau ; Acte 2 : chercher des instruments de mesures ; Acte 3 : trouver le bateau). Un carnet de bord dans le menu résume l'évolution du joueur dans son intégralité dans le scénario.

Pour limiter le risque de monotonie et favoriser l'apprentissage, dans le scénario prédéfini, le niveau de difficulté des missions est devenu progressif (p. ex., la mission 1 inclut un exercice simple relatif au CT ou au TMT A) mais garde les mécaniques renforcements positifs de l'ancienne version (c.-à-d. appréciation en fonction du niveau de réussite sans empêcher de passer à l'étape suivante). Les durées des missions sont également progressivement plus longues et de ce fait, l'acte 1 contient plus de missions que l'acte 2 et 3.

L'environnement de jeu est plus vaste (Figure 13). Les îles, au nombre de 20, gardent toutefois le même espacement que dans l'ancienne version. Une progressivité a été rajoutée sur ce point. Une mission ne se fait plus sur une seule île mais décrit un trajet autour de

3-4-5-6 îles (relatif à une progressivité dans le nombre d'étapes par mission). Ce changement permet de mieux contrôler l'alternance entre phases physiquement actives et phases physiquement inactives pour chaque mission. En effet, dans l'ancienne version, les phases physiquement actives consistaient à attaquer d'autres navires. Or, si ces navires se trouvaient près de l'île où le joueur effectuait sa mission, il n'avait qu'à tirer sans se déplacer. De plus, les joueurs ne comprenaient pas réellement ces phases dans le déroulement de la mission pour l'ancienne version.

Les trophées des missions sont collectés. Ils permettent de donner des renforcements positifs supplémentaires, s'intègrent dans l'histoire de jeu et sont accessibles par le menu.



Figure 13 : Carte et interface de X-Torp V2. (En haut), la position du sous-marin du joueur est plus indiquée avec le message « vous êtes ici ». L'île à rejoindre pour avancer dans l'histoire est indiquée par un triangle orange sur la carte. Cette destination est également affichée sur le radar et en permanence en haut de l'écran (couleur orange). (En bas), quand l'île n'est pas à portée de vue, une flèche indique la direction sur le radar. Le joueur vient de monter en grade. La commande « Avancer » est activée.

5 Evolution des critères d'ergonomie

5.1 Guidage

Les retours subjectifs sur l'utilisabilité d'X-Torp V1 chez les sujets présentant une MA montraient clairement que le guidage n'était pas assez présent, notamment entre les missions. En effet, X-Torp V1 se déroulait dans un environnement ouvert sans contraintes. Le joueur s'il le désirait pouvait aller faire la mission qu'il souhaitait sur l'île de son choix. S'il ne voulait pas, il restait en mer pour affronter d'autres navires pour collecter de l'expérience et monter en grade. Finalement, cette organisation demandait une prise d'initiative du joueur supérieure à ses capacités. Pour résoudre ce problème, il a semblé nécessaire d'opter pour un guidage omniprésent et concis. Le scénario de jeu a été prédéfini. L'histoire développée débute dès le début du jeu. Ainsi, lorsque le joueur se trouve en mer, un message est présent à l'écran avec l'endroit où se rendre pour exécuter la mission suivante du scénario (Figure 13). Ce mode de fonctionnement est très similaire au MMORPG où les quêtes (équivalent des missions), permettant d'évoluer dans le scénario principal, sont continuellement affichées à l'écran (et leur endroit matérialisé sur les cartes, Figure 13). Le joueur peut toujours aller sur n'importe quelle île, mais aucune mission ne lui sera proposée. Le guidage à travers les différentes étapes d'une mission n'a pas été modifié du fait qu'il reprenait déjà cette forme.

5.2 Signifiante des codes et dénominations

Pour compléter le point précédent, les couleurs ont été harmonisées pour le guidage. En effet, le message incitant le joueur à se rendre à la mission suivante était affiché dans une couleur spécifique (Figure 13). Cette même couleur a été utilisée pour afficher la destination sur la carte, le radar et à l'écran lorsque l'île se trouvait à portée de vue.

Le radar a été changé (Figure 13). Contrairement à l'hypothèse de départ, le côté réaliste du sonar, du fait que sa lecture ne se soit pas révélée intuitive pour les joueurs, a été

abandonnée. Son design a été conçu en fonction des visuels de l'environnement de jeu. Ainsi, le fond du radar a pris la couleur de l'eau. Une icône représentant une île remplace le triangle vers. De plus, un objet supplémentaire a été ajouté pour informer le joueur de la direction à prendre pour avancer dans le scénario (flèche de couleur spécifique, Figure 14). Si l'île cible se trouve dans la zone de détection du radar, l'objet encercle l'icône de l'île (de la même couleur, Figure 13).

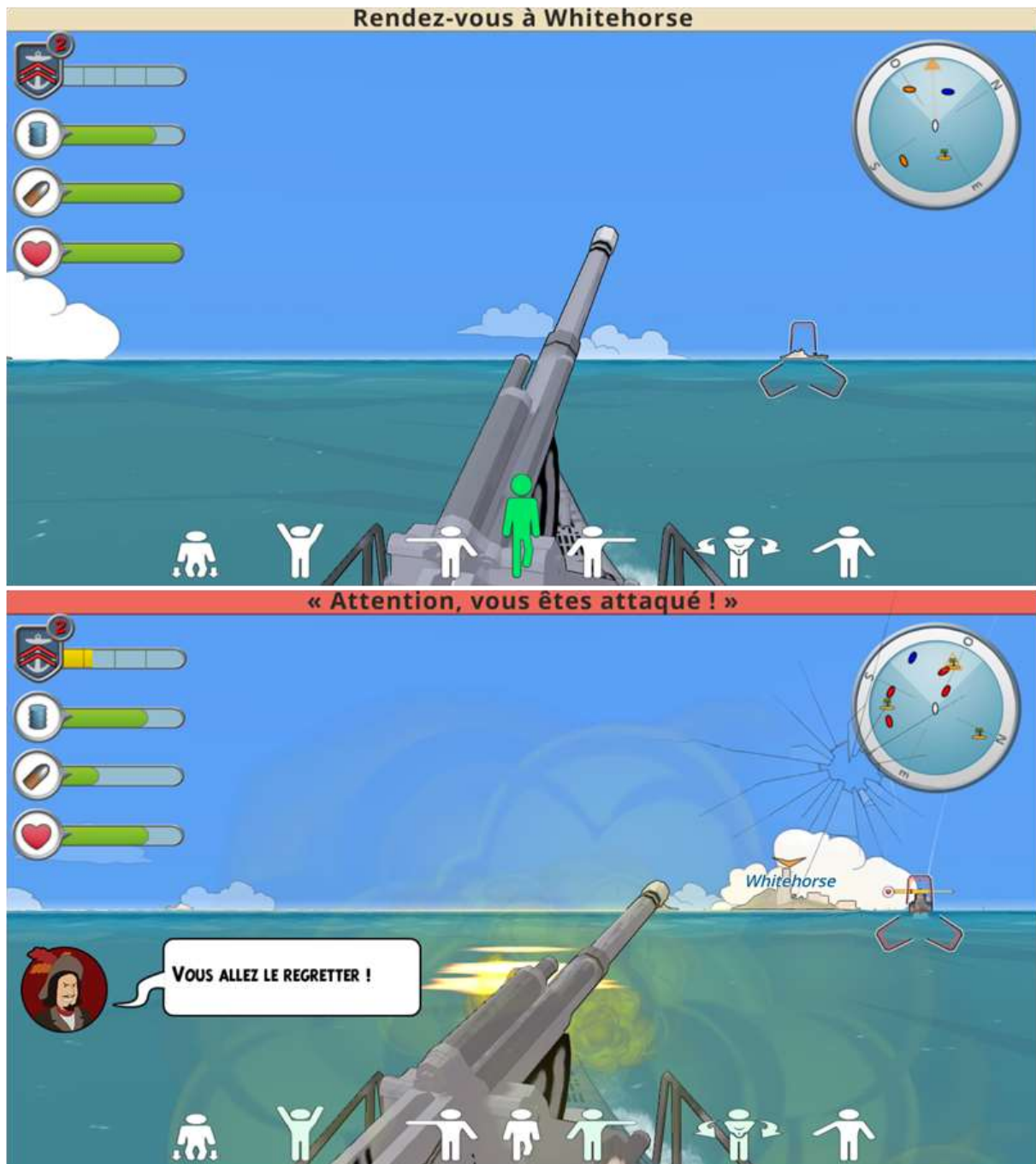
Par l'expérience de la V1, tous les éléments non utilisés par les joueurs ont été retirés de l'interface. Les jauges et leurs couleurs pour définir les barres de vie, le nombre de munitions et l'énergie n'étaient pas compris intuitivement par les joueurs dans la version précédente du fait de leurs orientations verticales. Une orientation horizontale de celles-ci avec une couleur verte pour contraster avec le bleu de la mer et du ciel a été choisie. La jauge de grade comporte une graduation et le niveau a été ajouté en plus du symbole du grade pour mieux informer le joueur de son état d'avancement.

La lisibilité des phases de navigation et de combat a été améliorée. Dans la version précédente, contre tout-attente, les sujets présentant un trouble cognitif présentaient des difficultés à voir le déplacement du navire par moment et surtout sous l'eau. Les améliorations graphiques vont dans ce sens. De plus, les frottements de la coque du bateau sur l'eau lorsqu'il avance ont été ajoutés (de couleur blanche, Figure 14). Egalement, une seule vue est disponible et représente un compromis entre la vue « canon » et la vue à la troisième personne (vue du canon avec un peu plus de recul de la caméra, Figure 14). La visibilité du canon paraît être toutefois essentielle du fait que lorsque le joueur tire, il peut constater la lancée de l'obus. Dans cette logique, lorsqu'un navire est à portée de tir, de façon automatique, les mouvements du canon le suivent. De plus, lorsque le navire adverse tire, la zone de déflagration apparaît à l'écran (Figure 14), aidant le joueur à comprendre qu'on lui tire dessus. Aussi, quand un combat commence, un message à l'écran apparaît dans un style

bande dessinée (dialogue sous forme de bulle, Figure 14). Enfin, en fonction des dégâts encaissés par le joueur, son sous-marin change d'apparence visuellement (p. ex., présence de flammes).

6 Menu et interface 2 Dimensions

Le menu a été refait entièrement. Lorsque le joueur ouvre le menu, toutes les informations nécessaires pour donner son état d'avancement dans le jeu sont marquées. Un point important concerne le placement des icônes pour passer aux étapes suivantes et nécessitant l'usage de la main virtuelle (p. ex., « Suivant » ; « Fermer » ; « Quitter le jeu »). Dans la version précédente, ces objets étaient placés en bas à droite. Or, quand le joueur réfléchissait, il ne relâchait pas totalement sa main mais la gardait devant en l'abaissant légèrement. Par conséquent, il sélectionnait souvent involontairement ces icônes alors qu'il était en train de lire les consignes d'une tâche par exemple. Tous ces objets ont été déplacés vers le haut de l'interface et de manière visible, nécessitant un effort volontaire du joueur pour les sélectionner.



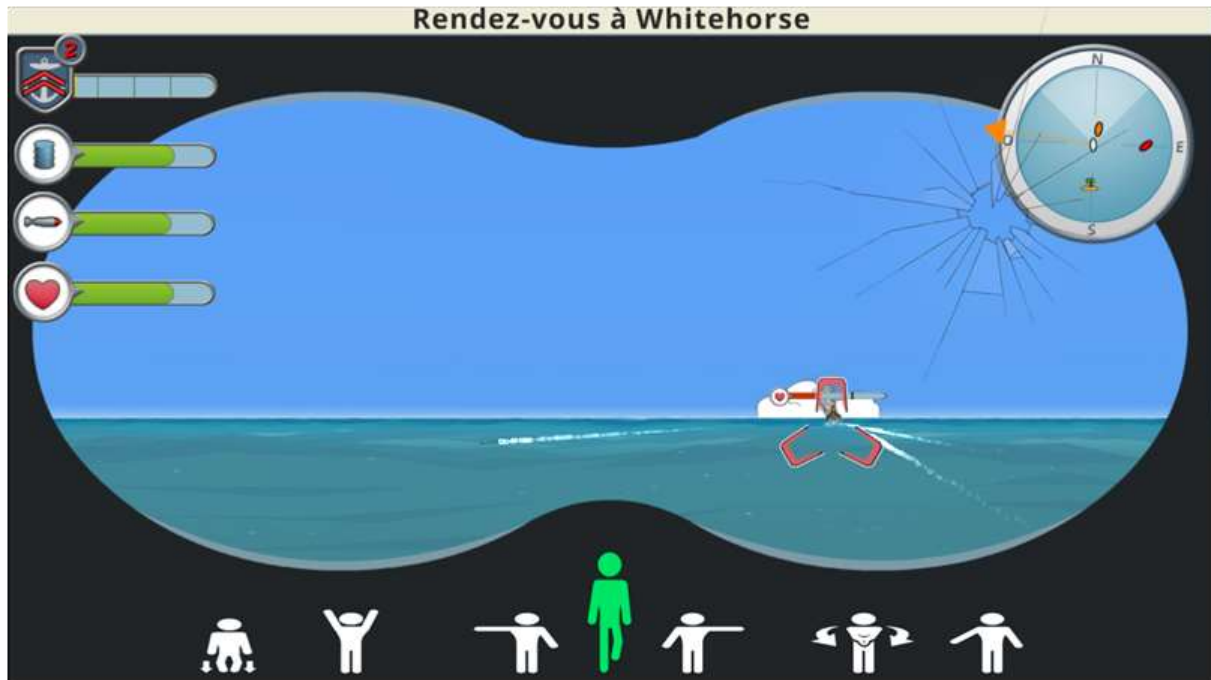


Figure 14 : Phases de combat de X-Torp V2. (En haut), la flèche orange indique la direction à prendre pour rejoindre l'île. Un adversaire est à portée de tir, le canon se déploie. (Au milieu), le sous-marin tire, les obus suivent une trajectoire en cloche et sont visibles au lancement et à la redescente sur le navire adverse. L'indicateur jaune sur l'eau devant le sous-marin indique la zone d'impact des tirs ennemis. Un message indique que l'adversaire tire. Le sous-marin a subi des dégâts, un impact et de la fumée apparaissent à l'écran. (En bas), en mode sous-marin, les missiles sont également visibles.

Partie 3 : Proposition d'alternative pour les modes de commandes avec la Kinect™

Chapitre 7 : Présentation d'une perspective d'intégration d'une activité physique de type aérobic accrue à X-Torp.

En termes d'utilisabilité, les modes de commandes choisis, aussi bien pour la navigation que pour la sélection par la main virtuelle ont été facilement intégrés sur le plan mnésique par tous les joueurs, ce qui est très encourageant. Un seul conflit a été rapporté dans certains cas et concerne l'action de courir sur place pour pénétrer dans l'eau. En effet, contrairement à la course classique, quand les participants témoins couraient sur place, ils gardaient les bras le long du corps, générant un conflit d'interprétation de la Kinect™ avec la commande pour aller sous l'eau. Ce problème est aujourd'hui résolu.

Si l'utilisation de la course sur place permet d'induire une APRA d'intensité modérée à X-Torp chez les participants de contrôle, cette technique semble hors de portée pour les sujets présentant des troubles cognitifs. Le projet Az@game projetait de réaliser un second jeu, principalement axé sur une APRA d'intensité élevée à maximale. Les travaux réalisés pour ce jeu parallèlement ont permis de mettre en évidence une alternative à la marche sur place toujours en utilisant la Kinect™. En effet, celle-ci a été interfacée avec un tapis de marche, lequel, en se référant aux données du X-Torp 6MiWT permet de réaliser un exercice aérobic proche du maximal. Dans cette idée, un outil informatique a été développé et une expérimentation a été réalisée pour tester sa précision et sa reproductibilité.

Précision et reproductibilité pour la mesure de la vitesse de marche sur tapis de marche avec une camera RGB-D.¹²

1 Introduction

Les interventions non-médicamenteuses basées sur les APRA d'intensité modérée à intense présentent un intérêt majeur concernant les sujets âgés présentant une MN (Kemoun et al., 2010 ; Palleschi et al., 1996). Il existe de plus en plus d'indices concernant les effets positifs des APRA sur la neuroplasticité, l'aptitude cardiorespiratoire et la MA, en particulier à travers l'utilisation d'exercice de locomotion comme la marche, le vélo ou le rameur (Baker et al., 2010 ; Ben-Sadoun et al., 2015 ; Yu, 2011). Néanmoins, le côté monotone qui peut s'associer à ces activités peut représenter une importante limite, suggérant de les intégrer dans des JV à activité physique (exergames) pour les rendre plus attractives (Robert et al., 2014 ; Schutzer & Graves, 2004). Les exergames les plus connus et accessibles engagent le joueur à interagir avec le jeu en utilisant des capteurs de mouvements de type RGB-D Microsoft® Kinect™.

Ces exergames ont déjà été utilisés pour stimuler, par les activités physiques, les personnes âgées (Maillot et al., 2012 ; Taylor et al., 2012). Néanmoins, des études récentes ont montré que les exergames commerciaux basés sur cette technologie ne stimulent que légèrement le système cardiorespiratoire (Taylor et al., 2012), limitant de ce fait leurs effets possibles sur l'aptitude physique et les fonctions cognitives. Cette faible stimulation serait principalement due aux limites des capteurs sur la profondeur (moins de 5 mètres pour limiter les erreurs, Khoshelham & Elberink, 2012). En fait, cette limitation implique de rester sur place, sur une aire limitée face à la caméra RGB-D et d'utiliser principalement les membres supérieurs. Par conséquent, l'utilisation d'un tapis de marche semble une bonne alternative

¹² Fosty, B., Ben-Sadoun, G., Sacco, G., König, A., Manera, V., Foulon, P., Brisswalter, J., Robert, P.H., Bremond, F. (2016). Accuracy and reliability of the RGB-D camera for measuring walking speed on a treadmill. *Gait & Posture*, 48, 113- 119.

pour réaliser des APRA d'intensité modérée à intense dans le champ de vision de la caméra RGB-D.

A propos de la Kinect™, Microsoft® met à disposition des librairies qui permettent d'identifier une représentation simplifiée du squelette du corps humain. Cette représentation a été étudiée comme outil pour évaluer la posture statique des pieds (Mentiplay et al., 2013), le contrôle postural (Clark et al., 2012), la détection des mouvements (Bonnechère et al., 2014), la marche classique (Clark, Bower, Mentiplay, Paterson, & Pua, 2013) et la marche sur tapis de marche ne présentant pas d'obstacles entre la caméra et le tapis (c.-à-d. d'armatures destinées à la sécurité de l'utilisateur, Auvinet, Multon, Aubin, Meunier, & Raison, 2015 ; Xu, McGorry, Chou, Lin, & Chang, 2015). Cependant, la mesure de la vitesse de marche sur un tapis standard à partir des librairies de Microsoft® n'a pas été étudiée jusqu'à présent car la représentation du squelette devient très mauvaise du fait de l'occlusion partielle engendrée par l'armature de sécurité du tapis. Dans ce cas, il devient impossible de mesurer une vitesse de marche.

Une partie des sujets présentant une MN souffre de troubles de la marche comme par exemple l'apraxie posturale (Della, Spinnler, & Venneri, 2004). Les paramètres de marche semblent similaires entre la marche standard et la marche sur tapis de marche (Riley, Paolini, Della Croce, Paylo, & Kerrigan, 2007). De ce fait, il serait intéressant de combiner une APRA sur tapis de marche avec l'analyse de la locomotion lors de la marche. Dans le contexte des exergames, dans le but de garder une technologie à un coût abordable (p. ex., les tapis directement ineffaçables avec un ordinateur ont un coût élevé) et sécurisante (c.-à-d. avec l'armature de sécurité), un système basé sur les nuages de points (Point Cloud Based System [PCBS]) a été développé en utilisant seulement les flots d'images (de profondeur et de couleur) par l'intermédiaire de la caméra RGB-D. Le PCBS est adaptable à tous les types de tapis de marche, et mesure la vitesse de marche d'une personne en utilisant la détection de ses

pieds. L'objectif final de ce système est de le combiner avec un exergame destiné aux sujets présentant une MN, où l'avatar avancerait dans son environnement en fonction de la vitesse à laquelle le joueur marche. De plus, ce type d'exergame pourrait combiner une APRA d'intensité modérée à intense avec l'analyse des troubles de la marche.

Un exergame est une nTIC qui permet à l'humain d'interagir avec son environnement virtuel. Ce type d'interaction peut être facilité suivant le respect de critères ergonomiques. Par exemple, les études de Bastien & Scapin (1992, 1997) ont décrit des critères ergonomiques pour faciliter les interactions entre les humains et les environnements virtuels. Certains de ces critères soulignent l'importance d'utiliser des modes de commandes cohérents et précis dans lesquels les erreurs et les ambiguïtés sont limitées (pour information, c'est le critère « contrôle explicite »). Dans ce contexte, les mesures du PCBS doivent être suffisamment précises et reproductibles pour être intégrées comme modes de commandes d'exergame.

Par conséquent, le but de cette étude était d'évaluer la précision et la reproductibilité du PCBS dans la mesure de la vitesse de marche d'une personne sur un tapis de marche motorisé.

2 Méthode

2.1 Sujets

Trente six individus en bonne santé (17 hommes, 19 femmes, âge : $32,1 \pm 7,6$ ans, taille : $171,1 \pm 9,1$ cm, poids : $67,4 \pm 13,6$ kg) ne présentant aucun trouble physique ou cognitif pouvant influencer la locomotion ont été recrutés pour participer à cette étude. Le protocole expérimental a été approuvé par un comité d'éthique local, et le protocole a été réalisé en accord avec la déclaration d'Helsinki. Après avoir formulé des explications orales et écrites sur l'étude et ses objectifs, tous les sujets ont donné leur consentement de participation par écrit.

2.2 Matériels

Durant cette expérimentation, les participants, lors de la marche, étaient enregistrés en utilisant une caméra RGB-D Asus® Xtion PRO LIVE fournissant des informations 3D de l'environnement. Cette caméra et la Kinect® utilisent le même capteur PrimeSense™ infra-red technology. Elle était placée face à la devanture du tapis de marche motorisé (Kettler® Track Motion, pallier de vitesse : $0,028 \text{ m.s}^{-1}$, surface de marche: $48 \times 132 \text{ cm}$), à une distance de 2 mètres. Toutes les procédures et enregistrements ont été faits sous Fedora 19, processor Intel Xeon 2.4 GHz, 16 GB de mémoire.

2.3 Procédure

Les participants portaient des vêtements confortables pour marcher sur le tapis de marche (chaussures plates de sport ou de ville, shorts, pantalons ou jeans). Chaque participant devait réaliser 3 exercices de marche durant, pour chacun, 10 minutes. Entre chaque exercice, 5 minutes de pause étaient proposées au participant pour lui permettre, si besoin, de se reposer pour ne pas influencer les répétitions d'exercice. Chaque exercice de 10 minutes se décomposait en 5 sous exercices de 2 minutes à 5 différentes vitesses selon un ordre croissant et couvrant le spectre complet de la marche : $0,42$, $0,69$, $0,97$, $1,25$ and $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ (soit $1,5$, $2,5$, $3,5$, $4,5$ and $5,5 \text{ km.h}^{-1}$). En effet, la course est généralement privilégiée au delà de $1,53 \text{ m.s}^{-1}$ (Geyer, Seyfarth, & Blickhan, 2006). Le participant avait pour consigne de suivre la vitesse imposée par le tapis. Chaque essai (exercice de 10 minutes) commençait quand l'expérimentateur activait la caméra RGB-D et ouvrait l'application pour capturer la scène sans le sujet (cf. section Ground detection). Ensuite, le participant entrait dans la scène et montait sur le tapis de marche motorisé. Puis, il/elle démarrait le tapis et fixait la vitesse à $0,42 \text{ m.s}^{-1}$. Toutes les deux minutes, le participant augmentait lui-même la vitesse de

0,28 m.s⁻¹ jusqu'à 1,53 m.s⁻¹. A la fin de chaque essai, le participant stoppait le tapis et sortait de la scène. L'expérimentateur fermait l'application et coupait la caméra RGB-D.

2.4 System étalon basé sur une marque (Marker Based Control System (MBCS))

Le MBCS consistait à détecter une marque blanche faite sur la surface de tapis de couleur noire en utilisant les intensités lumineuses de l'image, ce qui permettait de contrôler la vitesse réelle de rotation du tapis (Figure 15).

2.5 Point Cloud Based System (PCBS)

Le calcul de la vitesse de marche d'une personne peut être estimé par le déplacement de son centre de gravité. Ici, l'utilisation du tapis de marche force à développer une méthode différente pour mesurer la vitesse. Le système proposé est présenté en 4 sous-sections. Les trois premières présentent la façon dont les pieds d'une personne sont détectés à partir du nuage de points de la personne, de la détection du sol, et la façon dont le bruit de cette détection est filtré. Le calcul de la vitesse basé sur les positions successives des pieds est décrit dans la dernière sous-section. Pour plus d'information sur l'architecture du système, voir Figure 15.

2.5.1 Détection et suivi d'une personne

La première étape est de détecter et suivre les déplacements d'une personne dans la scène. La détection de personne se fait à chaque image en utilisant un algorithme de soustraction de l'arrière plan proposé par Nghiem, Bremond, & Thonnat (2009). Un algorithme multifonctions, tel que celui proposé par Chau, Bremond, & Thonnat (2011) sur les dimensions en 2D, les déplacements en 3D, l'histogramme de couleur et les couleurs dominantes, est alors utilisé pour le suivi de la personne dans la scène.

2.5.2 Détection du sol

Dans des cas particuliers (p. ex., quand les informations sur les profondeurs sont manquantes), un certain nombre de points appartenant au sol peut être par erreur inclus dans le nuage de points de la personne. Dans ce cas, la surface du sol doit être estimée pour corriger la classification des points. Basé sur la plus basse partie de la scène, (dans l'hypothèse que les pixels du sol couvrent au moins 10 % de l'image), l'équation du plan est calculée comme un plan qui minimise sa distance aux points du sol. Une fois que cette équation du plan a été estimée, le nuage de points de la personne est filtré et les points appartenant au sol sont supprimés (Figure 16).

2.5.3 Détection des pieds

Après ce filtre, seulement la partie basse du corps de la personne est gardée (les points sur 25 % de la partie basse du corps). Chaque point restant est ensuite classé comme appartenant à la jambe gauche ou droite, dépendant de sa distance respective avec les extrêmes des nuages de points de la partie droite et gauche (Figure 16). Chaque jambe a été ensuite divisée de moitié selon un axe vertical passant par le centre de gravité de chaque partie représentant ainsi le squelette de chaque jambe (Figure 16). Pour finir, les pieds correspondaient à la projection du point le plus bas de ces lignes droites (Figure 16).

2.5.4 Calcul de la vitesse

Durant la marche, les paramètres de locomotion sont faciles à analyser du fait que la fin de chaque pas est déterminée par le moment où chaque pied se trouve au sol avec une distance maximale l'un de l'autre (Srinivasan & Ruina, 2006). Après une rapide observation des positions successives des pieds sur les images, et plus particulièrement de la distance entre

les pieds, les différentes phases de la marche apparaissent et peuvent être extraites depuis cette position maximale (Figure 17). Par exemple, les minimums correspondent au temps où le pied arrière passe de celui de l'arrière à celui de devant, exactement quand il passe près de l'autre pied (c.-à-d. moment du cycle de marche où la distance entre les pieds est minimale, Figure 17). Dans le cas contraire, les maximums correspondent au temps exact où la distance entre les pieds est maximale (c.-à-d. quand le pied arrière est passé à l'avant et se pose, Figure 17). La vitesse instantanée de la personne est ensuite mesurée à partir de la distance à ce moment précis et le lapse de temps le séparant avec le maximum précédent. Des méthodes basiques de filtrage et de lissage sont également utilisées pour établir une vitesse moyenne sur les 5 pas précédents en supprimant les « pas » inférieur à 12 cm.

2.6 Analyse statistique des données

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec StatSoft Statistica 7.0 et Microsoft Office Excel pour Windows.

La précision a été évaluée à travers la comparaison des vitesses mesurées entre les PCBS et MBCS. Les données ont été analysées en utilisant une ANOVA à deux facteurs pour mesures répétées : « Systèmes » (PCBS vs. MBCS) et « Vitesses » (0,42 vs. 0,69 vs. 0,97 vs. 1,25 vs. 1,53 m.s⁻¹). Quand un effet significatif était trouvé, des tests post-hoc ont été réalisés en utilisant le Newman-Keuls. Les différences étaient significatives pour $p < .05$.

La reproductibilité des vitesses mesurées relatives au PCBS et MBCS (3 essais pour chaque vitesse de chaque système) a été évaluée en utilisant le coefficient de corrélation Intra-Classe (ICC 2, 1, Shrout & Fleiss, 1979 ; Weir, 2005). Les directives générales de Munro ont été utilisées : 0-0,25 petite corrélation, 0,26-0,49 basse, 0,5-0,69 modérée, 0,7-0,89 forte, 0,9-1 très forte (Munro, 2005). La reproductibilité absolue des vitesses mesurées pour chaque système a été évaluée en utilisant l'erreur standard de mesure (Standard Error of

Measurement [SEM], ou nommé aussi l'erreur type). Le SEM était exprimé comme coefficient de variation et était déterminé selon les recommandations de Hopkins and Weir (Hopkins, 2000 ; Weir, 2005). Les plus petites valeurs du SEM reflétaient des mesures plus reproductibles. Le SEM était exprimé en pourcentage relatif à la moyenne ($SEM\% = SEM / \text{mean} \times 100$). Cette forme d'erreur type permet une comparaison de la reproductibilité absolue entre les mesures et les groupes. Le SEM était également utilisé pour déterminer la différence minimale pour être considérée comme « réelle » (Minimum Difference [MD]), calculée comme suggéré par Bédard, Martin, Krueger, & Brazil (2000) : $MD = SEM \times 1,96 \times \sqrt{2}$. Les ICC, SEM et MD étaient utilisés pour leur plus forte robustesse comparée au R de Pearson, au Coefficient de Variation (CV) et à la Limite d'agrément (LOA ou diagramme de Bland-Altman) pour l'analyse de reproductibilité (Shrout & Fleiss, 1979 ; Weir, 2005).

3 Résultats

3.1 Précision

Tous les sujets ont complété le protocole. L'ANOVA a révélé un effet principal des « Vitesses » ($F_{(4,140)} = 63007, p < .05$) et un effet principal des « Systèmes » ($F_{(1, 35)} = 5,0420, p < .05$). Toutes les valeurs mesurées par un système aux vitesses 0,42, 0,69, 0,97, 1,25 et 1,53 m.s⁻¹ étaient statistiquement différentes de celles de l'autre système. Par ailleurs, les vitesses mesurées avec le PCBS étaient plus grande que celles du MBCS (différence moyenne ou biais : $0,013 \pm 0,015 \text{ m.s}^{-1}$). De plus, un effet d'interaction significatif a été observé. L'analyse post-hoc a révélé que les vitesses mesurées avec le PCBS étaient significativement plus grandes comparées à celles du MBCS aux vitesses les plus basses (0,42, 0,69 et 0,97 m.s⁻¹) mais significativement plus basses à 1,53 m.s⁻¹ (Tableau 11).

3.2 Reproductibilité

Les mesures de reproductibilité inter-essais pour chaque système sont présentées dans le Tableau 12. Pour les vitesses mesurées par le PCBS, des hautes reproductibilités relatives ont été trouvées (ICC allant de 0,63 à 0,91). Pour les vitesses mesurées par le MBCS, des reproductibilités relatives entre basse et haute ont été trouvées (ICC allant de 0,15 à 0,91). Globalement, les valeurs d'ICC étaient plus grandes pour le PCBS que celles du MBCS. Par ailleurs, les deux systèmes ont montré une faible variabilité, légèrement plus large pour le PCBS que pour le MBCS (SEM allant respectivement de 1 % à 5 % et de 0 % à 0,2 % ; et MD allant respectivement de 2,7 % à 14 % et de 0,1 % à 0,9 %).

4 Discussion

4.1 Précision

Dans cette étude, une différence statistique significative a été observée entre les deux systèmes avec un biais enregistré de $0,013 \pm 0,015 \text{ m.s}^{-1}$ (Tableau 11) et un effet d'interaction entre la vitesse de marche et le système de mesure. Plus précisément, plus la vitesse de marche est importante, moins l'écart entre les deux systèmes est important. A notre connaissance, aucune étude ne semble comparer la précision de la vitesse de marche sur un tapis standard entre une caméra RGB-D et un système de contrôle. Dans la présente étude, la différence entre les PCBS et MBCS était similaire à celle observée entre la console du tapis et le MBCS (biais entre PCBS et MBCS : $0,013 \pm 0,015 \text{ m.s}^{-1}$; biais entre la console du tapis et MBCS : $0,012 \pm 0,013$, Tableau 11), suggérant un bon niveau de précision. Le biais entre la console du tapis et la MBCS peut s'expliquer par l'attaque du talon sur le tapis (générant des chocs répétés) qui pourrait ralentir la vitesse de rotation du tapis.

Les inexactitudes observées dans l'enregistrement des vitesses pourraient principalement s'expliquer par le niveau de qualité de détection de la position des pieds sur la

profondeur, qui devra être comparé dans des études futures à un système d'analyse du mouvement reconnu tel que la Vicon. Les résultats sont en accord avec les autres études portant sur la posture statique (Mentiplay et al., 2013) et le contrôle postural (Clark et al., 2012). Clark et al. (2013) ont montré une différence moyenne similaire pour les vitesses mesurées durant la marche sur le sol avec le Vicon (Biais : $0,01 \text{ m.s}^{-1}$). Dans des conditions similaires, Xu et al. (2015) ont montré un très haut niveau de précision dans l'enregistrement des temps des différentes phases de la marche sur un tapis sans armatures en comparant les librairies de la Kinect™ avec un optotrack. Dans le contexte des exergames, ce niveau de précision semble être suffisant pour utiliser le PCBS comme un mode de commande. Dans ce domaine relatif aux interactions entre l'humain et les environnements virtuels, le critère d'ergonomie « contrôle explicite », décrit par Bastien et Scapin (Bastien & Scapin, 1992 ; Scapin & Bastien, 1997), représente un élément clef. Il met en évidence le fait que l'utilisateur doit toujours avoir le contrôle sur le système. Les erreurs et les ambiguïtés de la machine doivent être limitées face aux actions des utilisateurs. La précision du PCBS semble être suffisante pour détecter les conditions d'absence de marche et différents niveaux de vitesse de marche. Combiné à un exergame, le PCBS peut permettre à l'utilisateur de contrôler la vitesse de déplacement ou l'immobilité de son avatar dans le jeu (p. ex., avec un avatar qui changerait sa vitesse de déplacement par palier de $0,28 \text{ m.s}^{-1}$). Dans ce cas, le risque de générer des ambiguïtés est minimal.

4.2 Reproductibilité

Les ICC des deux systèmes étaient entre des niveaux modérés et hauts. Pour le PCBS, la valeur moyenne tourne autour de 0,8 alors que pour le MBCS, elle est de 0,6. De plus, les mesures montraient un faible niveau de variabilité (Tableau 12). Ces résultats sont en accord avec les autres études utilisant une caméra RGB-D et montrant des ICC de niveaux modérés à

hauts pour l'évaluation de la posture statique (Mentiplay et al., 2013), du contrôle postural (Clark et al., 2012) et de la détection des mouvements du corps (Bonnechère et al., 2014). Néanmoins, les études sur la marche au sol (Clark et al., 2013) et la marche sur tapis (Auvinet et al., 2015; Xu et al., 2015) n'ont pas testé la reproductibilité de la caméra RGB-D. Dans la présente étude, les plus petits ICC du MBCS pourraient s'expliquer par l'attaque du talon sur le tapis, qui pourrait modifier les mesures des vitesses de rotation du tapis d'un essai à l'autre. Par ailleurs, la plus large variabilité du PCBS pourrait être principalement due aux variations de détection du signal. En fait, le MBCS est facile et plus robuste pour calculer la vitesse de marche du fait qu'il capture un objet uniforme sur le tapis à intervalles de temps réguliers. Pour le PCBS, le calcul dépend des paramètres propres à l'individu et variant d'une personne à l'autre (p. ex., morphologie, vêtements, démarche), ce qui pourrait influencer par conséquent les vitesses mesurées. Par exemple, les pré-tests effectués sur ce système montraient que si une personne portait une jupe longue ou un pantalon large, les résultats étaient négativement influencés. Dans cette expérimentation, nous avons choisi de ne pas standardiser les vêtements et la morphologie des participants pour vérifier si notre système est utilisable dans des conditions plus écologiques. Dans le contexte des exergames, ce niveau de reproductibilité semble être suffisant pour utiliser le PCBS comme un mode de commande.

5 Conclusion

Cette étude testait la précision et la reproductibilité du PCBS. Les résultats ont montré que la vitesse mesurée par le PCBS est assez précise et reproductible pour la marche sur tapis à vitesse constante. Ainsi, dans le contexte de développement d'exergames et en accord avec le critère d'ergonomie « contrôle explicite » décrit par Bastien et Scapin (Bastien & Scapin, 1992 ; Scapin & Bastien, 1997), le PCBS peut être utilisé comme un mode de commande d'un jeu. Le joueur sera en mesure de contrôler la vitesse de déplacement de son avatar avec un

risque minimum que le système ne génère des erreurs et des ambiguïtés, favorisant ainsi son adhésion au jeu et garantissant sa sécurité. Un autre bénéfice du PCBS est son adaptabilité et faible coût matériel. De plus, alors que l'utilisation d'autres systèmes comme les tapis de marche qui peuvent être directement interfacés avec le jeu ne se limitent qu'aux informations sur la marche (p. ex., vitesse, distance), la caméra RGB-D donne également des informations sur la scène. Le PCBS peut par conséquent être étendue à une plus profonde analyse de la marche (p. ex., symétrie, longueur de pas, cadence de pas). Il pourrait aussi détecter les membres supérieurs. Ces paramètres sont importants dans le contexte des MN associées à de l'apraxie posturale (Della et al., 2004). De ce fait, le PCBS pourrait combiner une APRA d'intensité modérée à intense, l'analyse de la locomotion et la rééducation. Des études sur la précision du PCBS à vitesse non constante et sur l'évaluation de l'apraxie posturale seraient nécessaires pour confirmer le potentiel du PCBS pour son utilisabilité opérationnelle.

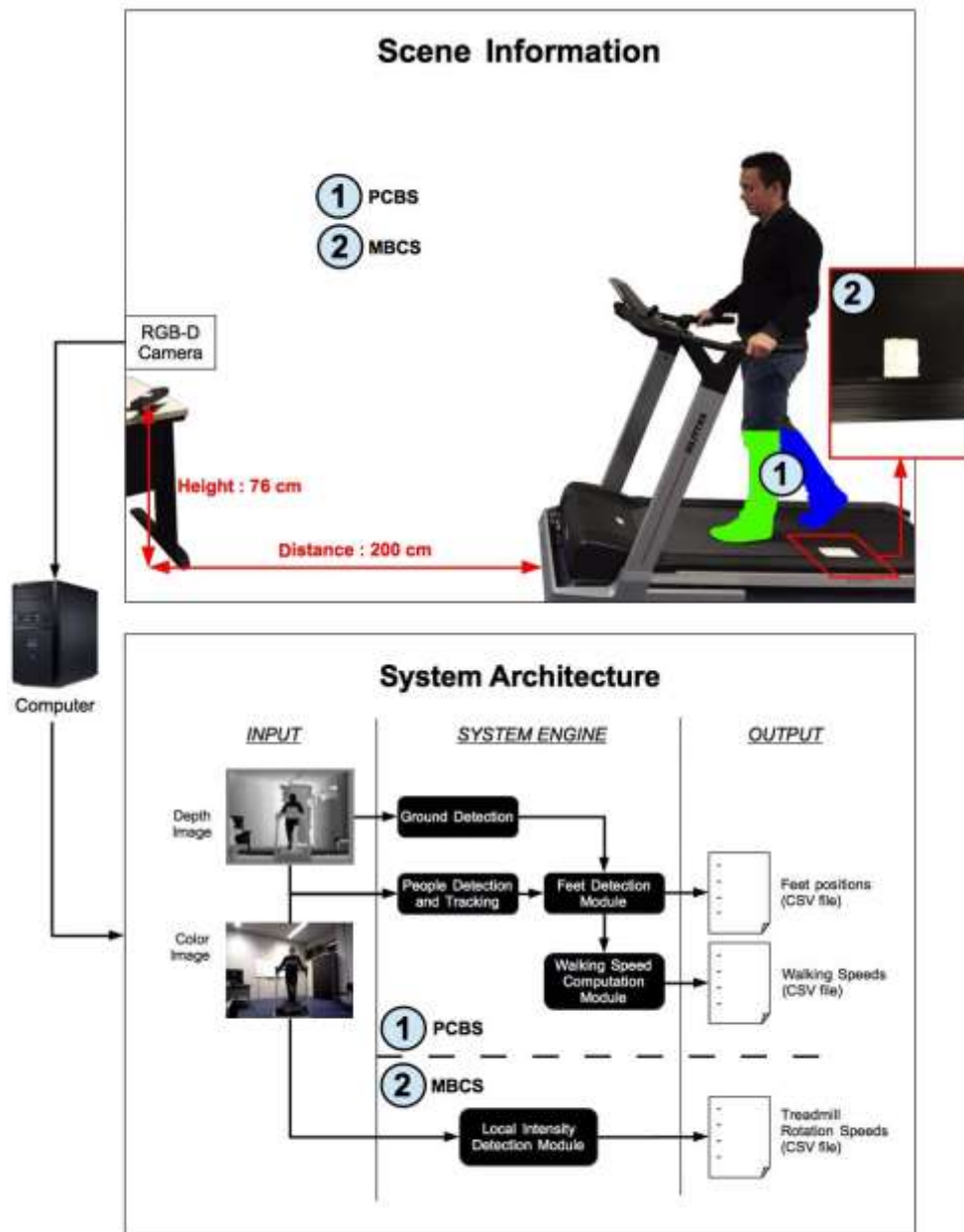


Figure 15 : Architecture des PCBS et MBCS. MBCS : ce système enregistre la vitesse de rotation du tapis de marche et de ce fait la vitesse de marche de la personne. Basé sur l'intensité lumineuse d'une zone manuellement sélectionnée (sur le tapis, sur le chemin de la marque blanche), ce système détecte chaque tour du tapis. En connaissant la longueur du tapis, la vitesse est enregistrée grâce au temps séparant deux tours.

RGB-D = Red Green Blue + Depth

PCBS = Point Cloud Based System

MBCS = Marker Based Control System

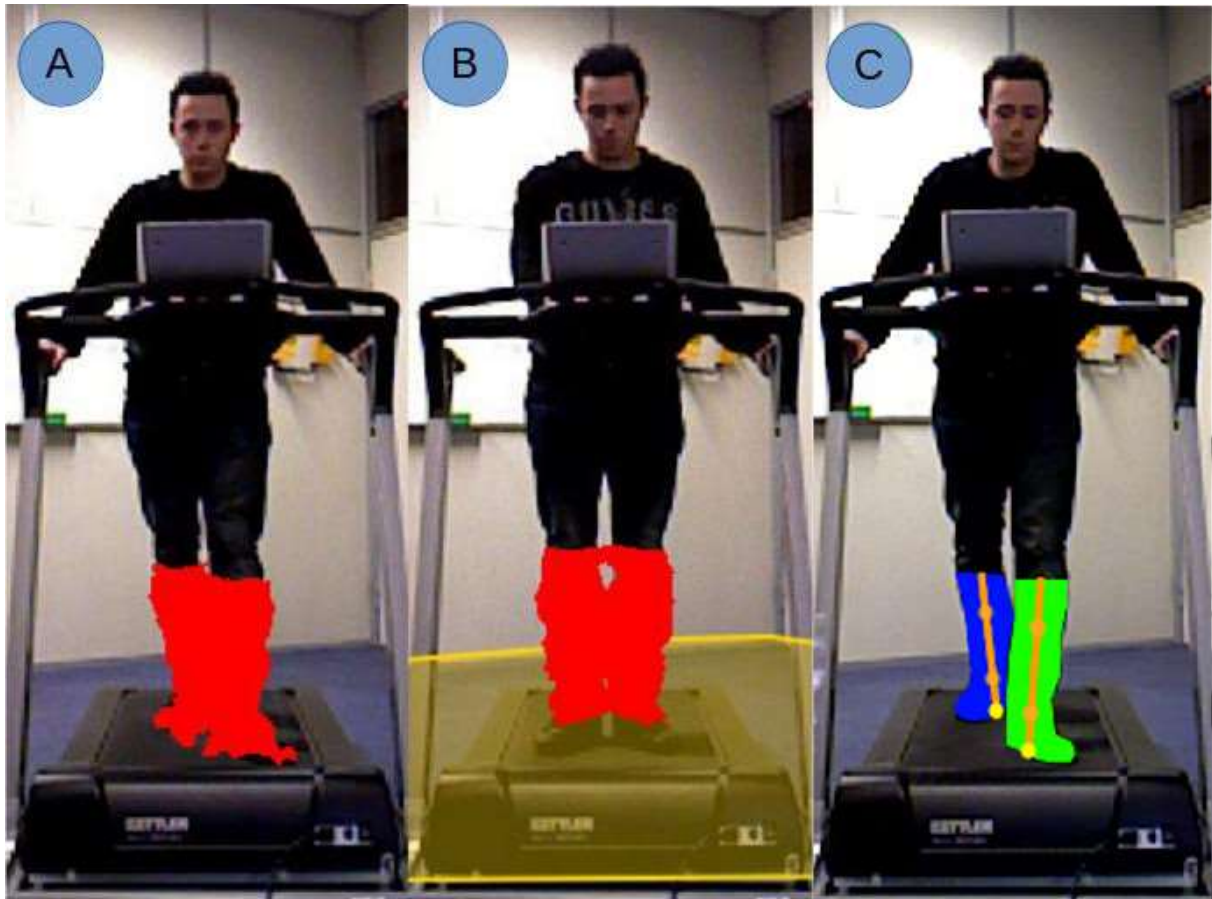


Figure 16 : Filtre du nuage de points du PCBS. (A) Sans filtre, quelque points du sol sont inclus dans le nuage de points. (B) un filtre est appliqué en fonction de la distance entre les points de la personne et le plan du tapis de marche. (C) Classement des points (gauche et droit, respectivement en bleu et vert) et traçage d'une ligne passant par le centre de gravité des points de chaque jambe (lignes et points orange) et la détection des pieds (points jaunes).

PCBS = Point Cloud Based System

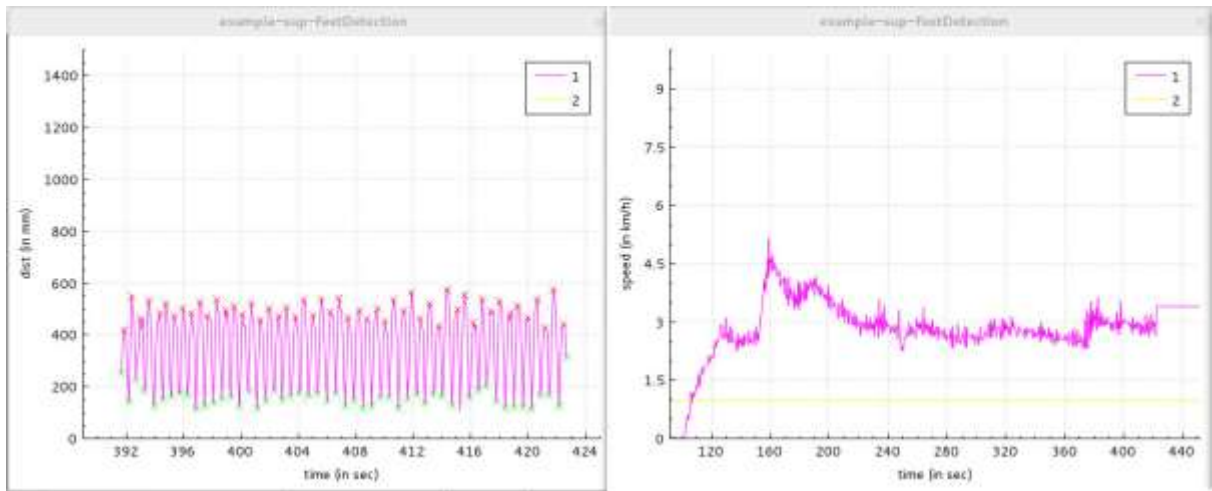


Figure 17 : Représentation graphique de la marche en fonction du temps. (A gauche), graphique représentant la distance entre les pieds en fonction du temps (les croix rouges et vertes représentent respectivement les maximums et les minimums). (A droite), graphique représentant la vitesse en fonction du temps.

Tableau 11. Précision des vitesses mesurées avec les PCBS et MBCS.

Vitesses (m.s ⁻¹)		PCBS		MBCS		Biais (m.s ⁻¹)
		Moy (ET)		Moy (ET)		
		Chaque essai	Moyenne des 3 essais	Chaque essai	Moyenne des 3 essais	
0,42 m.s ⁻¹	Essai 1	0.43 (0.03)	0.44 (0.04)	0.42 (0.00)	0.42 (0.00)	0.02
	Essai 2	0.44 (0.04)		0.42 (0.00)		
	Essai 3	0.45 (0.04)		0.42 (0.00)		
0,69 m.s ⁻¹	Essai 1	0.71 (0.04)	0.71 (0.04)	0.69 (0.00)	0.69 (0.00)	0.02
	Essai 2	0.71 (0.04)		0.69 (0.00)		
	Essai 3	0.71 (0.04)		0.69 (0.00)		
0,97 m.s ⁻¹	Essai 1	0.98 (0.04)	0.98 (0.04)	0.96 (0.00)	0.96 (0.00)	0.02
	Essai 2	0.98 (0.04)		0.96 (0.00)		
	Essai 3	0.98 (0.04)		0.96 (0.00)		
1,25 m.s ⁻¹	Essai 1	1.24 (0.05)	1.24 (0.04)	1.23 (0.00)	1.23 (0.00)	0.01
	Essai 2	1.24 (0.04)		1.23 (0.00)		
	Essai 3	1.24 (0.04)		1.23 (0.00)		
1,53 m.s ⁻¹	Essai 1	1.49 (0.05)	1.49 (0.05)	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	-0.01
	Essai 2	1.49 (0.05)		1.50 (0.00)		
	Essai 3	1.49 (0.05)		1.50 (0.00)		

0,42 m.s^{-1} = 1,5 km.h^{-1} ; 0,69 m.s^{-1} = 2,5 km.h^{-1} ; 0,97 m.s^{-1} = 3,5 km.h^{-1} ; 1,25 m.s^{-1} = 4,5 km.h^{-1} and 1,53 m.s^{-1} = 5,5 km.h^{-1} .

Biais = différence entre les moyennes ; ET = Ecart Type ; MBCS = Marker Based Control System ; PCBS = Point Cloud Based System

Tableau 12 : Reproductibilité des vitesses mesurées avec les PCBS et MBCS.

Vitesses (m.s ⁻¹)		PCBS				MBCS			
		Essais 1-2		Essais 2-3		Essais 1-2		Essais 2-3	
0,42 m.s ⁻¹	Moyenne	0.44		0.45		0.42		0.42	
	ICC	0.63		0.84		0.91		0.29	
	SEM (%)	0.022	(5.0)	0.015	(3.4)	0.000	(0.1)	0.001	(0.3)
	MD (%)	0.061	(14.0)	0.042	(9.4)	0.001	(0.2)	0.004	(0.9)
0,69 m.s ⁻¹	Moyenne	0.71		0.71		0.69		0.69	
	ICC	0.80		0.88		0.74		0.63	
	SEM (%)	0.018	(2.5)	0.014	(2.0)	0.000	(0.1)	0.000	(0.1)
	MD (%)	0.049	(6.9)	0.039	(5.5)	0.001	(0.2)	0.001	(0.2)
0,97 m.s ⁻¹	Moyenne	0.98		0.98		0.96		0.96	
	ICC	0.74		0.90		0.62		0.76	
	SEM (%)	0.021	(2.2)	0.013	(1.3)	0.001	(0.1)	0.000	(0.0)
	MD (%)	0.059	(6.0)	0.036	(3.6)	0.001	(0.2)	0.001	(0.1)
1,25 m.s ⁻¹	Moyenne	1.24		1.24		1.23		1.23	
	ICC	0.81		0.88		0.65		0.71	
	SEM (%)	0.020	(1.6)	0.015	(1.2)	0.001	(0.0)	0.001	(0.0)
	MD (%)	0.055	(4.4)	0.042	(3.4)	0.002	(0.1)	0.001	(0.1)
1,53 m.s ⁻¹	Moyenne	1.49		1.49		1.5		1.5	
	ICC	0.82		0.91		0.13		0.66	
	SEM (%)	0.021	(1.4)	0.015	(1.0)	0.003	(0.2)	0.001	(0.1)
	MD (%)	0.057	(3.8)	0.041	(2.7)	0.009	(0.6)	0.002	(0.2)

0,42 m.s⁻¹ = 1,5 km.h⁻¹; 0,69 m.s⁻¹ = 2,5 km.h⁻¹; 0,97 m.s⁻¹ = 3,5 km.h⁻¹; 1,25 m.s⁻¹ = 4,5 km.h⁻¹ and 1,53 m.s⁻¹ = 5,5 km.h⁻¹.

Biais = différence entre les moyennes ; ICC = Intraclass Correlation Coefficient ; MBCS = Marker Based Control System ; MD = Minimum Difference to be considered "real" ; PCBS = Point Cloud Based System ; SEM = Standard Error of Measurement

6 Données non publiées concernant ces systèmes

Cet article met évidence un moyen de modifier les modes de commandes d’X-Torp toujours en utilisant la Kinect™. Comme évoqué, le but n’est pas de faire seulement un SeG qui fonctionne, mais aussi de vérifier son coût de production pour le rendre accessible financièrement. Pour donner un indice de comparaison, l’« Espresso® HD bike » utilisé pour l’étude Anderson-Hanley et al. (2012) coûte près de 10 000 \$. Sans tenir compte du coût humain de la conception des logiciels (pour X-Torp et l’algorithme de détection), le coût de la Kinect™, de l’ordinateur, de l’écran et du tapis de marche reviendrait à minima 5 fois moins cher. Toutefois, tout ce matériel nécessite d’utiliser une pièce assez grande et dégagée pour jouer.

Le PCBS, mais aussi le MBCS, peuvent être utilisés comme modes de commandes. Le MBCS, plus simple, présente une limite lorsque le sujet arrête de marcher. Le système n’a plus de référence pour comprendre que l’individu ne marche plus. A ce moment, un temps limite dans l’absence de détection de la marque blanche sur un tapis doit être mis en place pour que le système considère qu’il n’y a plus de mouvement. Néanmoins, cela générerait un délai entre l’action du joueur et la réponse du jeu. Pour l’initiation de marche, un problème similaire se poserait. Chez les sujets présentant une MN, l’analyse des 6MiWT et X-Torp 6MiWT met en évidence qu’il fallait parfois plus de 2 secondes pour que le tapis fasse une rotation complète. De ce fait, un délai à l’initiation de la marche sera constatable sur l’environnement virtuel, ce qui pourrait remettre en question l’immersion dans l’environnement virtuel du point de vue de la perception visuelle. Le PCBS ne présente pas cette limite. En revanche, les quatre étapes de traitement (de la détection au calcul de la vitesse de marche), quand elles se font en temps réel, monopolisent beaucoup de ressources de la caméra RGB-D limitant ainsi le nombre d’images par seconde capturées. De ce fait, ce système est opérationnel si personne d’autre ne se trouve dans la scène. En effet, les

mouvements d'une personne supplémentaire génèreraient plus de calculs pour que le système ne confonde pas les deux personnes dans son champ de vision. Ce point est gênant quand, par l'expérience du 6MiWT chez le sujet présentant une MN, la présence d'un pareur semble indispensable pour s'assurer que le sujet ne tombe pas. Toutefois, ce problème pourrait se résoudre de lui-même avec l'avancée des technologies (p. ex., ordinateurs plus puissants et caméra RGB-D plus récentes de la Kinect™ V1).

Le PCBS a été testé sur tapis de marche non motorisé et semble également être précis pour la détection et le calcul de vitesse en temps réel (pré-tests). Malheureusement, l'expérimentation scientifique dans ces conditions n'a pas été encore lancée.

Enfin, Fosty (données non publiées) a par la suite continué à améliorer le PCBS pour le rendre utilisable avec des SeG (comme X-Torp et celui non terminé durant le projet Az@game). Sur 10 participants, il a testé le fonctionnement du PCBS en incluant trois gestes des membres supérieurs : lever le bras au dessus de la tête, sur le côté dans le prolongement de la ligne des épaules bras gauche et bras droit (Figure 18). Les participants devaient marcher sur tapis à une vitesse de $0,69 \text{ m.s}^{-1}$, faire un de ces trois gestes toutes les 10 secondes et le maintenir pendant 3 secondes, dans un ordre aléatoire. Chaque geste était effectué 10 fois au final. Pour résumer ses résultats, il a trouvé que les gestes devaient être maintenus au moins 0,5 secondes pour être détectés. Sur 300 gestes réalisés, 292 ont été détectés.



Figure 17 : Association du PCBS pour la vitesse de marche avec la reconnaissance des mouvements des membres inférieurs.

PCBS = Point Cloud Based System

Discussion générale, conclusion et perspectives

Le but de cette thèse est de présenter la conception d'un SeG porté sur l'activité physique et les fonctions exécutives pour le sujet âgé en bonne santé et présentant une MN de type MA. Dans cette optique et en accord avec l'hypothèse de l'Enrichissement Cognitif (Hertzog et al., 2008), X-Torp s'est révélé être le SeG le plus abouti du projet Az@game en proposant, dans sa V1, un EE accès sur la stimulation cognitive, physique et des émotions. La démarche de conception associée à ce jeu se résume par : (1) faire un état de l'art afin d'identifier les besoins en rapport au scénario pédagogique ; (2) faire une première version du jeu et la tester auprès des populations cibles ; (3) à partir de cette étude, proposer des améliorations pour une version plus aboutie, laquelle pourra être utilisée à plus grande échelle.

Sur le plan cognitif, l'objectif d'X-Torp était de stimuler le plus large spectre de la cognition, mais principalement les fonctions exécutives, du fait de leur plus grande fragilité avec l'avancée en âge (Hertzog et al., 2008). Les résultats de l'étude d'utilisabilité sur la V1 donnent des résultats encourageants pour 1 mois d'entraînement. Toutefois, la diversité que ce jeu propose en termes de challenges rend difficile l'analyse des facteurs cognitifs prédicteurs de la performance au jeu. Dans cette optique, il serait intéressant de dissocier le côté action et le côté jeu de réflexion d'X-Torp pour évaluer leurs effets respectifs sur les cognitions (p. ex., groupe navigation et combat en mer uniquement vs. groupe missions sur les îles uniquement). Plus généralement, il serait intéressant d'adopter un consensus pour définir les challenges cognitifs associés aux JV, comme le proposent Djaouti et al. (2008). En effet, cette approche permettrait plus facilement de répertorier les effets cognitifs en fonction du challenge induit par les règles du JV (relative à une metabrique), ce qui faciliterait les démarches de conception des SG en fonction des besoins de stimulation cognitive.

Sur le plan physique, l'objectif d'X-Torp était d'induire une APRA d'intensité modérée. Toutefois, au vu de la littérature (Dustman et al., 1994 ; Hertzog et al., 2008), le réel enjeu serait d'induire une APRA de haute intensité du fait du lien important entre le métabolisme aérobie (Leuner et al., 2012 ; Marques-Aleixo et al., 2012 ; Swerdlow et al., 2010), probablement le métabolisme anaérobie (Brooks, 2009) et la neuroplasticité. Les résultats de l'étude d'utilisabilité suggèrent cette probable possibilité pour les sujets âgés en bonne santé à travers X-Torp. Pour les sujets présentant une MN, les modes de commandes permettent tout juste d'élever le régime cardiorespiratoire. Une solution serait tout simplement d'introduire une interface de locomotion. Cette solution permettrait de résoudre le problème d'intensité mais, avec X-Torp, nécessiterait de repenser totalement les modes de commandes. En effet, même si les études de Fosty mettent en évidence l'utilisabilité de la détection de la vitesse de marche par la Kinect™ associée à la détection de différents mouvements des membres supérieurs, il reste difficile aux sujets présentant une MN d'y arriver aisément. En effet, lors des 6MiWT, les sujets âgés en bonne santé ne présentaient aucune difficultés pour se tenir sur le tapis et suivre l'avatar. Chez les sujets présentant une MN, il fallait rajouter une parade pour tenir le patient et l'empêcher de sortir du tapis par l'arrière. Ils devaient également s'appuyer fortement avec les bras. De ce fait, il ne semble pas possible de faire marcher un sujet présentant une MN tout en levant un bras pour activer une autre commande de jeu. Une solution à proposer serait, dans la logique du MS guidé, d'automatiser l'orientation du sous-marin pour que le sujet ne s'occupe plus que de le faire avancer en marchant. Une fois sur l'île, il descendrait du tapis et utiliserait sa main pour réaliser les mini-jeux. La navigation en mer serait alors plus facile et similaire à l'utilisation du cybercycle (Anderson-Hanley et al., 2012), ce qui modifierait les challenges cognitifs associés à X-Torp selon l'approche de (Djaouti et al., 2008). En effet, la navigation en mer ne serait plus un « Killer » plus un « Driver » plus un « Solitary », mais seulement un

« Solitary », soit tout simplement se déplacer (brique « move ») pour atteindre une destination (brique « match », Tableau 3), d'où l'importance à nouveau de connaître les stimulations cognitives induites en fonctions des challenges afin d'estimer la pertinence d'un tel changement.

Sur le plan émotionnel, le but d'X-Torp était de provoquer une expérience de jeu riche en émotions positives et non stressante. Cet objectif semble accompli, sans oublier l'impact non négligeable de l'assistance humaine durant les séances d'entraînement. Les aménagements de la V2 d'X-Torp vont dans le sens de rallonger la durée totale de jeu et de fixer des buts principaux et intermédiaires (but de l'histoire, actes, missions) pour favoriser le guidage, l'engagement et motiver le joueur à avancer par étapes. Associé à la dynamique de RPG (niveaux d'expérience), le but est de favoriser chez le joueur le désir de jouer, et ainsi le plaisir, la satisfaction, l'intérêt, etc. Le désir de jouer, soulevé par Kühn et al.(2014) est important à considérer. Toutefois, comme montré dans leur étude, ce sentiment diminue avec le temps. De la même manière que chez les joueurs jeunes et très coutumiers des JV, les sujets âgés pourraient voir leur désir de jouer diminuer à un même SG avec le temps. De ce fait, il semble nécessaire que la durée d'un jeu soit suffisante pour stimuler le joueur sans devoir imposer de faire et refaire le jeu sans autre but que la stimulation. De plus, de la même façon que pour X-Torp, il semble nécessaire sur le plan opérationnel de tester assez rapidement les SG pour proposer des améliorations au plus vite et les utiliser, de façon à en développer d'autres. En effet, il semble difficilement envisageable de faire jouer le même patient pendant plusieurs années avec le même JV ou SG. De plus, l'expertise et les automatismes acquis rendraient le jeu moins stimulant avec le temps.

Le versant stimulation sociale par X-Torp n'a pas été abordé conséquemment du fait que le mode multi-joueurs est le dernier élément ajouté à la V2 d'X-Torp et donc non encore testé. Il convient toutefois de noter que pour les sujets présentant une MN, ce mode de jeu

sera assisté par un thérapeute, pour permettre à plusieurs joueurs de se connecter en même temps grâce à la plateforme du développeur.

Sur le sujet de l'utilisabilité, le but était de proposer un jeu ni perçu comme trop difficile, ni trop facile pour l'ensemble des participants. Pour cela, les choix ergonomiques devaient rendre le jeu assez intuitif pour des joueurs novices aux JV et ignorant tout des codes des JV. En se référant à l'approche de Bastien et de Scapin (Bastien & Scapin, 1992 ; Scapin & Bastien, 1997), les critères « guidage », « homogénéité / cohérence », « signifiante des codes et dénominations » et « compatibilité » semblent essentiels à considérer dans ce contexte où le joueur est à la fois novice et atteint de troubles cognitifs et comportementaux. Ainsi, pour optimiser cette « compatibilité », le guidage en temps réel et l'homogénéité des situations semblent être à renforcer. Egalement, la signifiante des codes devraient s'orienter davantage vers l'utilisation d'images et de textes, plus encombrants mais faciles de compréhension, à l'inverse de divers codes issus des JV, moins encombrants mais nécessitant des connaissances préalables du joueur (p. ex., codes de couleur, abréviations).

Ce travail de thèse présente des limites. La première est tout simplement le temps. En effet, alors que les meilleures entreprises de jeux vidéo se donnent parfois plusieurs années pour concevoir un nouveau jeu, voire parfois une suite à un jeu existant, le temps imparti pour ce projet était de trois ans pour concevoir 3 jeux avec une équipe de conception et une équipe scientifique. Il semble plus raisonnable, sur ce temps, de se concentrer uniquement sur un jeu. Le caractère exploratoire représente la seconde limite, responsable à son tour d'un éventail de limites. Il existe très peu de données et de recommandations sur les SG santé actuellement. Les seules constatées dans la littérature (p. ex., Robert et al., 2014) reposent sur des « sondages ». De ce fait, comme initié dans ce travail de thèse, il semble indispensable d'aller rechercher les connaissances robustes dans tous les domaines gravitant autour de la technologie, de la pathologie ciblée et de tout mettre en adéquation pour ne pas se reposer

uniquement sur une démarche empirique. La meilleure stratégie est d'attribuer à chaque chercheur un domaine particulier (p. ex., psychologie sociale, psychologie cognitive, physiologie, nTIC, médecine). Sinon, cela nécessite beaucoup de temps pour se familiariser avec tous les domaines et augmente le risque de se tromper dans les choix méthodologiques. Pour résumer dans le contexte des SG santé :

- Il manque des questionnaires à forte validité scientifique pour mesurer les comportements des usagers. Un questionnaire d'utilisabilité, construit uniquement en rapport à un cadre théorique (p.ex., questionnaire d'utilisabilité du Chapitre 5) n'est pas suffisant. En se basant sur les différentes approches des théories de la relation entre l'homme et la technologie ou des théories de la motivation, il faudrait concevoir et valider des questionnaires permettant d'évaluer l'utilisation du jeu par les patients dans ce contexte de santé, comme par exemple, le contrôle des commandes, la compréhension du scénario de jeu, le caractère stimulant en rapport avec les challenges, le caractère stimulant en rapport avec l'état de santé ou encore le caractère divertissant. Ce genre de questionnaire aiderait à savoir plus précisément à quel niveau le jeu (jeu nouveau sur le marché) est apprécié par des usagers novices et dans le besoin.
- Il n'existe pas de consensus pour définir JV, SG, les sous-catégories de jeu et leurs liens avec les stimulations cognitives. En effet, si personne n'utilise la même catégorisation, comment établir des liens robustes entre un type de jeu et la stimulation cognitive qu'il induit ? Le modèle proposé par Alvarez (2007) ainsi que par Djaouti et al. (2008) est vraisemblablement un essai qui mérite d'être approfondi. Il serait intéressant de relier les « métabriques » de gameplay avec les fonctions cognitives qu'elles vont stimuler. De cette manière, en fonction du besoin en termes de processus cognitifs, le choix initial de type de jeu sortirait de l'empirisme ou des effets de mode.

- Ce problème se retrouve dans le cas de la catégorisation des intensités d'efforts métaboliques. Malgré les apparences, il n'existe pas de consensus sur les notions de seuils d'intensité métaboliques, ce qui est un très gros problème quand il faut chercher quelle est la meilleure intensité pour les patients, et pourquoi sur le plan neurophysiologique. Dans le cas de la MA, quelques études soutiennent l'idée qu'un sujet atteint d'une MA est différent d'un sujet sain sur le plan cardiorespiratoire (p. ex., Vidoni et al., 2012). Toutefois, il n'existe pas de consensus sur la question : les sujets atteints d'une MA sont-ils à considérer comme les sujets sains ou comme une population différente sur ce paramètre ?
- Et enfin, l'absence de critères ergonomiques précis concernant les SG pour les sujets présentant des troubles cognitifs. Les choix ergonomiques des études précédentes à ce travail de thèse reposaient sur des critères totalement empiriques. Dans ce travail de thèse, nous avons tenté de rentrer dans une démarche plus réfléchie et faire des propositions spécifiques aux pathologies cibles à partir d'un modèle général sur l'ergonomie des nTIC (Bastien & Scapin, 1992). D'ailleurs, comme Bastien & Scapin (1992) qui ont créé un guide scientifique sur l'ergonomie d'une nTIC, il serait intéressant de constituer, dans le cadre des SG santé, un guide à partir de ces critères bien définis et de préciser les subtilités de chacun pour une pathologie ciblée.

Finalement, la conception de SG et SeG pour le sujet âgé et présentant une MN est à son début et fait face à une situation inédite où la population cible est culturellement très distante de cette technologie. Néanmoins, au vu de la faible utilisation des méthodes plus traditionnelles pour des raisons motivationnelles (comme l'APRA), la question de la solution vidéo ludique s'impose d'elle-même. Il est donc important que les chercheurs en sciences et les équipes de conception de jeu amplifient leurs collaborations et multiplient les compétences transversales pour établir une démarche scientifique complète autour de cette technologie.

Références

- Adlard, P. A., Perreau, V. M., Pop, V., & Cotman, C. W. (2005). Voluntary exercise decreases amyloid load in a transgenic model of Alzheimer's disease. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 25(17), 4217-4221. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0496-05.2005>
- Alvarez, A., Cacabelos, R., Sanpedro, C., García-Fantini, M., & Aleixandre, M. (2007). Serum TNF- α levels are increased and correlate negatively with free IGF-I in Alzheimer disease. *Neurobiology of Aging*, 28(4), 533-536. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2006.02.012>
- Alvarez, J. (2007). *Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle*. Toulouse 2.
- Alvarez, X. A., Sampedro, C., Cacabelos, R., Linares, C., Aleixandre, M., García-Fantini, M., & Moessler, H. (2009). Reduced TNF- α and increased IGF-I levels in the serum of Alzheimer's disease patients treated with the neurotrophic agent cerebrolysin. *The International Journal of Neuropsychopharmacology / Official Scientific Journal of the Collegium Internationale Neuropsychopharmacologicum (CINP)*, 12(7), 867-872. <http://doi.org/10.1017/S1461145709990101>
- Alzheimer's Disease International. (2014). World Alzheimer Report 2014, Dementia and Risk Reduction, an analysis of protective and modifiable factors. Online: <https://www.alz.co.uk/research/WorldAlzheimerReport2014.pdf>
- Anderson-Hanley, C., Arciero, P. J., Brickman, A. M., Nimon, J. P., Okuma, N., Westen, S. C., ... Zimmerman, E. A. (2012). Exergaming and older adult cognition: a cluster randomized clinical trial. *American Journal of Preventive Medicine*, 42(2), 109-119. <http://doi.org/10.1016/j.amepre.2011.10.016>
- Arkin, S. (2007). Language-enriched exercise plus socialization slows cognitive decline in Alzheimer's disease. *American Journal of Alzheimer's Disease and Other Dementias*, 22(1), 62-77.
- Arkin, S. M. (2003). Student-led exercise sessions yield significant fitness gains for Alzheimer's patients. *American Journal of Alzheimer's Disease and Other Dementias*, 18(3), 159-170.
- Arnáiz, E., & Almkvist, O. (2003). Neuropsychological features of mild cognitive impairment and preclinical Alzheimer's disease. *Acta Neurologica Scandinavica. Supplementum*, 179, 34-41.
- ATS Committee on Proficiency Standards for Clinical Pulmonary Function Laboratories. (2002). ATS statement: guidelines for the six-minute walk test. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 166(1), 111-117. <http://doi.org/10.1164/ajrccm.166.1.at1102>
- Auvinet, E., Multon, F., Aubin, C.-E., Meunier, J., & Raison, M. (2015). Detection of gait cycles in treadmill walking using a Kinect. *Gait & Posture*, 41(2), 722-725. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.08.006>
- Azouvi, P., Couillet, J., Leclercq, M., & Moroni, C. (2003). *La neuropsychologie de l'attention*. Marseille: Solal Editeurs.
- Baker, L. D., Frank, L. L., Foster-Schubert, K., Green, P. S., Wilkinson, C. W., McTiernan, A., ... Craft, S. (2010). Effects of aerobic exercise on mild cognitive impairment: a controlled trial. *Archives of Neurology*, 67(1), 71-79. <http://doi.org/10.1001/archneurol.2009.307>
- Ballard, C., Gauthier, S., Corbett, A., Brayne, C., Aarsland, D., & Jones, E. (2011). Alzheimer's disease. *Lancet (London, England)*, 377(9770), 1019-1031. [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)61349-9](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)61349-9)
- Bandura, A. (1997). *Self-Efficacy: The Exercise of Control*. Worth Publishers.

- Barbeau, E., Didic, M., Tramon, E., Felician, O., Joubert, S., Sontheimer, A., ... Poncet, M. (2004). Evaluation of visual recognition memory in MCI patients. *Neurology*, 62(8), 1317-1322.
- Bardy, B. G. (2011). Learning new skills in Multimodal Enactive Environments. *BIO Web of Conferences*, 1, 8. <http://doi.org/10.1051/bioconf/20110100008>
- Basak, C., Boot, W. R., Voss, M. W., & Kramer, A. F. (2008). Can training in a real-time strategy video game attenuate cognitive decline in older adults? *Psychology and Aging*, 23(4), 765-777. <http://doi.org/10.1037/a0013494>
- Basak, C., Voss, M. W., Erickson, K. I., Boot, W. R., & Kramer, A. F. (2011). Regional differences in brain volume predict the acquisition of skill in a complex real-time strategy videogame. *Brain and Cognition*, 76(3), 407-414. <http://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.03.017>
- Bastien, J. M. C., & Scapin, D. L. (1992). A validation of ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 4(2), 183-196. <http://doi.org/10.1080/10447319209526035>
- Bastien, J. M. C., & Scapin, D. L. (1993). *Ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces* (report) (p. 79). INRIA. Consulté à l'adresse <https://hal.inria.fr/inria-00070012/document>
- Beauquis, J., Pavía, P., Pomilio, C., Vinuesa, A., Podlutska, N., Galvan, V., & Saravia, F. (2013). Environmental enrichment prevents astroglial pathological changes in the hippocampus of APP transgenic mice, model of Alzheimer's disease. *Experimental Neurology*, 239, 28-37. <http://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.09.009>
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 60(6), 2020-2027.
- Bédard, M., Martin, N. J., Krueger, P., & Brazil, K. (2000). Assessing reproducibility of data obtained with instruments based on continuous measurements. *Experimental Aging Research*, 26(4), 353-365. <http://doi.org/10.1080/036107300750015741>
- Bélanger-Gagnon C.-E. (2010). *L'induction du sentiment de présence dans le jeu vidéo* Université Laval.
- Belarbi, K., Burnouf, S., Fernandez-Gomez, F.-J., Laurent, C., Lestavel, S., Figeac, M., ... Blum, D. (2011). Beneficial effects of exercise in a transgenic mouse model of Alzheimer's disease-like Tau pathology. *Neurobiology of Disease*, 43(2), 486-494. <http://doi.org/10.1016/j.nbd.2011.04.022>
- Belchior, P., Marsiske, M., Sisco, S. M., Yam, A., Bavelier, D., Ball, K., & Mann, W. C. (2013). Video game training to improve selective visual attention in older adults. *Computers in Human Behavior*, 29(4), 1318-1324. <http://doi.org/10.1016/j.chb.2013.01.034>
- Belin, C., Ergis, A.-M., & Moreaud, O. (2006). *Actualités sur les démences : aspects cliniques et neuropsychologiques*. De Boeck Supérieur.
- Ben-Sadoun, G., Petit, P.-D., Colson, S. S., König, A., & Robert, P. (2015). Activité aérobie et environnement enrichi : perspectives pour le patient Alzheimer. *Science & Sports*, 30(1), 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.scispo.2014.03.005>
- Benveniste, S., Jouvelot, P., Pin, B., & Péquignot, R. (2012). The MINWii project: Renarcissization of patients suffering from Alzheimer's disease through video game-based music therapy. *Entertainment Computing*, 3(4), 111-120. <http://doi.org/10.1016/j.entcom.2011.12.004>
- Berardi, A., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (2001). Overall vigilance and sustained attention decrements in healthy aging. *Experimental Aging Research*, 27(1), 19-39. <http://doi.org/10.1080/03610730126014>

- Billat, V. L., Mouisel, E., Roblot, N., & Melki, J. (2005). Inter- and intrastain variation in mouse critical running speed. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 98(4), 1258-1263. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00991.2004>
- Bird, M.-L., Clark, B., Millar, J., Whetton, S., & Smith, S. (2015). Exposure to « Exergames » Increases Older Adults' Perception of the Usefulness of Technology for Improving Health and Physical Activity: A Pilot Study. *JMIR Serious Games*, 3(2). <http://doi.org/10.2196/games.4275>
- Bohannon, R. W. (1997). Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: reference values and determinants. *Age and Ageing*, 26(1), 15-19.
- Bonnechère, B., Jansen, B., Salvia, P., Bouzahouene, H., Omelina, L., Moiseev, F., ... Van Sint Jan, S. (2014). Validity and reliability of the Kinect within functional assessment activities: comparison with standard stereophotogrammetry. *Gait & Posture*, 39(1), 593-598. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.09.018>
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser: adapter les technologies à l'homme*. Ed. d'Organisation.
- Broks, P., Lines, C., Atchison, L., Challenor, J., Traub, M., Foster, C., & Sagar, H. (1996). Neuropsychological investigation of anterior and posterior cortical function in early-stage probable Alzheimer's disease. *Behavioural Neurology*, 9(3), 135-148. <http://doi.org/10.3233/BEN-1996-93-405>
- Brooks, G. A. (2009). Cell-cell and intracellular lactate shuttles. *The Journal of Physiology*, 587(Pt 23), 5591-5600. <http://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.178350>
- Bullitt, E., Rahman, F. N., Smith, J. K., Kim, E., Zeng, D., Katz, L. M., & Marks, B. L. (2009). The effect of exercise on the cerebral vasculature of healthy aged subjects as visualized by MR angiography. *AJNR. American Journal of Neuroradiology*, 30(10), 1857-1863. <http://doi.org/10.3174/ajnr.A1695>
- Burns, J. M., Cronk, B. B., Anderson, H. S., Donnelly, J. E., Thomas, G. P., Harsha, A., ... Swerdlow, R. H. (2008). Cardiorespiratory fitness and brain atrophy in early Alzheimer disease. *Neurology*, 71(3), 210-216. <http://doi.org/10.1212/01.wnl.0000317094.86209.cb>
- Camus, J. F., Nicolas, S., Wenisch, E., Morrone, I., Blanchard, F., & Bakchine, S. (2003). Implicit memory for words presented in short texts is preserved in Alzheimer's disease. *Psychological Medicine*, 33(1), 169-174.
- Candotti, C. T., Loss, J. F., Melo, M. de O., La Torre, M., Pasini, M., Dutra, L. A., ... de Oliveira, L. P. (2008). Comparing the lactate and EMG thresholds of recreational cyclists during incremental pedaling exercise. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 86(5), 272-278. <http://doi.org/10.1139/y08-020>
- Chau, D. P., Bremond, F., & Thonnat, M. (2011). A multi-feature tracking algorithm enabling adaptation to context variations. Présenté à The International Conference on Imaging for Crime Detection and Prevention (ICDP). Consulté à l'adresse <https://hal.inria.fr/inria-00632245/document>
- Christensen, B. K., Girard, T. A., & Bagby, R. M. (2007). Wechsler Adult Intelligence Scale-Third Edition short form for index and IQ scores in a psychiatric population. *Psychological Assessment*, 19(2), 236-240. <http://doi.org/10.1037/1040-3590.19.2.236>
- Clark, R. A., Bower, K. J., Mentiplay, B. F., Paterson, K., & Pua, Y.-H. (2013). Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait variables. *Journal of Biomechanics*, 46(15), 2722-2725. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.08.011>
- Clark, R. A., Pua, Y.-H., Fortin, K., Ritchie, C., Webster, K. E., Denehy, L., & Bryant, A. L. (2012). Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control. *Gait & Posture*, 36(3), 372-377. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.03.033>

- Centre National du Cinéma et de l'Image Animée - CNC. (2014). Le marché du jeu vidéo en 2013. Online: <http://www.cnc.fr/web/fr/etudes/-/ressources/5065328>
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Raz, N., Webb, A. G., Cohen, N. J., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2003). Aerobic fitness reduces brain tissue loss in aging humans. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 58(2), 176-180.
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., ... Kramer, A. F. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 61(11), 1166-1170.
- Colom, R., Quiroga, M. Á., Solana, A. B., Burgaleta, M., Román, F. J., Privado, J., ... Karama, S. (2012). Structural changes after videogame practice related to a brain network associated with intelligence. *Intelligence*, 40(5), 479-489. <http://doi.org/10.1016/j.intell.2012.05.004>
- Colzato, L. S., van den Wildenberg, W. P. M., Zmigrod, S., & Hommel, B. (2013). Action video gaming and cognitive control: playing first person shooter games is associated with improvement in working memory but not action inhibition. *Psychological Research*, 77(2), 234-239. <http://doi.org/10.1007/s00426-012-0415-2>
- Crawford, J. R., Bryan, J., Luszcz, M. A., Obonsawin, M. C., & Stewart, L. (2000). The Executive Decline Hypothesis of Cognitive Aging: Do Executive Deficits Qualify as Differential Deficits and Do They Mediate Age-Related Memory Decline? *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7(1), 9-31. <http://doi.org/10.1076/anec.7.1.9.806>
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334. <http://doi.org/10.1007/BF02310555>
- Cummings, J. L., Mega, M., Gray, K., Rosenberg-Thompson, S., Carusi, D. A., & Gornbein, J. (1994). The Neuropsychiatric Inventory: comprehensive assessment of psychopathology in dementia. *Neurology*, 44(12), 2308-2314.
- De Jaeger, C., & Cherin, P. (2011). Les théories du vieillissement. *Médecine & Longévité*, 3(4), 155-174. <http://doi.org/10.1016/j.mlong.2011.10.001>
- Della, S., Spinnler, H., & Venneri, A. (2004). Walking difficulties in patients with Alzheimer's disease might originate from gait apraxia. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 75(2), 196-201.
- Della Sala, S., Laiacona, M., Spinnler, H., & Ubezio, C. (1992). A cancellation test: its reliability in assessing attentional deficits in Alzheimer's disease. *Psychological Medicine*, 22(4), 885-901.
- Ding, Y.-H., Li, J., Zhou, Y., Rafols, J. A., Clark, J. C., & Ding, Y. (2006). Cerebral angiogenesis and expression of angiogenic factors in aging rats after exercise. *Current Neurovascular Research*, 3(1), 15-23.
- Djaouti, D., Alvarez, J., Jessel, J.-P., Methel, G., Molinier, P., Djaouti, D., ... Molinier, P. (2008). A Gameplay Definition through Videogame Classification, A Gameplay Definition through Videogame Classification. *International Journal of Computer Games Technology, International Journal of Computer Games Technology*, 2008, 2008, e470350. <http://doi.org/10.1155/2008/470350>
- Djaouti, D., Alvarez, J., Jessel, J.-P., & Rampnoux, O. (2011). Origins of Serious Games. In M. Ma, A. Oikonomou, & L. C. Jain (Éd.), *Serious Games and Edutainment Applications* (p. 25-43). Springer London. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-2161-9_3
- Dolcos, F., Rice, H. J., & Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry and aging: right hemisphere decline or asymmetry reduction. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(7), 819-825. [http://doi.org/10.1016/S0149-7634\(02\)00068-4](http://doi.org/10.1016/S0149-7634(02)00068-4)

- Dubois, B., Feldman, H. H., Jacova, C., Cummings, J. L., Dekosky, S. T., Barberger-Gateau, P., ... Scheltens, P. (2010). Revising the definition of Alzheimer's disease: a new lexicon. *The Lancet. Neurology*, 9(11), 1118-1127. [http://doi.org/10.1016/S1474-4422\(10\)70223-4](http://doi.org/10.1016/S1474-4422(10)70223-4)
- Dubois, B., Feldman, H. H., Jacova, C., Dekosky, S. T., Barberger-Gateau, P., Cummings, J., ... Scheltens, P. (2007). Research criteria for the diagnosis of Alzheimer's disease: revising the NINCDS-ADRDA criteria. *The Lancet. Neurology*, 6(8), 734-746. [http://doi.org/10.1016/S1474-4422\(07\)70178-3](http://doi.org/10.1016/S1474-4422(07)70178-3)
- Dubois, B., Slachevsky, A., Litvan, I., & Pillon, B. (2000). The FAB: a Frontal Assessment Battery at bedside. *Neurology*, 55(11), 1621-1626.
- Dustman, R. E., Emmerson, R., & Shearer, D. (1994). Physical activity, age, and cognitive-neuropsychological function. *Journal of Aging and Physical Activity*, 2(2), 143-181.
- Dustman, R. E., Ruhling, R. O., Russell, E. M., Shearer, D. E., Bonekat, H. W., Shigeoka, J. W., ... Bradford, D. C. (1984). Aerobic exercise training and improved neuropsychological function of older individuals. *Neurobiology of Aging*, 5(1), 35-42.
- Dye, M. W. G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009a). Increasing Speed of Processing With Action Video Games. *Current directions in psychological science*, 18(6), 321-326. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x>
- Dye, M. W. G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009b). The development of attention skills in action video game players. *Neuropsychologia*, 47(8-9), 1780-1789. <http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.02.002>
- E, L., Burns, J. M., & Swerdlow, R. H. (2014). Effect of high-intensity exercise on aged mouse brain mitochondria, neurogenesis, and inflammation. *Neurobiology of Aging*, 35(11), 2574-2583. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2014.05.033>
- E, L., Lu, J., Burns, J. M., & Swerdlow, R. H. (2013). Effect of exercise on mouse liver and brain bioenergetic infrastructures. *Experimental Physiology*, 98(1), 207-219. <http://doi.org/10.1113/expphysiol.2012.066688>
- Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Hu, L., Morris, K. S., ... Kramer, A. F. (2009). Aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans. *Hippocampus*, 19(10), 1030-1039. <http://doi.org/10.1002/hipo.20547>
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., ... Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 3017-3022. <http://doi.org/10.1073/pnas.1015950108>
- Erickson, K. I., Weinstein, A. M., Sutton, B. P., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., ... Kramer, A. F. (2012). Beyond vascularization: aerobic fitness is associated with N-acetylaspartate and working memory. *Brain and Behavior*, 2(1), 32-41. <http://doi.org/10.1002/brb3.30>
- Fabel, K., Wolf, S. A., Ehninger, D., Babu, H., Leal-Galicia, P., & Kempermann, G. (2009). Additive Effects of Physical Exercise and Environmental Enrichment on Adult Hippocampal Neurogenesis in Mice. *Frontiers in Neuroscience*, 3. <http://doi.org/10.3389/neuro.22.002.2009>
- Fabre, C., Massé-Biron, J., Ahmaidi, S., Adam, B., & Préfaut, C. (1997). Effectiveness of individualized aerobic training at the ventilatory threshold in the elderly. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 52(5), B260-266.
- Fang Yu, null. (2011). Guiding research and practice: a conceptual model for aerobic exercise training in Alzheimer's disease. *American Journal of Alzheimer's Disease and Other Dementias*, 26(3), 184-194. <http://doi.org/10.1177/1533317511402317>

- Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 39(6), 469-490.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). « Mini-mental state ». A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12(3), 189-198.
- Friedenberg, J., & Silverman, G. (2015). *Cognitive Science: An Introduction to the Study of Mind*. SAGE Publications.
- Fukuyama, H., Ogawa, M., Yamauchi, H., Yamaguchi, S., Kimura, J., Yonekura, Y., & Konishi, J. (1994). Altered cerebral energy metabolism in Alzheimer's disease: a PET study. *Journal of Nuclear Medicine: Official Publication, Society of Nuclear Medicine*, 35(1), 1-6.
- Gaskill, S. E., Ruby, B. C., Walker, A. J., Sanchez, O. A., Serfass, R. C., & Leon, A. S. (2001). Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(11), 1841-1848.
- Gazzaley, A., Sheridan, M. A., Cooney, J. W., & D'Esposito, M. (2007). Age-related deficits in component processes of working memory. *Neuropsychology*, 21(5), 532-539. <http://doi.org/10.1037/0894-4105.21.5.532>
- Geyer, H., Seyfarth, A., & Blickhan, R. (2006). Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1603), 2861-2867. <http://doi.org/10.1098/rspb.2006.3637>
- Giffard, B., Desgranges, B., & Eustache, F. (2001). Le vieillissement de la mémoire : vieillissement normal et pathologique. *Gérontologie et société*, (97), 33-47.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 423(6939), 534-537. <http://doi.org/10.1038/nature01647>
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2007). Action-Video-Game Experience Alters the Spatial Resolution of Vision. *Psychological science*, 18(1), 88-94. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01853.x>
- Griffin, W. S., Stanley, L. C., Ling, C., White, L., MacLeod, V., Perrot, L. J., ... Araoz, C. (1989). Brain interleukin 1 and S-100 immunoreactivity are elevated in Down syndrome and Alzheimer disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 86(19), 7611-7615.
- Guillaume, C., Guillery-Girard, B., Eustache, F., & Desgranges, B. (2009). Mémoire et vieillissement normal : données comportementales et électrophysiologiques. *NPG Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie*, 9(49), 3-9. <http://doi.org/10.1016/j.npg.2008.04.012>
- Guralnik, J. M., Simonsick, E. M., Ferrucci, L., Glynn, R. J., Berkman, L. F., Blazer, D. G., ... Wallace, R. B. (1994). A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission. *Journal of Gerontology*, 49(2), M85-94.
- Hammes-Adelé, S. (2011). *Traduction temporelle de la relation humain-technologie-organisation : validation et perspectives autour de la symbiose*. Metz.
- Hawkins, S., & Wiswell, R. (2003). Rate and mechanism of maximal oxygen consumption decline with aging: implications for exercise training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33(12), 877-888.
- Hertzog, C., Kramer, A. F., Wilson, R. S., & Lindenberger, U. (2008). Enrichment Effects on Adult Cognitive Development: Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced? *Psychological Science in the Public Interest: A Journal of the American Psychological Society*, 9(1), 1-65. <http://doi.org/10.1111/j.1539-6053.2009.01034.x>

- Holden, R. J., & Karsh, B.-T. (2010). The Technology Acceptance Model: its past and its future in health care. *Journal of biomedical informatics*, 43(1), 159. <http://doi.org/10.1016/j.jbi.2009.07.002>
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 30(1), 1-15.
- Houghton, G., & Tipper, S. P. (1996). Inhibitory mechanisms of neural and cognitive control: applications to selective attention and sequential action. *Brain and Cognition*, 30(1), 20-43. <http://doi.org/10.1006/brcg.1996.0003>
- Huang, H.-C., & Jiang, Z.-F. (2009). Accumulated amyloid-beta peptide and hyperphosphorylated tau protein: relationship and links in Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease: JAD*, 16(1), 15-27. <http://doi.org/10.3233/JAD-2009-0960>
- Hyun, G. J., Shin, Y. W., Kim, B.-N., Cheong, J. H., Jin, S. N., & Han, D. H. (2013). Increased cortical thickness in professional on-line gamers. *Psychiatry Investigation*, 10(4), 388-392. <http://doi.org/10.4306/pi.2013.10.4.388>
- Ibrahim, R., & Jaafar, A. (2011). User acceptance of educational games. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 77.
- International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision, ICD-10 (2010). Chapter V - Mental and behavior disorders – Organic, including symptomatic, mental disorders. <http://apps.who.int/classifications/icd10/browse/2010/en#/F00-F09> Accessed on February 10, 2016
- Kalpouzos, G., Chételat, G., Baron, J.-C., Landeau, B., Mevel, K., Godeau, C., ... Desgranges, B. (2009). Voxel-based mapping of brain gray matter volume and glucose metabolism profiles in normal aging. *Neurobiology of Aging*, 30(1), 112-124. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2007.05.019>
- Karlsson, T., Börjesson, A., Adolfsson, R., & Nilsson, L.-G. (2002). Successive memory test performance and priming in Alzheimer's disease: evidence from the word-fragment completion task. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 38(3), 341-355.
- Kemoun, G., Thibaud, M., Roumagne, N., Carette, P., Albinet, C., Toussaint, L., ... Dugué, B. (2010). Effects of a physical training programme on cognitive function and walking efficiency in elderly persons with dementia. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 29(2), 109-114. <http://doi.org/10.1159/000272435>
- Khoshelham, K., & Elberink, S. O. (2012). Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, 12(2), 1437-1454. <http://doi.org/10.3390/s120201437>
- King, W. R., & He, J. (2006). A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information & Management*, 43(6), 740-755. <http://doi.org/10.1016/j.im.2006.05.003>
- Kueider, A. M., Parisi, J. M., Gross, A. L., & Rebok, G. W. (2012). Computerized cognitive training with older adults: a systematic review. *PloS One*, 7(7), e40588. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0040588>
- Kühn, S., Gleich, T., Lorenz, R. C., Lindenberger, U., & Gallinat, J. (2014). Playing Super Mario induces structural brain plasticity: gray matter changes resulting from training with a commercial video game. *Molecular Psychiatry*, 19(2), 265-271. <http://doi.org/10.1038/mp.2013.120>
- Kumar, A., Rani, A., Tchigranova, O., Lee, W.-H., & Foster, T. C. (2012). Influence of late-life exposure to environmental enrichment or exercise on hippocampal function and CA1 senescent physiology. *Neurobiology of Aging*, 33(4), 828.e1-17. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2011.06.023>

- Kuznetsov, S. Y., Popov, D. V., Borovik, A. S., & Vinogradova, O. L. (2015). [Determination of Aerobic-anaerobic Transition in Working Muscle Using EMG and Near Infrared-Spectroscopy Data]. *Fiziologija Cheloveka*, 41(5), 108-113.
- Lafleche, G., & Albert, M. S. (1995). Executive function deficits in mild Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 9(3), 313-320. <http://doi.org/10.1037/0894-4105.9.3.313>
- Larry, K., W., Jack, W., & David, C. (2015). *Physiology of Sport and Exercise 6th Edition*. Human Kinetics.
- Laskin, J. J., Bundy, S., Marron, H., Moore, H., Swanson, M., Blair, M., & Humphrey, R. (2007). Using a treadmill for the 6-minute walk test: reliability and validity. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*, 27(6), 407-410. <http://doi.org/10.1097/01.HCR.0000300270.45881.d0>
- Lazarov, O., Robinson, J., Tang, Y.-P., Hairston, I. S., Korade-Mirnic, Z., Lee, V. M.-Y., ... Sisodia, S. S. (2005). Environmental enrichment reduces Abeta levels and amyloid deposition in transgenic mice. *Cell*, 120(5), 701-713. <http://doi.org/10.1016/j.cell.2005.01.015>
- Legris, P., Ingham, J., & Collette, P. (2003). Why do people use information technology? A critical review of the technology acceptance model. *Information & Management*, 40(3), 191-204. [http://doi.org/10.1016/S0378-7206\(01\)00143-4](http://doi.org/10.1016/S0378-7206(01)00143-4)
- Leuner, K., Müller, W. E., & Reichert, A. S. (2012). From mitochondrial dysfunction to amyloid beta formation: novel insights into the pathogenesis of Alzheimer's disease. *Molecular Neurobiology*, 46(1), 186-193. <http://doi.org/10.1007/s12035-012-8307-4>
- Levinoff, E. J., Li, K. Z. H., Murtha, S., & Chertkow, H. (2004). Selective attention impairments in Alzheimer's disease: evidence for dissociable components. *Neuropsychology*, 18(3), 580-588. <http://doi.org/10.1037/0894-4105.18.3.580>
- Logie, R. H., Cocchini, G., Delia Sala, S., & Baddeley, A. D. (2004). Is there a specific executive capacity for dual task coordination? Evidence from Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 18(3), 504-513. <http://doi.org/10.1037/0894-4105.18.3.504>
- Lucía, A., Sánchez, O., Carvajal, A., & Chicharro, J. L. (1999). Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. *British Journal of Sports Medicine*, 33(3), 178-185.
- Lykou, E., Rankin, K. P., Chatziantoniou, L., Boulas, C., Papatriantafyllou, O., Tsaousis, I., ... Papatriantafyllou, J. D. (2013). Big 5 personality changes in Greek bvFTD, AD, and MCI patients. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 27(3), 258-264. <http://doi.org/10.1097/WAD.0b013e31826e5504>
- Maci, T., Pira, F. L., Quattrocchi, G., Nuovo, S. D., Perciavalle, V., & Zappia, M. (2012). Physical and cognitive stimulation in Alzheimer Disease. the GAIA Project: a pilot study. *American Journal of Alzheimer's Disease and Other Dementias*, 27(2), 107-113. <http://doi.org/10.1177/1533317512440493>
- Maillot, P., Perrot, A., & Hartley, A. (2012). Effects of interactive physical-activity video-game training on physical and cognitive function in older adults. *Psychology and Aging*, 27(3), 589-600. <http://doi.org/10.1037/a0026268>
- Manczak, M., Anekonda, T. S., Henson, E., Park, B. S., Quinn, J., & Reddy, P. H. (2006). Mitochondria are a direct site of A beta accumulation in Alzheimer's disease neurons: implications for free radical generation and oxidative damage in disease progression. *Human Molecular Genetics*, 15(9), 1437-1449. <http://doi.org/10.1093/hmg/ddl066>
- Manera, V., Petit, P.-D., Derreumaux, A., Orvieto, I., Romagnoli, M., Lyttle, G., ... Robert, P. H. (2015). 'Kitchen and cooking,' a serious game for mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: a pilot study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7. <http://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00024>

- Marin, R. S. (1990). Differential diagnosis and classification of apathy. *The American Journal of Psychiatry*, 147(1), 22-30. <http://doi.org/10.1176/ajp.147.1.22>
- Marques-Aleixo, I., Oliveira, P. J., Moreira, P. I., Magalhães, J., & Ascensão, A. (2012). Physical exercise as a possible strategy for brain protection: evidence from mitochondrial-mediated mechanisms. *Progress in Neurobiology*, 99(2), 149-162. <http://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2012.08.002>
- Massé-Biron, J., Mercier, J., Adam, B., & Préfaut, C. (1990). Intensité d'entraînement et aptitude aérobie chez le sujet âgé. *Science & Sports*, 5(3), 137-142. [http://doi.org/10.1016/S0765-1597\(05\)80264-3](http://doi.org/10.1016/S0765-1597(05)80264-3)
- Massé-Biron, J., & Préfaut, C. (1994). Bases physiopathologiques du réentraînement à l'effort chez le sujet âgé. *Science & Sports*, 9(4), 201-207. [http://doi.org/10.1016/S0765-1597\(05\)80064-4](http://doi.org/10.1016/S0765-1597(05)80064-4)
- Mathieson, K. (1991). Predicting User Intentions: Comparing the Technology Acceptance Model with the Theory of Planned Behavior. *Information Systems Research*, 2(3), 173-191. <http://doi.org/10.1287/isre.2.3.173>
- McCallum, S., & Boletsis, C. (2013). Dementia Games: A Literature Review of Dementia-Related Serious Games. In M. Ma, M. F. Oliveira, S. Petersen, & J. B. Hauge (Éd.), *Serious Games Development and Applications* (p. 15-27).
- McMorris, T., & Hale, B. J. (2015). Is there an acute exercise-induced physiological/biochemical threshold which triggers increased speed of cognitive functioning? A meta-analytic investigation. *Journal of Sport and Health Science*, 4(1), 4-13. <http://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.08.003>
- Mentiplay, B. F., Clark, R. A., Mullins, A., Bryant, A. L., Bartold, S., & Paterson, K. (2013). Reliability and validity of the Microsoft Kinect for evaluating static foot posture. *Journal of Foot and Ankle Research*, 6(1), 14. <http://doi.org/10.1186/1757-1146-6-14>
- Morris, J. C. (1993). The Clinical Dementia Rating (CDR): current version and scoring rules. *Neurology*, 43(11), 2412-2414.
- Mulin, E., Leone, E., Dujardin, K., Delliaux, M., Leentjens, A., Nobili, F., ... Robert, P. H. (2011). Diagnostic criteria for apathy in clinical practice. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 26(2), 158-165. <http://doi.org/10.1002/gps.2508>
- Munro, B. H. (2005). *Statistical Methods for Health Care Research*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Murrell, C. J., Cotter, J. D., Thomas, K. N., Lucas, S. J. E., Williams, M. J. A., & Ainslie, P. N. (2013). Cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity at rest and during sub-maximal exercise: effect of age and 12-week exercise training. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, 35(3), 905-920. <http://doi.org/10.1007/s11357-012-9414-x>
- Mustroph, M. L., Chen, S., Desai, S. C., Cay, E. B., DeYoung, E. K., & Rhodes, J. S. (2012). Aerobic exercise is the critical variable in an enriched environment that increases hippocampal neurogenesis and water maze learning in male C57BL/6J mice. *Neuroscience*, 219, 62-71. <http://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.06.007>
- Nawaz, A., Skjæret, N., Ystmark, K., Helbostad, J. L., Vereijken, B., & Svanåes, D. (2014). Assessing Seniors' User Experience (UX) of Exergames for Balance Training. In *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational* (p. 578-587). New York, NY, USA: ACM. <http://doi.org/10.1145/2639189.2639235>
- Nghiem, A.-T., Bremond, F., & Thonnat, M. (2009). Controlling Background Subtraction Algorithms for Robust Object Detection. Présenté à International conference on Imaging for Crime Detection and Prevention.

- Nichol, K. E., Poon, W. W., Parachikova, A. I., Cribbs, D. H., Glabe, C. G., & Cotman, C. W. (2008). Exercise alters the immune profile in Tg2576 Alzheimer mice toward a response coincident with improved cognitive performance and decreased amyloid. *Journal of Neuroinflammation*, 5, 13. <http://doi.org/10.1186/1742-2094-5-13>
- Nouchi, R., Taki, Y., Takeuchi, H., Hashizume, H., Akitsuki, Y., Shigemune, Y., ... Kawashima, R. (2012). Brain training game improves executive functions and processing speed in the elderly: a randomized controlled trial. *PloS One*, 7(1), e29676. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0029676>
- O'Donnell, C. A., Manera, V., Köhler, S., & Irving, K. (2015). Promoting modifiable risk factors for dementia: is there a role for general practice? *The British Journal of General Practice: The Journal of the Royal College of General Practitioners*, 65(640), 567-568. <http://doi.org/10.3399/bjgp15X687241>
- Pagani, L., & Eckert, A. (2011). Amyloid-Beta interaction with mitochondria. *International Journal of Alzheimer's Disease*, 2011, 925050. <http://doi.org/10.4061/2011/925050>
- Palleschi, L., Vetta, F., De Gennaro, E., Idone, G., Sottosanti, G., Gianni, W., & Marigliano, V. (1996). Effect of aerobic training on the cognitive performance of elderly patients with senile dementia of Alzheimer type. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 22 Suppl 1, 47-50. [http://doi.org/10.1016/0167-4943\(96\)86912-3](http://doi.org/10.1016/0167-4943(96)86912-3)
- Pereira, M. C. C., Rocha Júnior, V. de A., Bottaro, M., de Andrade, M. M., Schwartz, F. P., Martorelli, A., ... Carmo, J. C. (2013). Relationship between ventilatory threshold and muscle fiber conduction velocity responses in trained cyclists. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 23(2), 448-454. <http://doi.org/10.1016/j.jelekin.2012.10.005>
- Petersen, R. C. (2004). Mild cognitive impairment as a diagnostic entity. *Journal of Internal Medicine*, 256(3), 183-194. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2004.01388.x>
- Petersen, R. C., Knopman, D. S., Boeve, B. F., Geda, Y. E., Ivnik, R. J., Smith, G. E., ... Jack, C. R. (2009). Mild Cognitive Impairment: Ten Years Later. *Archives of neurology*, 66(12), 1447-1455. <http://doi.org/10.1001/archneurol.2009.266>
- Petersen, R. C., Smith, G. E., Waring, S. C., Ivnik, R. J., Kokmen, E., & Tangelos, E. G. (1997). Aging, memory, and mild cognitive impairment. *International Psychogeriatrics / IPA*, 9 Suppl 1, 65-69.
- Pires, F. O., Lima-Silva, A. E., Oliveira, E. N., Rumenig-Souza, E., & Kiss, M. A. P. D. M. (2008). Ventilation Behavior in Trained and Untrained Men During Incremental Test: Evidence of one Metabolic Transition Point. *Journal of Sports Science & Medicine*, 7(3), 335-343.
- Podsiadlo, D., & Richardson, S. (1991). The timed « Up & Go »: a test of basic functional mobility for frail elderly persons. *Journal of the American Geriatrics Society*, 39(2), 142-148.
- Powers, K. L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., Palladino, M. A., & Alfieri, L. (2013). Effects of video-game play on information processing: a meta-analytic investigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(6), 1055-1079. <http://doi.org/10.3758/s13423-013-0418-z>
- Raz, L., Knoefel, J., & Bhaskar, K. (2015). The neuropathology and cerebrovascular mechanisms of dementia. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism: Official Journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism*. <http://doi.org/10.1038/jcbfm.2015.164>
- Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Éd.), *The handbook of aging and cognition* (2nd ed.) (p. 1-90). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Head, D., Williamson, A., ... Acker, J. D. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and

modifiers. *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.: 1991), 15(11), 1676-1689. <http://doi.org/10.1093/cercor/bhi044>

- Reitan, R. M. (1958). Validity of the trail making test as an indicator of organic brain damage. *Perceptual and Motor Skills*, 8(3), 271-276. <http://doi.org/10.2466/pms.1958.8.3.271>
- Reuter-Lorenz, P. A., & Park, D. C. (2010). Human Neuroscience and the Aging Mind: A New Look at Old Problems. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, gbq035. <http://doi.org/10.1093/geronb/gbq035>
- Riley, P. O., Paolini, G., Della Croce, U., Paylo, K. W., & Kerrigan, D. C. (2007). A kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy subjects. *Gait & Posture*, 26(1), 17-24. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.07.003>
- Roach, K. E., Tappen, R. M., Kirk-Sanchez, N., Williams, C. L., & Loewenstein, D. (2011). A randomized controlled trial of an activity specific exercise program for individuals with Alzheimer disease in long-term care settings. *Journal of Geriatric Physical Therapy* (2001), 34(2), 50-56. <http://doi.org/10.1519/JPT.0b013e31820aab9c>
- Robert, P. H., Clairet, S., Benoit, M., Koutaich, J., Bertogliati, C., Tible, O., ... Bedoucha, P. (2002). The apathy inventory: assessment of apathy and awareness in Alzheimer's disease, Parkinson's disease and mild cognitive impairment. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 17(12), 1099-1105. <http://doi.org/10.1002/gps.755>
- Robert, P. H., König, A., Amieva, H., Andrieu, S., Bremond, F., Bullock, R., ... Manera, V. (2014). Recommendations for the use of Serious Games in people with Alzheimer's Disease, related disorders and frailty. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 54. <http://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00054>
- Robert, P.-H., Schuck, S., Dubois, B., Lépine, J.-P., Gallarda, T., Olié, J.-P., ... Troy, S. (2003). [Validation of the Short Cognitive Battery (B2C). Value in screening for Alzheimer's disease and depressive disorders in psychiatric practice]. *L'Encéphale*, 29(3 Pt 1), 266-272.
- Rosenberg, D., Depp, C. A., Vahia, I. V., Reichstadt, J., Palmer, B. W., Kerr, J., ... Jeste, D. V. (2010). Exergames for subsyndromal depression in older adults: a pilot study of a novel intervention. *The American Journal of Geriatric Psychiatry: Official Journal of the American Association for Geriatric Psychiatry*, 18(3), 221-226. <http://doi.org/10.1097/JGP.0b013e3181c534b5>
- Rowe, J. W., & Kahn, R. L. (1997). Successful aging. *The Gerontologist*, 37(4), 433-440.
- Rullier, L., Matharan, F., Barbeau, E. J., Mokri, H., Dartigues, J.-F., Pérès, K., & Amieva, H. (2014). Test du DMS 48 : normes chez les sujets âgés et propriétés de détection de la maladie d'Alzheimer dans la cohorte AMI. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement*, 12(3), 321-330. <http://doi.org/10.1684/pnv.2014.0486>
- Ryan, null, & Deci, null. (2000). Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1), 54-67. <http://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020>
- Ryan, R. M., Rigby, C. S., & Przybylski, A. (2006). The Motivational Pull of Video Games: A Self-Determination Theory Approach. *Motivation and Emotion*, 30(4), 344-360. <http://doi.org/10.1007/s11031-006-9051-8>
- Sacco, G., Caillaud, C., Ben Sadoun, G., Robert, P., David, R., & Brisswalter, J. (2015). Exercise Plus Cognitive Performance Over and Above Exercise Alone in Subjects with Mild Cognitive Impairment. *Journal of Alzheimer's Disease: JAD*, 50(1), 19-25. <http://doi.org/10.3233/JAD-150194>
- Sale, A., Berardi, N., & Maffei, L. (2014). Environment and brain plasticity: towards an endogenous pharmacotherapy. *Physiological Reviews*, 94(1), 189-234. <http://doi.org/10.1152/physrev.00036.2012>

- Scapin, D. L., & Bastien, J. M. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & Information Technology*, 16(4-5), 220-231. <http://doi.org/10.1080/014492997119806>
- Schutzer, K. A., & Graves, B. S. (2004). Barriers and motivations to exercise in older adults. *Preventive Medicine*, 39(5), 1056-1061. <http://doi.org/10.1016/j.ypmed.2004.04.003>
- Sebastian, M. V., Menor, J., & Elosua, R. (2001). Patterns of errors in short-term forgetting in AD and ageing. *Memory (Hove, England)*, 9(4-6), 223-231. <http://doi.org/10.1080/09658210143000038>
- Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin*, 86(2), 420-428.
- Siéoff, E., & Piquard, A. (2004). [Attention and aging]. *Psychologie & Neuropsychiatrie Du Vieillessement*, 2(4), 257-269.
- Syndicat National du Jeu Vidéo - SNJV. (2014). Chiffres clés du livre blanc 2013. Online: <http://www.snjv.org/chiffres-cles-du-livre-blanc/>
- Speisman, R. B., Kumar, A., Rani, A., Pastoriza, J. M., Severance, J. E., Foster, T. C., & Ormerod, B. K. (2013). Environmental enrichment restores neurogenesis and rapid acquisition in aged rats. *Neurobiology of Aging*, 34(1), 263-274. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2012.05.023>
- Srinivasan, M., & Ruina, A. (2006). Computer optimization of a minimal biped model discovers walking and running. *Nature*, 439(7072), 72-75. <http://doi.org/10.1038/nature04113>
- Steinberg, M., Leoutsakos, J.-M. S., Podewils, L. J., & Lyketsos, C. G. (2009). Evaluation of a home-based exercise program in the treatment of Alzheimer's disease: the Maximizing Independence in Dementia (MIND) study. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 24(7), 680-685. <http://doi.org/10.1002/gps.2175>
- Stern, Y. (2012). Cognitive reserve in ageing and Alzheimer's disease. *Lancet neurology*, 11(11), 1006-1012. [http://doi.org/10.1016/S1474-4422\(12\)70191-6](http://doi.org/10.1016/S1474-4422(12)70191-6)
- Stern, Y. (2013). *Cognitive Reserve: Theory and Applications*. Psychology Press.
- Swerdlow, R. H., Burns, J. M., & Khan, S. M. (2010). The Alzheimer's disease mitochondrial cascade hypothesis. *Journal of Alzheimer's Disease: JAD*, 20 Suppl 2, S265-279. <http://doi.org/10.3233/JAD-2010-100339>
- Tappen, R. M., Roach, K. E., Applegate, E. B., & Stowell, P. (2000). Effect of a Combined Walking and Conversation Intervention on Functional Mobility of Nursing Home Residents With Alzheimer Disease. *Alzheimer disease and associated disorders*, 14(4), 196-201.
- Taylor, L. M., Maddison, R., Pfaeffli, L. A., Rawstorn, J. C., Gant, N., & Kerse, N. M. (2012). Activity and energy expenditure in older people playing active video games. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(12), 2281-2286. <http://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.03.034>
- Taylor, S., & Todd, P. A. (1995). Understanding Information Technology Usage: A Test of Competing Models. *Information Systems Research*, 6(2), 144-176. <http://doi.org/10.1287/isre.6.2.144>
- Tekinbas, K. S., & Zimmerman, E. (2003). *Rules of Play: Game Design Fundamentals*. Cambridge, Mass: The MIT Press.
- Thomas-Antérion, C., & Mahieux, F. (2009). Les troubles cognitifs de la maladie d'Alzheimer et des syndromes apparentés : pourquoi et comment les explorer ? *NPG Neurologie - Psychiatrie - Gériatrie*, 9(52), 183-190. <http://doi.org/10.1016/j.npg.2009.04.008>

- Toril, P., Reales, J. M., & Ballesteros, S. (2014). Video game training enhances cognition of older adults: a meta-analytic study. *Psychology and Aging*, 29(3), 706-716. <http://doi.org/10.1037/a0037507>
- Traykov, L., Rigaud, A.-S., Cesaro, P., & Boller, F. (2007). Le déficit neuropsychologique dans la maladie d'Alzheimer débutante. *L'Encéphale*, 33(3), 310-316. [http://doi.org/10.1016/S0013-7006\(07\)92044-8](http://doi.org/10.1016/S0013-7006(07)92044-8)
- Turner, M., Kitchenham, B., Brereton, P., Charters, S., & Budgen, D. (2010). Does the technology acceptance model predict actual use? A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 52(5), 463-479. <http://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.11.005>
- United Nations. (2013). World population ageing 2013. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Online: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf>.
- Um, H.-S., Kang, E.-B., Koo, J.-H., Kim, H.-T., Jin-Lee, null, Kim, E.-J., ... Cho, J.-Y. (2011). Treadmill exercise represses neuronal cell death in an aged transgenic mouse model of Alzheimer's disease. *Neuroscience Research*, 69(2), 161-173. <http://doi.org/10.1016/j.neures.2010.10.004>
- Valero, J., España, J., Parra-Damas, A., Martín, E., Rodríguez-Álvarez, J., & Saura, C. A. (2011). Short-term environmental enrichment rescues adult neurogenesis and memory deficits in APP(Sw,Ind) transgenic mice. *PloS One*, 6(2), e16832. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0016832>
- Vallerand, R. J., & Blssonnette, R. (1992). Intrinsic, Extrinsic, and Amotivational Styles as Predictors of Behavior: A Prospective Study. *Journal of Personality*, 60(3), 599-620. <http://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1992.tb00922.x>
- Van Praag, H., Shubert, T., Zhao, C., & Gage, F. H. (2005). Exercise enhances learning and hippocampal neurogenesis in aged mice. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 25(38), 8680-8685. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1731-05.2005>
- Varlet, M., Filippeschi, A., Ben-sadoun, G., Ratto, M., Marin, L., Ruffaldi, E., & Bardy, B. G. (2013). Virtual Reality as a Tool to Learn Interpersonal Coordination: Example of Team Rowing. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 22(3), 202-215. http://doi.org/10.1162/PRES_a_00151
- Venkatesh, V., & Brown, S. A. (2001). A Longitudinal Investigation of Personal Computers in Homes: Adoption Determinants and Emerging Challenges. *MIS Quarterly*, 25(1), 71-102. <http://doi.org/10.2307/3250959>
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186-204. <http://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27(3), 425-478.
- Venkatesh, V., Thong, J. Y. L., & Xu, X. (2012). *Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (SSRN Scholarly Paper No. ID 2002388). Rochester, NY: Social Science Research Network.
- Venturelli, M., Scarsini, R., & Schena, F. (2011). Six-month walking program changes cognitive and ADL performance in patients with Alzheimer. *American Journal of Alzheimer's Disease and Other Dementias*, 26(5), 381-388. <http://doi.org/10.1177/1533317511418956>
- Verret, L., Krezymon, A., Halley, H., Trouche, S., Zerwas, M., Lazouret, M., ... Rampon, C. (2013). Transient enriched housing before amyloidosis onset sustains cognitive improvement in Tg2576 mice. *Neurobiology of Aging*, 34(1), 211-225. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2012.05.013>

- Vidoni, E. D., Honea, R. A., Billinger, S. A., Swerdlow, R. H., & Burns, J. M. (2012). Cardiorespiratory fitness is associated with atrophy in Alzheimer's and aging over 2 years. *Neurobiology of Aging*, 33(8), 1624-1632. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2011.03.016>
- Voss, M. W., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J. S., ... Kramer, A. F. (2010). Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2. <http://doi.org/10.3389/fnagi.2010.00032>
- Walker, B. A. (2014). The Acceptance and Use of Virtual Gaming as an Intervention Strategy for Older Adults in Occupational Therapy. *Games for Health Journal*, 3(6), 333-340. <http://doi.org/10.1089/g4h.2014.0062>
- Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063-1070.
- Weir, J. P. (2005). Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 19(1), 231-240. <http://doi.org/10.1519/15184.1>
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, 120(2), 272-292.
- Wilkins, L. W. &. (2013). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription + ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Xu, X., McGorry, R. W., Chou, L.-S., Lin, J.-H., & Chang, C.-C. (2015). Accuracy of the Microsoft Kinect for measuring gait parameters during treadmill walking. *Gait & Posture*, 42(2), 145-151. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.05.002>
- Yu, F., Savik, K., Wyman, J. F., & Bronas, U. G. (2011). Maintaining physical fitness and function in Alzheimer's disease: a pilot study. *American Journal of Alzheimer's Disease and Other Dementias*, 26(5), 406-412. <http://doi.org/10.1177/1533317511414861>
- Zyda, M. (2005). From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, 38(9), 25-32. <http://doi.org/10.1109/MC.2005.297>

Développement d'un serious game portant sur l'activité physique et les fonctions exécutives pour l'évaluation et la stimulation des patients présentant une maladie d'Alzheimer ou une pathologie associée

Résumé

La prise en charge des personnes âgées présentant une Maladie Neurodégénérative aboutissant à des troubles cognitifs et une démence représente un enjeu majeur de santé. Il est important de concevoir des outils pour aider les cliniciens à mieux prendre en charge les patients par la stimulation. L'Environnement Enrichi – favorisant les stimulations cognitives, physiques et sociales dans un contexte émotionnel positif – apparaît être une puissante stratégie non-médicamenteuse pour réduire ou retarder les évolutions des processus neurodégénératifs et les pertes cognitives. Dans cette approche, l'hypothèse de l'Enrichissement Cognitif stipule que les comportements qu'adopte un individu tout au long de sa vie vont avoir un impact sur le fonctionnement de son cerveau, même à l'âge avancé. C'est dans cette idée que les Jeux Vidéo et les Serious Games à activité physique sont utilisés.

X-Torp est un Serious Game d'action conçu pour être accessible et stimulant pour les sujets âgés en bonne santé et présentant une Maladie Neurodégénérative due à un trouble cognitif léger ou une démence de type Alzheimer. Le joueur incarne un sous-marin et est plongé dans un monde quasi-maritime où seules quelques îles sont en surface. Il doit ainsi évoluer dans un scénario pour monter en grade à travers la réalisation de missions et d'affrontements en mer. X-Torp est jouable sur Microsoft® Kinect™ pour PC.

L'objectif de cette thèse est de présenter l'ensemble des travaux scientifiques entrepris pour (1) concevoir une première version du jeu ; (2) la tester chez les populations cibles et (3) concevoir en conséquence une seconde version commercialisable.

Mots clef : serious game ; Alzheimer ; entraînement ; exercice physique ; fonctions cognitives

Development of a serious game that focuses on physical activity and executive functions for the evaluation and stimulation of patients with Alzheimer's disease or associated pathology (AD)

Abstract

The care of elderly people affected by neurodegenerative diseases leading to cognitive impairment and dementia represents a major challenge in the healthcare domain. It is important to design tools that can help clinicians to better treat these patients through stimulation. Enriched Environments - which favor cognitive and physical stimulations in a positive emotional context – look like a powerful non-pharmacological strategy to reduce or delay the evolution of neurodegenerative processes, and the consequent cognitive disorders. Based on this approach, the Enriched Environment hypothesis states that the behavior of an individual during the lifetime, even during old age, affect his brain functioning. Video Games and Serious Games implying physical activity are used in this context.

X-Torp is an action Serious Game conceived to be usable and stimulating for healthy elderly people and people with neurodegenerative disorders leading to Mild Cognitive Impairment or to Alzheimer's' dementia. The player takes the command of a submarine and is immersed in a sea-world where only a few islands appear on the surface. The player needs to advance in the game scenario to improve his grade position accomplishing missions and battling over the sea. X-Torp is played with Microsoft® Kinect™ for PC.

The aim of this thesis is to present the scientific work undergone to (1) conceive and design the first game version; (2) test this version on the target populations, and (3) based on the results, design a second game version ready to be commercialized.

Keywords: serious game; Alzheimer disease; training; physical exercise; cognitive functions