



HAL
open science

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe. Étude clinique transversale comparative – RIPH 2

Matthieu Armand

► To cite this version:

Matthieu Armand. Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe. Étude clinique transversale comparative – RIPH 2. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03718095

HAL Id: dumas-03718095

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03718095v1>

Submitted on 8 Jul 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Effets d'un traumatisme Crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliqués lors de la navigation en environnement complexe

Etude clinique transversale comparative – RIPH 2

Master 2 APA-S Parcours APPCM

Approche pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices

Présenté par : Matthieu ARMAND
Sous la direction de : Anne-Hélène Olivier, HDR, MCU
Bradford McFadyen, PhD
Année universitaire : 2021 - 2022

V2.04

04/05/2022

Remerciements

Avant de vous laisser prendre note de ce document, je souhaitais pouvoir adresser quelques remerciements, sincères et profonds, et tout spécialement à ces personnes qui m'ont permis de présenter ce document, et sans qui cela aurait été impossible.

Tout d'abord, Anne-Helene, les mots sont peu de choses pour te remercier à ta juste valeur, à hauteur de l'importance que tu as pu avoir, dans l'accompagnement et la conduite de ce projet, dans les leçons que j'ai pu prendre, dans les échanges que l'on a eu, et dans les rencontres que tu m'as permises tout au long de cette année. Mes collègues me disent souvent que je suis soit fou soit courageux de m'aventurer dans autant de projets, et je pense que cette phrase te conviendrait bien concernant ta décision de m'avoir suivi durant toute une année sur ce projet. Ta bienveillance, ta disponibilité, ta science m'ont permis d'entreprendre ce projet et m'ont aussi permis d'ouvrir les yeux sur bien des domaines. Merci mille fois !! (PS : je garde bien en tête la théorie de la porte entre-ouverte...)

Brad, comment te remercier pour toute cette expérience que tu as accepté de partager avec moi. J'ai tellement de questions à te poser, trop de choses à apprendre de toi encore et trop peu de temps... Le temps, il est passé trop vite lors de ta venue à mon goût, c'est une évidence ! Je tenais vraiment à te remercier pour tout ce que tu m'as appris pendant cette année, à travers nos échanges et nos entrevues. Mais j'ai ma petite idée sur le sujet. Tant que le serveur est complice de ma rapidité... A charge de revanche comme on dit... 😊

Emilie, merci encore d'avoir accepté cette folie ! Ton regard clinique, ton expertise médicale, ta disponibilité, notre collaboration m'ont apporté beaucoup de confiance, de sécurité et de sérénité ; j'attends avec impatience de pouvoir discuter de tout ça avec toi mais ailleurs qu'autour d'un transfert... 😊

Pierre, mais comment fais-tu pour lire les lignes de langage Python avec autant de facilités ? Je te jalouse mais je te remercie ; sans toi, ces expérimentations n'auraient pas été envisageables et certainement pas aussi faciles. Hâte de pouvoir partager d'autres instants et de poursuivre ce beau projet à tes côtés. Merci pour tout !

Romain, « mais que diable allait il faire dans cette galère », « dans quel étagère », en tout cas, je comprend mieux la coupe de cheveu (sans x)... 😊 Je te dois un retour, d'ailleurs je te le renverrais bien, l'a-ppareil bien sûr ! Merci à toi.

A mes collègues, à l'IFPEK, qui n'ont pas eu trop le choix,

A ma famille, mes diamants, ma source intarissable, mes soutiens dans l'ombre,

A toutes les victimes de lésions neurologiques,

A ceux qui ne sont plus mais à qui je pense chaque jour, pour tout ce qu'ils ont cru, ce qu'ils ont permis, m'ont permis et légué en moi, et à jamais,

« La résilience, c'est l'art de naviguer dans les torrents. »

Boris Cyrulnik

Table des matières

Liste des abréviations	1
Introduction	2
1. Revue de littérature	4
1.1. Histoire naturelle du traumatisme cranio-cérébral	4
1.1.1. Données épidémiologiques	4
1.1.2. Impacts des séquelles de lésions cranio-cérébrales sur la participation.....	5
1.2. Impacts lésionnels sur les fonctions	7
1.2.1. Motricité, équilibre et locomotion.....	7
1.2.2. Désordres locomoteurs apparents.....	9
1.2.3. Aspects perceptifs	12
1.2.4. Aspects cognitifs	14
1.3. Lésions cérébrales et navigation en environnements complexes	16
1.3.1. Tâche de navigation	16
1.3.2. Interaction évitement/collision.....	22
2. Synthèse et objectifs	25
2.1. Problématique.....	25
2.2. Question de recherche	25
2.3. Objectifs et Hypothèses	25
3. Méthodologie	27
3.1. Recherche envisagée et design expérimental	27
3.1.1. Description de la méthodologie de recherche envisagée.....	27
3.1.2. Protocole expérimental.....	27
3.1.2.1. Tâche.....	29
3.1.2.2. Matériel et environnements.....	29
3.1.2.3. Design	32

3.1.2.4.	Analyse Statistique.....	35
3.1.2.5.	Variables mesurées et facteurs retenus	36
3.2.	Populations	38
3.2.1.	Description de la population	38
3.2.2.	Critères inclusions	38
3.2.3.	Méthode de recrutement et recueil de consentement	40
3.2.4.	Suivi	41
4.	Résultats.....	42
5.	Discussion.....	44
	Conclusion.....	51
	Bibliographie.....	53
	Références tableaux et figures.....	78
	Annexe 1 : Lettre information patient	80
	Annexe 2 : Recueil de consentement	96
	Annexe 2 Bis : Droit à l'image.....	97
	Annexe 3 : Echelle HIMAT	98
	Annexe 3 Bis : Echelle HIMAT (suite).....	99
	Annexe 4 : Echelle ICARS.....	100
	Annexe 4 Bis : Echelle ICARS (suite)	101
	Annexe 4 Ter : Echelle ICARS (Suite)	102
	Annexe 4 quater : Echelle ICARS (suite)	103
	Annexe 4 quinquies : Echelle ICARS (Suite)	103
	Annexe 4 sexies : Echelle ICARS (suite).....	105
	Annexe 5 : Echelle d'équilibre de Berg BBS.....	106
	Annexe 6 : Evaluation 10 Meter-Walk-Test	107
	Annexe 7 : Evaluation Time-Up-And-Go Test.....	108

Annexe 8 : Echelle ABC-Scale	109
Annexe 9 : Echelle MoCA, Montréal Cognitive Assessment	110
Annexe 10 : Wayfinding Questionnaire	111
Annexe 10 Bis : Wayfinding Questionnaire (Suite).....	112
Annexe 11 : Echelle NSI.....	112
Annexe 12 : Echelle SSQ	114
Annexe 12 bis : Echelle SSQ (Suite)	115
Résumé :	116
Abstract :	116

Liste des abréviations

- ABC-Scale : Activities-specific Balance Confidence Scale**
- ANSM : Agence Nationale de la Sécurité du Médicament et des produits de santé**
- APT : Amnésie Post-Traumatique**
- ARS : Agence Régionale de Santé**
- BBS : Berg Balance Scale**
- C : Contrôle**
- CIRRIS : Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale**
- CNIL: Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés**
- CPP: Comité de Protection des Personnes**
- HIMAT: High-level Motor Assessment Tool**
- HMD : Head Mounted Display**
- ICARS : International Cooperative Ataxia Rating Scale**
- MOCA : MOntréal Cognitive Assessment**
- MR : Méthodologie de Recherche**
- M2S : Mouvement, Sport, Santé**
- NSI : Neurobehavioral Symptom Inventory**
- RIPH : Recherche Impliquant la Personne Humaine**
- RV : Réalité Virtuelle**
- SSQ: Simulator Sickness Questionnaire**
- TCC : Traumatisme Cranio-cérébral**
- TUG-Test : Time-Up and Go Test**
- WQ : Wayfinding Questionnaire**
- 10MWT : 10-Meter-Walk Test**

Introduction

Troisième cause de mortalité et de handicap, le traumatisme crânio-cérébral (TCC) affectait plus de 65 millions de personnes à travers le monde en 2015 (Haarbauer-Krupa et al., 2021). Des séquelles de ce traumatisme persisteraient à long terme et on estime à 340 000 le nombre de personnes impactées en France (Jourdan et al., 2018). Les conséquences sont majeures sur l'indépendance, la qualité de vie et le devenir des individus porteurs de lésions à plus ou moins long terme, impactant toutes les dimensions de participation, relationnelle, familiale, sociale mais également professionnelle (Gormley et al., 2019; K. Mani et al., 2017).

Fonctions sensibles, locomotrices, visuelles et cognitives peuvent être affectées, avec des séquelles allant parfois jusqu'à plusieurs années après l'épisode traumatique (Andelic et al., 2016; Jourdan et al., 2018; Walker & Pickett, 2007). Ces séquelles ont un impact sur les interactions de ces individus en environnement peuplé (Kersey et al., 2020; McFadyen et al., 2009). Il semblerait que les individus symptomatiques soient effectivement en grande difficulté lors de situations d'interaction dans des environnements où la réactivité et l'adaptabilité s'additionnant à la contrainte physique et aux troubles sensitivo-moteurs mettraient à mal les capacités attentionnelles et provoqueraient certainement des réponses comportementales inadaptées voire même dans certains cas un retrait de toute forme d'interaction sociale (Emmah Doig, 2001; Vallée et al., 2006). Cependant, des manques de preuves sont visiblement palpables à ce jour si l'on désire améliorer la compréhension des difficultés de la personne porteuse de troubles chroniques consécutifs à cet épisode traumatique à se déplacer dans un environnement du quotidien (McFadyen et al., 2017), à l'image d'une rue dans laquelle sont présents d'autres piétons.

La présente étude vise à déterminer en quoi les troubles séquellaires impacteraient les capacités de navigation des personnes présentant des séquelles modérées ou sévères de lésion crânio-cérébrale. Dans un premier temps, la revue de littérature nous permettra de présenter les grandes définitions et caractéristiques du traumatisme crânien ainsi que les symptômes persistants, en particulier au niveau moteur, cognitif et perceptuel. Nous présenterons également les études investiguant la navigation en interaction avec un environnement, avec un focus sur les interactions entre piétons. Après avoir présenté les objectifs de ce travail en regard des éléments de la littérature, nous proposerons notre méthodologie qui se base sur l'utilisation de la réalité virtuelle afin d'immerger des personnes TCC en phase chronique dans un environnement virtuel et les faire interagir avec des humains virtuels dans une tâche de

navigation. L'objectif spécifique de ce stage vise à rédiger le dossier CPP RIPH 2 en vue de conduire les expérimentations à la rentrée prochaine. Ainsi: « **Quel est l'impact de la lésion cérébrale d'origine traumatique, de gravité modérée à sévère, sur les comportements visuo-locomoteurs en interaction avec des piétons ?** »

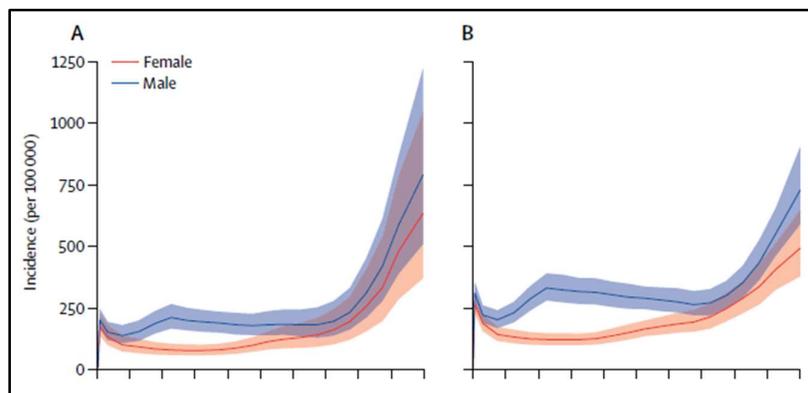
1. Revue de littérature

L'objet de cette première partie est d'identifier les éléments prévalents de la problématique du sujet présentant des séquelles d'une lésion cranio-cérébrale provoquée par le traumatisme ; des données chiffrées récentes épidémiologiques justifiant l'intervention dans ce domaine de santé feront place rapidement aux éléments physiopathologiques, moteur, locomoteur, cognitif et perceptif ; cela constitue une approche thématifiée et certainement incomplète de ce que cette population peut avoir à surmonter dans leur quotidien.

1.1. Histoire naturelle du traumatisme cranio-cérébral

1.1.1. Données épidémiologiques

Figure 1 - Incidence par tranche d'âge; TCC léger figure A, TCC modéré/sévère figure B (GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators, The Lancet, 2019)



Troisième cause de mortalité et d'invalidité dans le monde en 2020 selon l'OMS, près de 69 millions d'individus à travers le monde en 2015 sont porteuses de lésion cérébrale d'origine traumatique (Dewan et al., 2018; Haarbauer-Krupa et al., 2021), les principales causes étant les accidents de la route et les chutes (Brazinova et al., 2021; Tagliaferri et al., 2006). Cela représente un taux d'incidence moyen en France de 164.9 (Géodes - Santé publique France - Indicateurs : cartes, données et graphiques, s. d.).

Touchant toutes les tranches d'âge (cf figure 1) (GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators, 2019), aussi bien les hommes que les femmes (Faul et al., 2010), cette population représenterait près de 150000 personnes hospitalisées en France chaque année, dont 30 000 souffriraient de séquelles graves (Mathé et al., 2005) ; plus largement, une prévalence de 704.2, énoncée dans une enquête datant de 2018 (Jourdan et al., 2018), estimerait

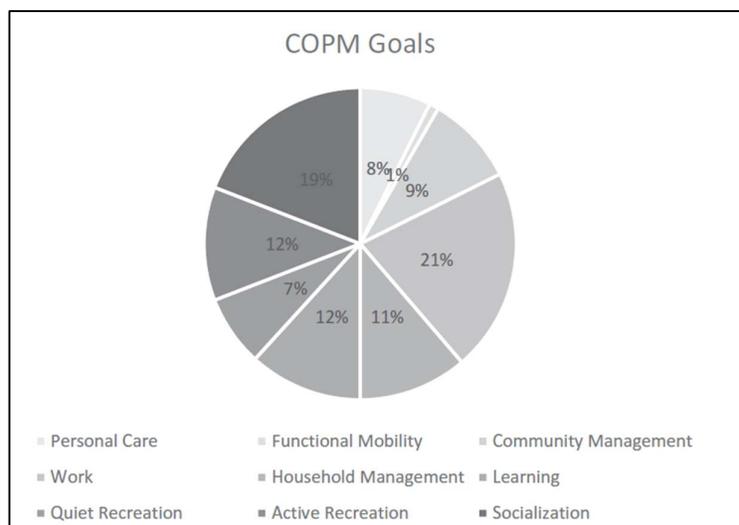
le nombre de personnes porteuses de séquelles de lésion cérébrale proche des 340 000 en France ; enfin, une grande majorité d'entre elles vive à leur domicile (Jourdan et al., 2018; Kersey et al., 2020), et présenterait de fortes limitations dans leurs activités ou participation ainsi qu'un risque non négligeable de récurrence ou de survenue de pathologies neurologiques dégénératives (Gardner & Yaffe, 2015; Mckee & Daneshvar, 2015).

1.1.2. Impacts des séquelles de lésions cranio-cérébrales sur la participation

Plus de la moitié de cette population présenterait une incapacité permanente, des difficultés dans l'organisation de certaines activités (Azouvi et al., 2017), avec de forts besoins en matière de santé à tous les niveaux (Jourdan et al., 2018; Peeters et al., 2015). Au-delà des déficits provoqués par la lésion initiale, altération de la conscience ou des capacités cognitives, amnésie post-traumatique, et de multiples désordres neurologiques (Mckee & Daneshvar, 2015), les personnes porteuses d'un traumatisme crânien de gravité modérée et sévère garderaient des signes cliniques à un an (Katz et al., 2009), pour un tiers d'entre eux à plus de deux ans (Walker & Pickett, 2007), mais aussi à plus de dix ans après l'évènement traumatique (Jourdan et al., 2018).

Cette persistance des désordres, qu'il soient moteurs (Andelic et al., 2012; Benedictus et al., 2010; Krauss et al., 1997), cognitifs (Andelic et al., 2012; Benedictus et al., 2010; K. Mani et al., 2017; Novakovic-Agopian et al., 2019; Rabinowitz & Levin, 2014) ou bien comportementaux (Benedictus et al., 2010), aurait un impact conséquent dans des perspectives de retour au travail (van Velzen et al., 2009); une minorité de cette population retrouverait une activité professionnelle (Colantonio et al., 2004), dans les deux premières années suivant la

Figure 2 - Répartition des objectifs dans le domaine communautaire (Kersey et al, 2020)



lésion (Andelic et al., 2012; Saltychev et al., 2013; Scaratti et al., 2017) ; et même après 5 ans, seul un tiers d'entre eux récupérerait le niveau d'activité professionnel et le poste occupé avant l'épisode traumatique (Gormley et al., 2019).

L'indépendance et la participation sociale sont des objectifs majeurs des personnes présentant des séquelles à long terme (Cicerone, 2004; Kersey et al., 2020; Truelle et al., 2010). Tous les aspects de la vie communautaire, devenir professionnel, émancipation, intégration mais surtout participation sociale (cf figure 2), sont impactés par la présence de séquelles de lésion cranio-cérébrale, notamment troubles cognitifs et dépressifs (cf figure 3) (Andelic et al., 2014; Kersey et al., 2020) et influencés par la sévérité des symptômes à un an, deux ans, et 5 ans post-lésion (Andelic et al., 2016).

Figure 3 - Relation entre domaines de participation communautaire et facteurs associés (Kersey et al, 2020)

Domain	Cognition	Depression	Environment	Social Support	Enfranchisement
Social	0.02	-.43**	-.051**	.47**	-.38**
Community	-0.03	-.51**	-.051**	.26*	-.42**
Productivity	-0.3	-.37**	-.045**	.27*	-.24

*p < 0.05
**p < 0.01.

Un plus haut niveau de participation et une meilleure qualité de vie (cf figure 4) seraient facilitées et déterminées par une plus grande capacité de mobilité (G. Williams & Willmott, 2012) et de locomotion (Katz et al., 2004; McFadyen et al., 2009) de ces personnes; seulement, une faible partie d'entre elles ne semble pas avoir récupéré une indépendance fonctionnelle suffisante à distance de cette lésion (Maiden et al., 2020).

Figure 4 - Données résumées de la mobilité, de la participation et de la qualité de vie dans un échantillon (n=39) de personnes symptomatiques, de gravité sévère, en phase chronique (Médiane = 9.2 mois) (Williams et Willmott, 2012)

	Mean (SD)	Range
Gait speed (m s ⁻¹)	0.97 (0.38)	0.05–1.42
HiMAT	20.3 (13.3)	1–45
CIQ	12.8 (6.2)	7–20.75
BICRO-39	62.7 (23.2)	24–124
WHOQoL-BREF (Physical Health)	50.8 (13.3)	25–75
AQoL	0.72 (0.22)	0.26–1.00

En effet, comme observée dans l'étude de Williams et Willmott datant de 2012, les personnes porteuses de lésion cérébrales d'origine traumatique présentaient une vitesse de marche en moyenne de 0.97 m/s, un score HiMAT moyen de 20.3, représentant une capacité fonctionnelle significativement réduite par rapport aux données globales et normales d'une population asymptotique ; plus, ces valeurs semblent être fortement corrélées avec les mesures effectuées par des échelles de qualité de vie (type AQoL) et de participation (type BICRO-39) (G. Williams & Willmott, 2012).

En définitive, non seulement les lésions provoquées par le traumatisme cranio-cérébrale provoquent un arrêt dans le continuum de la vie de l'individu victime de cet épisode de façon brutale et profonde, avec de fortes conséquences sur les activités et la participation, mais ces perturbations semblent aussi avoir un impact persistant dans le temps.

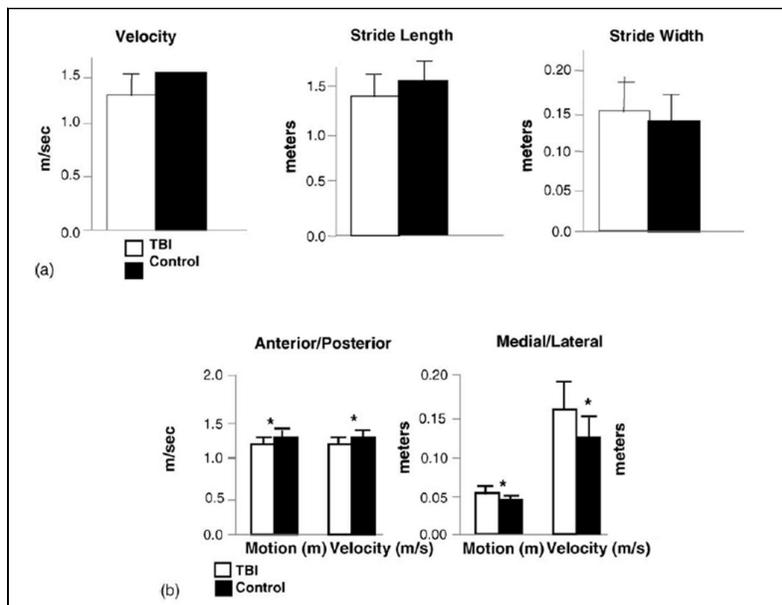
1.2. Impacts lésionnels sur les fonctions

1.2.1. Motricité, équilibre et locomotion

Les personnes porteuses de troubles séquellaires verraient leurs capacités neuromotrices (Krauss et al., 1997; O'Neil-Pirozzi et al., 2018), locomotrices (Fait et al., 2009; G. Williams et al., 2009) et d'équilibre (Basford et al., 2003; Hays et al., 2019; Kaufman et al., 2006; G. Williams et al., 2009) diminuées.

En effet, dans une étude datant de 2006 conduite auprès de 10 personnes présentant des séquelles datant de presque 3 ans, comparativement à un groupe témoin, les paramètres mesurés de la locomotion montraient une diminution significative de la vitesse et de la longueur du pas, une augmentation de la largeur du pas ; l'analyse du mouvement du centre de masse des sujets inclus dans cette étude montrait une diminution significative de la vitesse du mouvement et de son déplacement antéro-postérieur, ainsi qu'une augmentation du déplacement et de la vitesse dans l'axe médio-latéral (cf figure 5) (Kaufman et al., 2006).

Figure 5 - Caractéristiques de marche et d'équilibre entre un échantillon symptomatique (TCC, n=10) et sujets sains (n=10) (Kaufman et al, 2006)



Dans une autre étude datant de 2009, conduite auprès de 41 personnes victimes de lésions craniocérébrales sévères datant d'en moyenne 7 ans, l'analyse des paramètres locomoteurs, cinétiques et cinématiques, mettait en évidence une différence significative sur 12 des 20 paramètres mesurés comparativement à un groupe témoin (G. Williams et al., 2009); il en ressortait des résultats convergents avec les données retrouvées précédemment, et précisément, une diminution significative de la vitesse, de la cadence de marche et de la longueur du pas, une augmentation de la largeur du pas, du temps de double appui et de la phase d'appui (cf Figure 6).

Figure 6- Paramètres spatio-temporels comparatifs mesurés de la marche entre un échantillon de personnes porteuses de lésion craniocérébrale en phase chronique (« TBI » pour TCC, n=41, médiane = 7.1 ans) et un échantillon de personnes contrôles (« HCs » pour Healthy Person Subjects, n= 15) (Williams et al, 2009)

Gait Variable	TBI (n=41)		HCs (n=15)		P
	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range	
Velocity (m/s)	1.07±0.34	0.29-1.83	1.42±0.12	1.15-1.70	<.001
Cadence (strides/min)	49.96±7.16	33.14-65.78	56.15±2.91	50.3-64.3	<.001
Step length (m)	0.62±0.15	0.18-0.86	0.78±0.14	0.68-2.32	<.001
Stance duration (s)	0.77±0.16	0.55-1.28	0.65±0.04	0.53-0.73	<.001
Double support (s)	0.18±0.08	0.10-0.51	0.12±0.02	0.07-0.15	<.001
Base of support (m)	0.24±0.05	0.14-0.35	0.20±0.03	0.11-0.28	.001

Les auteurs s'accordent à conclure que les personnes porteuses de séquelles de lésion craniocérébrales auraient de sérieuses difficultés à la marche, et réduiraient leur vitesse et cadence de marche pour répondre à leur besoin de stabilité, limitant ainsi leur mobilité (McFadyen et al., 2003; G. Williams et al., 2009).

Une étude de 2019 ayant suivi 20 personnes présentant des séquelles de TCC de gravité modérée à sévère (GCS initial moyen = 5.3) a mis en évidence des différences significatives sur la vitesse de marche comparativement à un groupe témoin (Groupe « TBI » Vitesse moyenne =0.96m/s, Groupe « Control » Vitesse moyenne =1.5 m/s) et aux valeurs dites normatives pondérées à l'âge (cf figure 7) (Bohannon, 1997; Klima et al., 2019; Steffen et al., 2002) ; plus, la diminution significative de la vitesse et le temps plus important au TUG-test (cf figure 7) met en lumière les troubles de l'équilibre ainsi que la potentialité du risque de chute

Figure 7 - Valeurs du TUG Test et du 10MWT entre le groupe symptomatique et le groupe contrôle (Klima et al, 2019)

Participant profile	Persons with TBI (n = 20)	Controls (n = 20)	p	Mean difference [95% confidence interval]
	M (SD) [95% confidence interval]	M (SD) [95% confidence interval]		
Gait performance	M (SD)	M (SD)		
Timed up and go test (s)	13.5 (4.9) [11.2, 15.8]	7.7 (1.4) [7.1, 8.4]	<.001*	-8.3, -3.4
10 m walk test (m/s)	.96 (2.6) [.84, 1.1]	1.5 (2.2) [1.4, 1.6]	<.001*	0.37, 0.70

plus important dans cette population, et serait le reflet d'une incapacité de leur maintien ou de leur adaptation posturale (Buster et al., 2016; Klima et al., 2019).

1.2.2. Désordres locomoteurs apparents

Plus d'un tiers des personnes à plus de deux ans de leur épisode traumatique souffrent encore de troubles neuromoteur (Walker & Pickett, 2007). Les troubles de l'équilibre et de la motricité seraient les conséquences physiques les plus représentées et exprimées par cette population à presque 8 ans de la lésion (Ruet et al., 2019). Mais, il serait à noter que la grande variabilité des phénomènes observés (Kozlowski et al., 2013; Swaine & Sullivan, 1996; G. Williams et al., 2010, 2015), se traduisant par une multitude des tableaux cliniques potentiels, rendrait une analyse objective et transversale plus délicate (G. Williams et al., 2010), notamment en phase chronique (Walker & Pickett, 2007).

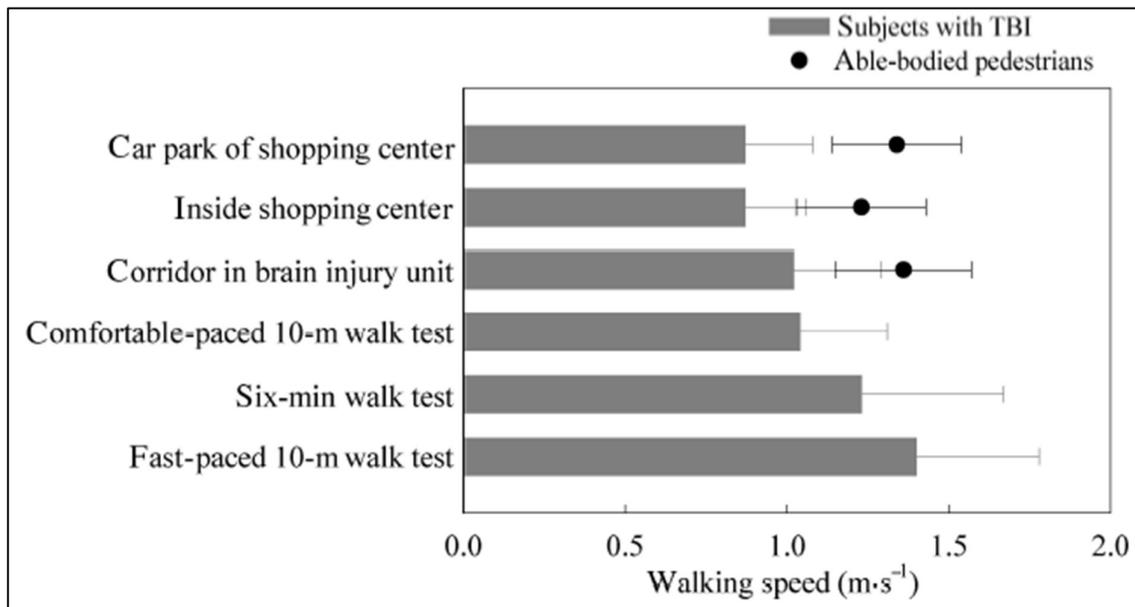
Une grande majorité de cette population retrouverait une fonction motrice efficiente dans les 6 premiers mois post lésionnels; comparativement à d'autres situations pathologiques comme les individus porteurs de séquelles d'accident vasculaire cérébral, les personnes victimes de lésion cérébrale d'origine traumatique auraient un degré de sévérité moindre et de meilleurs perspectives de récupération de la fonction neuromotrice (Iaccarino et al., 2015).

Certains auteurs évoquent cependant une certaine prudence quant à l'analyse des données uniquement basées sur des paramètres cliniques, de la marche par exemple, avant tout par le manque de consensus et de procédures d'évaluation standardisées (Dever et al., 2022; Fino et al., 2018), mais aussi parce que ne reflétant pas exactement toute la complexité de la tâche locomotrice, notamment dans ses dimensions « écologiques » (McFadyen et al., 2009, 2017).

Une étude datant de 2004 a mis en évidence une valeur de vitesse de marche maximale moyenne dans une population atteinte sévèrement (n=10, Age moyen = 39.1 ans, durée d'APT moyenne = 26.6 Jours), en phase chronique (délai moyen post-lésion = 56.4 jours), évaluée en condition clinique par le 10MWT, étant d'une valeur moyenne de 1,4 m/s alors qu'en situation écologique elle a été mesurée à 0,87 m/s (cf figure 8) (Moseley et al., 2004). Cela pose nécessairement la question d'une possible sous-estimation des capacités locomotrices et des troubles portés par cette population, lorsqu'évaluée, en situation de laboratoire par exemple,

par des tests de marche simple en ligne droite, ne reflétant que peu leur aptitude à naviguer dans des environnements dits « écologiques », obstrués ou peuplés, rencontrés au quotidien.

Figure 8 - Moyenne et déviation standard des vitesses de marche effectuées lors des tests cliniques et des évaluations "écologiques" entre de sujets symptomatiques et population Témoin (Moseley et al, 2014)



Et, même si des désordres sont observés dans certains paramètres de marche (Dever et al., 2022; Fait et al., 2009; Klima et al., 2019; G. Williams et al., 2009), ou bien par certains troubles moteurs (Iaccarino et al., 2015; Kozlowski et al., 2013; Krauss, 2015; Krauss et al., 1996), troubles d'ailleurs persistants même à distance de la lésion (Gagné et al., 2021; Heitger et al., 2006; Krauss et al., 1997; Vallée et al., 2006; Walker & Pickett, 2007), les personnes porteuses de lésions cérébrales présenteraient plus de difficultés à l'élaboration de tâches locomotrices plus complexes, comme courir, monter, descendre les escaliers ou changer de direction (Fino et al., 2018; Swaine & Sullivan, 1996; G. Williams et al., 2013).

Une revue systématique de la littérature traitant de l'évaluation de la tâche locomotrice chez la personne présentant une lésion cérébrale d'origine traumatique évoque l'existence, dans cette population, de troubles anormaux lors d'une tâche simple de marche, en phase précoce, d'une lacune dans l'équilibre et son contrôle lors d'une situation de double-tâche, des désordres locomoteurs et des difficultés de navigation lors de tâches locomotrices complexes et spécifiques ; en effet, 95% (18/19) des études incluses dans cette revue systématique mettaient en évidence des désordres locomoteurs lors de la double-tâche ou de la marche dite complexe,

alors que 4 d'entre elles montraient l'existence de troubles discrets ou modérés de la marche simple, qui se résoudraient en grande majorité avec le temps. Plus, une majorité d'études citées, utilisant la marche simple comme évaluation de la fonction locomotrice, ne montraient pas de différence significative, entre personnes atteintes et groupe témoin, sur le seul paramètre « vitesse de marche » en dehors de la période subaigüe. (Fino et al., 2018).

Dans une autre étude datant de 2009, McFadyen a pu mettre en évidence chez des individus porteurs d'une lésion cranio cérébrale initialement sévère (n=11, Age moyen = 38 ans, GCS initial moyen de 5, durée d'APT moyenne = 16 jours) datant de moins de 3 mois, une vitesse de marche moyenne de 1.52 m/s ; après analyse des données, et comparativement à un groupe témoin, les personnes présentant des séquelles de TCC ne présentaient pas de différence significative sur le paramètre vitesse de marche lors de situation de marche non obstruée ; ceci-dit, la variabilité de la vitesse semblait diminuer lors de situation de marche obstruée spécifiquement chez les personnes symptomatiques, observations majorées lorsque ces personnes étaient en situation de double-tâche. Basé uniquement sur des paramètres spatio-temporels classiques, les sujets du groupe TCC présenteraient une bonne récupération de la fonction locomotrice, mais seraient également un indicateur de situations à risques, avant tout par un manque de phénomènes attentionnels (McFadyen et al., 2009).

Dans une étude datant de 2006, conduite auprès de 9 sujets (Age Moyen = 39.3 Ans) porteurs de séquelles (délai moyen post-lésion = 5.7 mois) de lésion cranio-cérébrale sévère (GCS initial moyen = 7.8), cette population montrait une relative et bonne récupération de leur fonction locomotrice ainsi qu'une vitesse de marche proche de la norme ($V_{moy} = 1.40$ m/s) comparativement à un échantillon asymptomatique, même si cette vitesse était plus faible ; toutefois, cette observation, valable lors de l'évaluation par une tâche simple de marche en ligne droite et non-obstruée, ne l'était plus lorsque la tâche effectuée devenait plus complexe et nécessitait d'enjamber un obstacle situé sur la trajectoire ; en effet, lors de cet enjambement, la population porteuse de séquelles présentait une diminution significative de la vitesse de marche, de la longueur du pas ainsi que de la distance les séparant de l'objet, comparativement avec le groupe témoin. Plus, ces observations étaient plus marquées lorsqu'une double-tâche verbale ou visuelle était additionnée à l'expérimentation. Plusieurs choses ressortent de cette étude, d'une part les difficultés de cette population dans une situation nécessitant l'utilisation de capacités attentionnelles plus apparentes et sollicitées, mais surtout que les personnes porteuses de séquelles de lésions cranio-cérébrales présenteraient des difficultés plus marquées lors de la

réalisation de tâches locomotrices complexes que lors de tâches simples de marche (Vallée et al., 2006).

Malgré une apparente et bonne récupération des capacités locomotrices (McFadyen et al., 2009; Vallée et al., 2006), d'équilibre (Kaufman et al., 2006) ou d'indépendance fonctionnelle (Katz et al., 2004; Klima et al., 2019; Labi et al., 2003; Shukla et al., 2011) des sujets victimes de traumatisme crânien, des restrictions persistantes sont encore apparentes et ne semblent pas expliquer les raisons pour lesquelles les personnes porteuses de troubles séquellaires présentent des difficultés à évoluer dans des environnements du quotidien.

1.2.3. Aspects perceptifs

Rappelons que les comportements adoptés dans un environnement sont liés aux éléments perçus (Gibson, 1979). Et bien que des paramètres locomoteurs impactés lors de séquelles de lésion cranio-cérébrale soient déficitaires, la fonction visuelle et oculomotrice fait également défaut dans cette population ; saccades, durée de fixation ou bien même poursuite visuelle (cf figure 9) semblent être déficitaires à la suite d'une lésion cérébrale d'origine traumatique (Cifu et al., 2015; Ciuffreda, 2002; Ciuffreda et al., 2011; Hunt et al., 2016; Stuart et al., 2020) ; près de 90% des personnes porteurs de ces lésions souffriraient de ces troubles (Ciuffreda et al., 2007).

Une étude datant de 2006, conduite auprès de 26 personnes porteuses de légers troubles (GCS initial 13-15) en situation aiguë (n=6, Age Moyen =34.17 ans, Délai moyen Post-lésion = 14 jours) et chronique (n=20, Age moyen = 38 ans, délai moyen post-lésion = 2 ans) a permis de mettre en évidence une augmentation significative du nombre d'erreurs de ciblage ainsi qu'une plus grande variabilité intra-individuelle de ce paramètre comparativement à un groupe témoin (Suh et al., 2006). Dans une étude datant de 2021 incluant 67 personnes (Age moyen = 32,8 ans) présentant des séquelles de lésion (délai post-lésion = 43 jours), les participants effectuaient une tâche fonctionnel de marche simple, plongés dans un environnement virtuel par l'intermédiaire d'un casque de réalité virtuelle équipé d'un système d'analyse de l'activité visuomotrice (Eye-Tracking) ; les résultats montrent que les personnes inclus dans le groupe TCC présentent des déficits de la fonction visuelle comparativement à la population asymptomatique (Lirani-Silva et al., 2021). Dans une revue systématique de la littérature et méta-analyse portant sur les déficiences visuelles et troubles associés spécifiquement chez des personnes porteurs de lésions cranio-cérébrales d'origine traumatique est évoqué une perte

significative du champ visuel, avec une forte prévalence notamment dans le cadre de lésion de gravité modéré/sévère (Merezhinskaya et al., 2019).

Figure 9 - Fonctions visuelles et oculomotrices : Description, évaluation et exemple (Hunt et al., 2016)

Visual function	Description	Methods of assessment in mTBI	Functional example
Accommodation	Ability to sustain or change focus on an object by adjusting the focal length of the lens using ciliary muscle control	Optometrist	Shifting from reading a book to reading on a computer screen
Fixation	Ability to steadily and accurately gaze at a single object	Eye tracker Optometrist	Gazing at a detail on a photograph
Pursuit	Conjugate eye movements to smoothly and accurately track a moving object	Eye tracker Optometrist	Following your child play in a hockey or soccer game
Saccades	Rapid eye movements that enable quick and accurate to scanning from one object to another	Eye tracker Saccadometer Optometrist King-Devick test	Looking out the window while driving; looking in the refrigerator for the milk
Vergence	Ability to accurately aim eyes in opposite horizontal directions to follow an object as it moves toward (convergence) and away (divergence) from oneself	Optometrist	Watching people walk toward or away from you; following a ball that is thrown to you in order to catch it

Ces troubles visuels semblent eux aussi se perpétuer dans le temps ; une étude évaluant 60 personnes (AgeMoy = 23.2 ans) présentant des séquelles de lésion cranio-cérébrale (délai moyen post-lésion = 8.5 mois), a mis en évidence des différences significatives comparativement à une population asymptomatique sur des paramètres oculo-moteurs, observant dans la population lésée une plus grande erreur de position, une diminution de l'amplitude, de la vitesse et du pic d'accélération des saccades, ainsi qu'une fixation plus grande lors de la poursuite oculaire (Cifu et al., 2015). Le traumatisme cérébral serait à l'origine d'une persistance de ces déficits à distance de la lésion initiale, à un an dans des populations légèrement atteintes (Heitger et al., 2006), après cinq ans dans des populations de gravité légère à modérée (Kraus et al., 2007; Ozolins et al., 2016) allant parfois même jusqu'à des années dans des populations plus sévèrement touchées (R. Mani et al., 2018; Merezhinskaya et al., 2019).

L'étude du marqueur « perception-action » (Gibson, 1979) semblerait être incontournable dans l'analyse des comportements à risque à la suite de lésions cérébrales d'origine traumatique (Eagle et al., 2021; McFadyen et al., 2009). Des déficits de coordinations visuo-locomotrices associés à une attention visuelle diminuée seraient corrélés à la sévérité des symptômes des patients porteurs de lésions traumatiques (Benassi et al., 2021) ; dans cette étude, 11 personnes (Age Moyen = 22.8 ans) atteintes de séquelles dites légères (délai moyen post-lésion = 148

jours) présentent des difficultés dans l'intégration visuo-motrice mais aussi de leurs capacités motrices fines, difficultés concomitantes avec des troubles de l'attention visuo-spatiale et de la reconnaissance.

Au regard des connaissances actuelles, aucun lien n'a pu être établi entre les troubles de fonctions visuelles ou visuomotrices et désordres locomoteurs observés dans des environnements complexes où la perception reste un élément essentiel pour la prise d'information et l'adaptation des stratégies locomotrices. Nul ne sait si les difficultés présentes spécifiquement dans une population séquellaire est le fruit des désordres visuels, de l'intégration de l'information, de la coordination visuo-locomotrice ou de la réponse locomotrice.

1.2.4. Aspects cognitifs

S'additionnant aux troubles moteurs, locomoteurs, perceptifs en situation complexe, plus encore que les stratégies perceptuo-locomotrices lors de tâches de navigation, l'atteinte des fonctions exécutives et cognitives serait une cause majeure de l'incapacité de cette population ; en effet, une atteinte des fonctions exécutives et cognitives, pour une population dont la sévérité serait modérée ou sévère, serait pour 43 % des cas la cause majeure de leur incapacité, responsable de problématiques persistantes dans le temps (Rabinowitz & Levin, 2014). Les conséquences de la lésion sur les fonctions cognitives seraient durables (Belanger et al., 2005; Whiteneck et al., 2004) et responsables de multiples restrictions de participation (Ruff et al., 1993). Tous les processus seraient potentiellement impactés (cf figure 10) (Belanger et al., 2005).

Figure 10 - Effet-taille des domaines cognitifs impactés selon le délai post-lésion (Belanger et al, 2005)

Time since injury	<90 Days			≥90 Days		
	<i>d</i>	(<i>k</i>)	<i>Q</i>	<i>d</i>	(<i>k</i>)	<i>Q</i>
Global	.29*	(4)	66.1*	.20*	(4)	60.6*
Attention	.53*	(21)	1244.5*	.32*	(17)	834.6*
Executive Functions	.21*	(7)	47.8*	.15*	(13)	476.8*
Fluency	.81*	(7)	36.4*	.71*	(5)	8.5
Memory Acquisition	.37*	(13)	488.5*	.23*	(12)	473.4*
Delayed Memory	.96*	(10)	464.4*	.40*	(9)	169.3*
Language	.64*	(7)	46.6*	.20	(3)	.1
Visuospatial Skill	.48*	(6)	97.4*	.73*	(4)	21.5*

Après 6 à 12 mois de la lésion initiale, une aggravation de la désorientation ainsi que de l'attention/vigilance est observable chez les personnes symptomatiques (Lippert-Grüner et al., 2006). Le temps de réaction, plus long chez la personne porteuse de séquelles de lésion craniocérébrale comparativement à une population asymptomatique (Armstrong, 2018; Piponnier et al., 2016), serait également impacté lors d'une lésion cranio-cérébrale à deux mois du traumatisme (McFadyen et al., 2009). La vitesse de traitement de l'information serait encore diminuée à plus de deux ans de l'épisode traumatique (Dymowski et al., 2015; Finley et al., 2021; Mathias & Wheaton, 2007; Schretlen & Shapiro, 2003).

Pour autant qu'elles soient préservées, les ressources disponibles, capacités locomotrices et attentionnelles, seraient partagées, entreraient même en « compétition » entre différents processus, entre deux tâches effectuées simultanément, ressources alors distribuées ou priorisées selon le niveau de difficulté des tâches en question (Cullen et al., 2018; Schaefer, 2014). Un des mécanismes responsables de la diminution de performance locomotrice serait la diminution de la capacité attentionnelle (Deblock-Bellamy et al., 2021; Yogev-Seligmann et al., 2008).

Pour exemple, Cantin a mis en évidence dans son étude que les sujets porteurs de lésion traumatique et présentant des troubles des fonctions exécutives adopteraient une vitesse de marche plus lente que des individus sains, afin de s'adapter au mieux aux contraintes d'un environnement dit complexe, notamment dans l'activité d'enjambement d'obstacles (Cantin et al., 2007). Vallée a montré que les personnes symptomatiques, malgré une apparente bonne récupération, avaient des déficits résiduels à la fois sur les performances cognitives et locomotrices, notamment dans des environnements nécessitant une forme d'adaptation et donc une demande attentionnelle plus forte (Vallée et al., 2006). Fait, dans l'étude évoqué précédemment, a montré, au-delà d'avoir montré la persistance de troubles locomoteurs dans une tâche de navigation à travers la diminution de la distance de croisement ou de la vitesse de marche, qu'il persistait également des difficultés liées aux phénomènes attentionnels (Fait et al., 2009).

Enfin, les trajets effectués par des personnes porteuses de troubles cognitifs seraient très fortement limités, et pour les seuls qui seraient effectués, resteraient routiniers et même assistés (Sohlberg et al., 2005). Cela montre les lacunes que le sujet porteur de lésion pourrait potentiellement avoir dans des compétences d'adaptation et de modification dans un environnement ou espace complexe. Fonction cognitive, exécutive et aptitudes locomotrices

sont liées (Anderson et al., 2013); le comportement locomoteur serait une manifestation physique externe de processus exécutifs et cognitifs, par leur caractère indissociable et dictés par des contraintes environnementales (McFadyen et al., 2017). Même, effectué sans obstacle et quel que soit la surface utilisée, le contrôle et la programmation de la marche n'impliquent qu'une demande cognitive très relative (Clark, 2015).

Cependant, à l'heure actuelle, aucune étude n'a permis de faire réellement la lumière sur les causes des difficultés de navigation, en environnement simulé, spécifiquement dans la population porteurs de lésions cranio-cérébrales en phase séquellaire, et du lien potentiel entre comportements locomoteurs et sévérité de la lésion. Aucune étude n'a permis à ce jour d'envisager l'évaluation des capacités locomotrices en environnement proche du réel, permettant de mieux comprendre l'impact fonctionnel des déficiences locomotrices et des séquelles, en fonction du degré de sévérité, à la suite d'une lésion cranio-cérébrale d'origine traumatique (Dever et al., 2022).

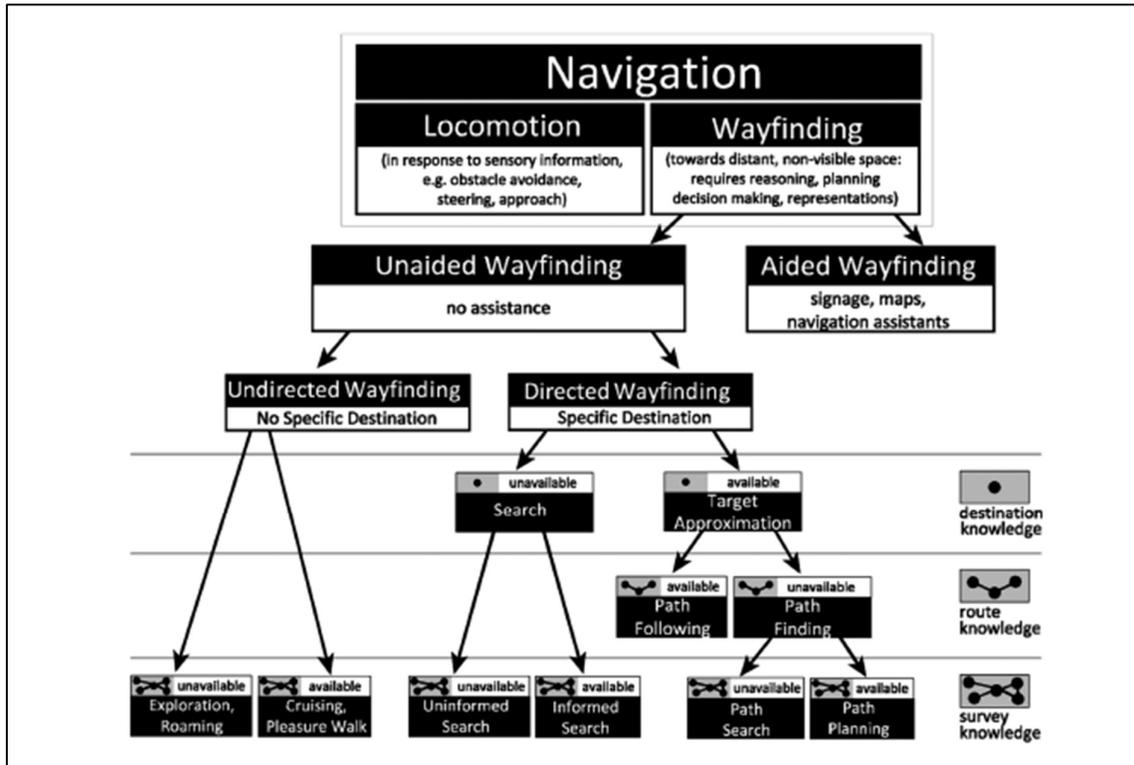
1.3. Lésions cérébrales et navigation en environnements complexes

Désordres moteurs, visuels, cognitifs, locomoteurs ont des conséquences sur la participation du sujet présentant des séquelles de lésion cranio-cérébrale d'origine traumatique. La préservation des capacités locomotrices est fondamentale afin de maintenir l'autonomie de l'individu et limiter les effets du handicap ou toute situation de restriction dans la participation, qu'elle soit professionnelle, sociale ou familiale. Pour ces raisons, naviguer dans un environnement est un enjeu majeur pour cette population.

1.3.1. Tâche de navigation

Globalement, la navigation, en se déplaçant par la marche d'un point à l'autre dans un environnement (Perry, 1992), joue un rôle important dans le maintien de l'indépendance (cf figure 12) (Sohlberg et al., 2005). Naviguer ferait appel à deux dimensions qui sont « être orienté » et « s'orienter » ; la définition de la navigation faite par Montello en 2005 englobe des dimensions fonctionnelles de représentation spatiale et de capacité dynamique d'orientation, incluant des composantes locomotrices sensorielles et kinesthésiques et de « Wayfinding » basé sur des processus exécutifs de décision, de planification, d'orientation, et de représentation spatiale (cf figure 11) (Montello, 2005; Wiener et al., 2009).

Figure 11 - Proposition taxonomique de la navigation, classée en fonction du niveau de connaissances, de l'existence de ressources et de la destination (Selon Wiener et al, 2009)



L'activité résulterait de l'interaction entre individu, tâche et environnement ; en ceci, le comportement locomoteur adopté lors de tâches de navigation serait alors le produit de ces trois domaines. Plus, le comportement locomoteur serait une manifestation physique de processus internes, exécutifs et cognitifs, un ensemble indissociable et interagissant selon les contraintes imposées par l'environnement (McFadyen et al., 2017; Shumway-Cook & Woollacott, 2016).

Naviguer dans un environnement requiert des capacités d'orientation dans l'espace, de perception des distances, de recherche de trajet optimal, de représentation mentale du trajet et de repérage dans l'espace (Claessen & van der Ham, 2017; Wolbers & Hegarty, 2010). Cela nécessite plusieurs facultés cognitives comme des capacités de mémorisation ou bien exécutives comme la planification (Spiers & Maguire, 2008; Wolbers & Hegarty, 2010). Selon Patla, les trajets empruntés dépend de l'information visuelle prise sur les objets de l'environnement potentiellement à éviter (Patla, Davies, et al., 2004). Dans la perspective de parvenir à contourner et éviter des obstacles en maintenant ciblé l'objectif du trajet, la perception de l'espace et des objets le composant est fondamental ; la sélection et la

planification des trajectoires les plus efficaces font parties des éléments-clés pour le marcheur ayant l'intention de parvenir à son but (B. Fajen, 2013; B. R. Fajen & Warren, 2003; Patla, Tomescu, et al., 2004). L'adaptation du trajet envisagé par le marcheur dans un espace complexe et encombré résulterait d'un contrôle dit « On-Line », d'une régulation constante dans l'objectif de négocier et d'envisager le meilleur trajet défini à un instant précis (Marigold & Patla, 2007). Plus, le choix du trajet est influencé par l'identification du niveau de prise de risque ou de sécurité lors de la planification du trajet, donc de phénomènes anticipatoires et exécutifs (Patla, Davies, et al., 2004). Alors, fonctions visuelles, loco-motrices et exécutives seraient requises. Et qu'en ceci, la lésion d'une de ces fonctions, locomotrices, visuelles ou bien cognitivo-exécutives, pourrait avoir un impact sur les capacités de navigation des personnes porteuses de ces lésions.

Figure 12 - Vue du ciel d'un carrefour et du croisement de foule en situation urbaine (Source : https://fr.freepik.com/photos-premium/personnes-voiture-foule-vue-pietons-carrefour-croisement-croisement-shibuya_4494408.htm)



Les capacités d'adaptation et de modification de la coordination locomotrice face aux contraintes environnementales seraient fortement perturbées auprès de personnes traumatisées, en phase chronique (Vasudevan et al., 2014). Plus encore, tous les domaines liés à la navigation (cf figure 13 et 14) (reconnaissance spatiale, orientation, intégration, planification, Etc...) seraient problématiques pour près de 40% de cette population (van der Kuil et al., 2021) ;

Figure 13 - Méta-analyses des données comparatives des différents domaines de navigation entre individus porteurs de lésions cranio-cérébrales acquises et sujets contrôles (Goulter et al., 2021)

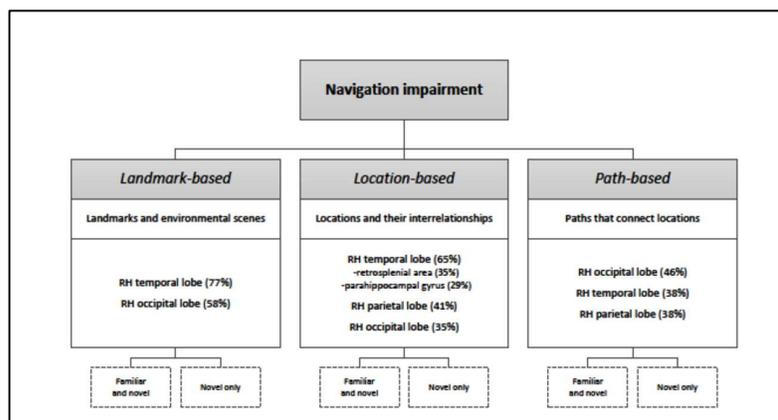
Navigation Domain	N Studies	Hedge's g	95% CI Lower	95% CI Upper	Q-Statistic	Fail-Safe N
Landmark Recognition	5	-0.53***	-0.73	-0.34	2.81	22
Spatial Layout/Learning	21	-0.89***	-1.21	-0.57	76.29***	114
Route Knowledge	22	-0.98***	-1.26	-0.71	68.41***	146
Survey Knowledge	17	-0.65***	-0.87	-0.44	33.17**	89
Path Integration	9	-1.27***	-1.66	-0.88	15.64*	100

* Significance at the <.05 level. ** Significance at the <.01 level. *** Significance at the <.001 level.

plusieurs études font état de ces observations dans des populations porteurs de séquelles d'accident vasculaire cérébral, mais plus rarement de façon spécifique dans une population porteuse de lésion cranio-cérébrale d'origine traumatique, de même sévérité, à des temps similaires, à travers des évaluations standardisées et homogènes permettant d'accéder à des données comparatives (Dever et al., 2022; Fino et al., 2018; Goulter et al., 2021; van der Ham et al., 2020).

Une revue systématique traitant des désordres de navigation rencontrés dans une population porteuse de lésion neurologique fait état de trois domaines potentiellement impactés dans l'élaboration de la tâche de navigation qui sont la connaissance des repères, les lieux et le chemin (cf figure 14) (Claessen & van der Ham, 2017).

Figure 14 - Trois domaines composant l'élaboration de la tâche de navigation (Claessen et al, 2017)

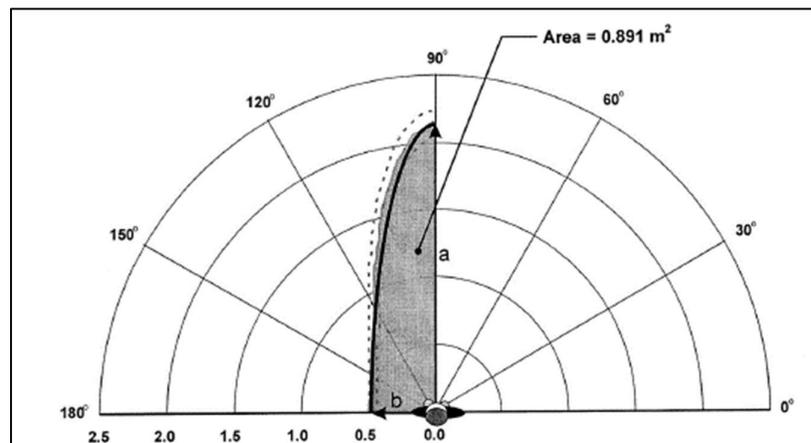


Dans une étude datant de 2000, conduite auprès de personnes (n=51, AgeMoy=32.2 ans) porteurs de séquelles de lésion cranio-cérébrale (délai moyen post-lésion = 40.6 mois), la présence de troubles cognitifs, notamment d'une diminution du temps de réaction et du traitement de l'information, a un impact significatif sur la capacité à trouver sa route, comparativement à une population asymptotique (Spikman et al., 2000).

Plus localement, la navigation dans un environnement nécessite de considérer les éléments le composant, statique ou mobile, et de s'adapter aux contraintes qu'il impose sur la personne navigante.

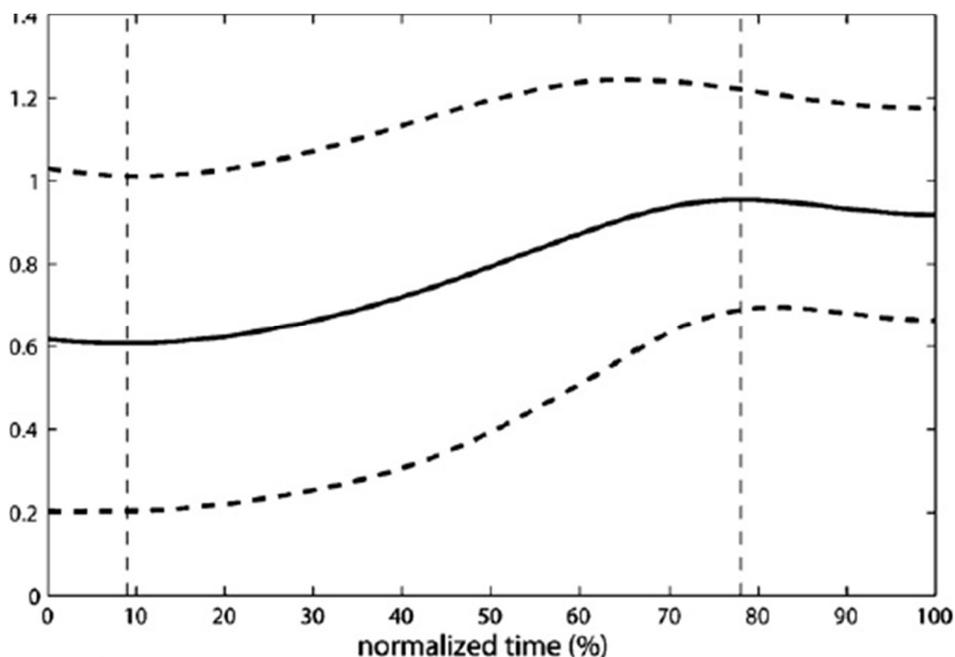
Un premier paramètre concerne l'espace personnel (cf figure 15), espace de forme ellipsoïde entourant le marcheur, à la fois lié au niveau attentionnel et déterminant le comportement locomoteur (Gérin-Lajoie et al., 2005). Cet espace permet d'éviter les collisions et de respecter certaines normes sociales. L'axe longitudinal (valeur moyenne = 1.88m) de cet espace est le plus grand, dans le but de permettre au marcheur en prenant le temps de percevoir les potentiels dangers d'adapter ses réactions en conséquence. L'axe latéral (valeur moyenne = 0.45m) est relativement constant et envisage une certaine mobilité à travers l'environnement en évitant les contacts ou obstructions. Plus la vitesse du marcheur augmente, plus l'espace nécessaire pour percevoir, anticiper et réagir à de potentielles situations de collisions doit être grand. La présence de conditions environnementales différentes suggère qu'une plus grande complexité environnementale ou des capacités locomotrices diminuées pourraient avoir un impact sur la régulation de l'espace personnel, peut-être même nécessiteraient un ajustement plus important de la marche afin de préserver la sécurité et l'intégrité du marcheur. Il semblerait que cet espace ne soit pas dépendante de la vitesse de marche, qu'elle soit naturelle, lente ou rapide, ni même du type d'environnement, physique ou virtuel, dans lequel l'individu interagit ; ceci étant dit, cet espace serait différent selon la dominance de l'individu, voyant ainsi la distance séparant de l'objet croisé plus réduite lors du passage du côté dominant (Gérin-Lajoie et al., 2008) ; l'auteur avance comme hypothèse le fait que les informations visuo-perceptives perçues alors seraient intégrées plus rapidement ou bien que l'adaptation locomotrice serait meilleure lors d'une situation de croisement avec un objet par le côté dominant.

Figure 15- Moyenne Globale de l'espace personnel (Gerin-Lajoie et al, 2005)



Un autre paramètre à considérer lors d'interaction entre marcheurs est la distance minimale prédite du croisement, métrique représentant la distance de rencontre entre deux marcheurs dans le cas où aucune adaptation de la marche ne serait envisagée (cf figure 16) (Olivier et al., 2012). Lors de l'interaction entre deux marcheurs, trois phases successives, dite d'observation, de réaction et de régulation, se suivent. Ces phases ont pour objectif de percevoir, de décider et d'adapter la locomotion afin d'écartier tout risque de collision. Cette distance serait significativement plus faible dans la population symptomatique comparativement aux personnes asymptomatiques, à distance de la lésion (Fait et al., 2009; Vallée et al., 2006). Dans cette étude parue par P. Fait datant de 2009, le suivi d'un seul sujet a fait le fruit d'une analyse de son activité locomotrice avant et après traumatisme; les résultats ont non seulement mis en évidence une diminution significative de la vitesse de marche à 7 et 30 jours après traumatisme, mais surtout une diminution de la distance le séparant lors d'une tâche d'évitement/contournement de l'objet statique ; cette distance semblait être plus réduite lors du contournement gauche (Gérin-Lajoie et al., 2005). Pour conclure, les capacités locomotrices en situation de navigation semblaient donc toujours déficientes à 7 et 30 jours après la survenue de la lésion (Fait et al., 2009).

Figure 16- Evolution de la distance minimale prédite lors de l'interaction entre deux marcheurs se croisant à 90° en fonction du temps (Olivier et al, 2012)



Les observations faites par McFadyen sur la variabilité de la vitesse de marche chez des sujets présentant des séquelles de traumatisme cranio-cérébral semblaient être similaires sur

d'autres paramètres analysés tel que la distance séparant le participant de l'obstacle, et montrait une certaine variabilité intra individuelle de ce paramètre uniquement dans le groupe atteint plus importante, sans pour autant que cela soit significatif (McFadyen et al., 2009).

1.3.2. Interaction évitement/collision

La littérature sur la question des interactions entre humains lors de la locomotion est dense et s'est intéressée à l'influence de facteurs situationnels ou individuels ; cette littérature propose à la fois des analyses des trajectoires locomotrices ((Croft & Panchuk, 2018; Darekar et al., 2017) mais également du regard (Berton et al., 2020; Meerhoff, Bruneau, et al., 2018; Patla, 1997). Comportement du regard et ajustements locomoteurs seraient deux paramètres prédictifs déterminants les stratégies locomotrices du marcheur lors d'interaction (Croft & Panchuk, 2018).

Le regard tout d'abord ; une étude de L.A. Meerhoff a mis en évidence le lien entre comportement du regard et tâche d'évitement en situation d'interaction avec des agents virtuels. En effet, les résultats de cette étude montre que le regard des sujets était plus « attiré » par les agents virtuels ayant une distance plus faible et un temps minimal d'approche plus faible avec le marcheur, indiquant alors un risque plus élevé de collisions. Le regard porté alors sur les agents virtuels fixés et plus à risque de collision était plus long. En d'autre termes, les agents regardés sont ceux qui présentant un risque de collision plus important mais sont ceux qui sont également les plus évités (cf figure 17). Les notions de temps et de distance sont deux paramètres qui permettraient d'identifier le risque de collision ; en particulier, la fixation visuelle d'un agent ciblé effectuée à une distance inférieure à 3 m, selon l'auteur, ne permettrait pas au marcheur d'opérer une manœuvre efficace d'évitement (Meerhoff, Bruneau, et al., 2018).

Figure 17 - ratio des fixations des Agents virtuels et de leur évitement (nombre d'évitement n=493) (Meerhoff et al, 2018)

		Avoided	Not avoided	Totals
Percentages	Fixated upon	79%	21%	100%
	Not fixated upon	57%	43%	100%

Entre autre, l'auteur évoque dans ces résultats que dans presque 21% des fixations visuelles effectuées sur des agents virtuels, il y avait collision. Plus encore, le comportement d'évitement est également observé lorsque le marcheur ne fixe pas du regard l'agent évité ; à noter que le seuil de détection de la fixation fovéale considéré dans cette étude est de 0.2s secondes et donc

peut être trop important. Ceci dit, cette observation est renforcée par d'autres articles évoquant le potentiel rôle que pourrait avoir le champ parafovéal dans la détection du mouvement, la considération de l'objet à éviter, le risque de collision encouru et les stratégies à employer (Collewijn & Tamminga, 1986; Croft et al., 2010).

McFadyen a montré qu'une population TCC de gravité modéré à sévère présente une augmentation du coût attentionnel et un allongement du temps de réaction, notamment lors d'une double-stimulation visuelle, mettant ainsi en avant les difficultés exécutives et visuo-spatiales dans la réalisation de tâches d'une tâche d'enjambement d'obstacle (McFadyen et al., 2009).

Pour ce qui est des paramètres locomoteurs, Darekar en 2017 a analysé les stratégies de contournement et d'évitement spécifiquement dans une population cérébro-lésée (n= 12, AgeMoy = 56, délai post-lésion = 3,3 ans) ; cette étude a permis de mettre en évidence que les stratégies de contournement semblent être altérées et influencées par les capacités motrices résiduelles des personnes victimes de séquelles d'accident vasculaire cérébral ; plus, il semblerait que les stratégies adoptées par le sujet symptomatique soient plus prudente et conservatrice dans le cas d'évitement d'obstacle ; en effet, la distance séparant le sujet de l'obstacle est significativement plus importante dans la population porteuse de lésions ; les résultats ont également montré que la majorité d'entre eux contournerait les obstacles par le coté le plus efficient (Darekar et al., 2017).

Dans cette étude, la distance séparant le participant de l'objet était plus faible lorsqu'il s'agissait d'un obstacle immobile comparativement à un obstacle mobile (Darekar et al., 2017). Cela sous-entendrait qu'en situation où l'environnement se complexifie, l'individu adopte un comportement plus prudent par l'augmentation de la distance le séparant avec l'objet potentiellement à risque.

Dans une étude parue en 2009, malgré le fait que les individus traumatisés, de gravité modérée et sévère, présentent une bonne récupération de leur capacité locomotrice et d'une apparente habilité à réaliser une tâche complexe, ces personnes montrent une diminution de la hauteur et de la distance avec l'objet lors de la réalisation d'une tâche d'enjambement d'obstacle. En situation de double-tâche, la différence significative entre les deux groupes, symptomatique et asymptomatique, fait évoquer par l'auteur un surcoût attentionnel lors de la réalisation de cette tâche difficile à supporter par une population TCC, devant partager ses

ressources entre impératif de mobilité, donc intégrité physique, et demande cognitive (McFadyen et al., 2009). On s'attendrait alors à observer des observations similaires dans une population similaire lors de situations où cognition et mobilité sont conjointes, par exemple la navigation dans des espaces peuplés.

Il existe plusieurs stratégies pour envisager l'évitement de collision de personnes en interactions et ne sont peut être pas toutes similaires en condition réel dans des environnements complexes lors d'interactions multiples (Croft & Panchuk, 2018). En situation de densité humaine plus importante, par exemple dans des centres commerciaux, des marchés ou bien des rues piétonnes, les stratégies d'évitement et les interactions entre marcheurs dans une foule dépendraient du nombre d'interactions et de la complexité de l'environnement (Meerhoff et al., 2018). Le comportement du regard serait également influencé par la densité de la foule (Berton et al., 2020). La densité de la foule présente dans l'environnement influence le balayage du regard et les saccades ; plus la densité augmente, plus le balayage se réduit, notamment sur l'axe vertical, et plus le nombre de saccades diminue. En d'autres termes, dès que la contrainte environnemental augmente, par un risque plus important de collision, le regard s'oriente plus vers ce qui se situe face au marcheur, et le nombre de fixation se réduit ; l'attention se focalise sur des éléments plus centraux. Nous pourrions dire alors que le sujet priorise (Berton et al., 2020).

Comme énoncé précédemment, naviguer dans un environnement complexe et dynamique nécessite pour le marcheur d'adapter son mouvement pour éviter toute collision et, qu'en ce sens, il paraît fondamental de modifier, d'adapter le comportement locomoteur, entre autre la vitesse, en percevant et considérant les éléments composant l'environnement, susceptibles d'interagir avec le marcheur. Trois aspects fondamentaux de la navigation que nous retrouvons ici portés par la fonction visuelle, cognitive et locomotrice. Cependant, l'impact de certains facteurs sur les capacités de navigation n'est clairement pas établi dans une population présentant des séquelles de lésions cérébrales d'origine traumatique. Ces éléments permettraient d'identifier plus précisément les difficultés présentes chez les sujets symptomatiques dans des situations d'interactions avec d'autres piétons et ce dans des environnements du quotidien.

2. Synthèse et objectifs

Ce travail, effectué dans le cadre de la collaboration entre le laboratoire M2S à Rennes, le laboratoire CIRRIIS à Québec, l'Institut INRIA et le Pôle Saint Hélier à Rennes, vise à définir un protocole de recherche clinique interventionnel sur la personne humaine permettant de répondre à la problématique ; il vise également la production de documents éthiques autorisant la recherche auprès de la personne humaine, déposé auprès des autorités compétentes. Ces documents sont en cours de relecture pour avis avant soumission auprès des autorités compétentes pour validation.

2.1. Problématique

Les personnes porteuses d'une lésion cérébrale d'origine traumatique présentent des difficultés dans les tâches de navigation tel que l'évitement ou de contournement d'obstacles (Fait et al., 2009; McFadyen et al., 2009) ; ces difficultés sont la résultante d'un compromis nécessaire entre capacités locomotrices et phénomènes attentionnels, notamment dans des environnements où adaptation est fortement requise (Cullen et al., 2018; Vallée et al., 2006). Ces limitations dans les activités de navigation semblent restreindre leur participation sociale mais également professionnelle (Katz et al., 2004; G. Williams & Willmott, 2012). A l'heure actuelle, aucune recherche n'a permis de mettre en évidence et d'expliquer les difficultés, corrélée au niveau de sévérité (Dever et al., 2022), que cette population présente dans la réalisation de tâches de navigation en environnement proche des conditions réelles, nécessitant à la fois adaptation, phénomènes attentionnels, activités coordonnées du regard et du corps et capacités locomotrices.

2.2. Question de recherche

Quel est l'impact de la lésion cérébrale d'origine traumatique, de gravité modérée à sévère, sur les comportements visuo-locomoteurs en interaction avec des piétons ?

2.3. Objectifs et Hypothèses

L'objectif de ce projet est de mieux comprendre les effets persistants d'un traumatisme cranio-cérébral sur la capacité locomotrice lors d'une tâche de navigation spécifiquement pour une population TCC modéré/sévère, en comparaison à une population asymptomatique.

Hypothèse 1 : les personnes porteuses de lésion cérébrale de gravité modéré à sévère présentent des comportements locomoteurs plus prudents lors de la navigation dans une foule, notamment avec des densités élevées. (diminution de la vitesse de marche, augmentation de la variabilité de la vitesse de marche...)

Hypothèse 2 : l'activité du regard des personnes porteuses de lésion cérébrale de gravité modéré à sévère diffère de celle présente chez des personnes asymptomatiques (allocation des fixations, durée/temps de fixation, balayage visuel...)

Hypothèse 3 : les stratégies visuo-locomotrices des personnes porteuses de lésion cérébrale de gravité modéré à sévère lors d'une activité de navigation dans une foule est corrélée aux évaluations cliniques des fonctions exécutives et locomotrices.

3. Méthodologie

3.1. Recherche envisagée et design expérimental

3.1.1. Description de la méthodologie de recherche envisagée

Ce projet de recherche est une pré étude clinique portant sur la personne humaine, dont les risques et contraintes sont considérées comme minimales, comme le prévoit l'article 2 de l'arrêté ministériel du 12 Avril 2018 (Arrêté du 12 avril 2018 fixant la liste des recherches mentionnées au 2° de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique, s. d.). Il s'agit d'une Recherche Interventionnelle impliquant la Personne Humaine, ou RIPH2. Dans le cadre d'un RIPH2 ou RIRCM, les recommandations des bonnes pratiques cliniques font état d'une méthodologie de référence type MR001, comme le prévoit le décret n°2016-263 (Délibération n° 2016-263 du 21 juillet 2016 - Légifrance, s. d.)

Cette recherche est une étude clinique transversale comparative entre deux groupes indépendants.

3.1.2. Protocole expérimental

Comme l'a été suggéré dans plusieurs études, nous étudierons les comportements visuels et locomoteurs lors d'une tâche complexe dans un environnement simulé, dans des conditions proches du réel ; les tests effectués en situation clinique ne reflètent pas suffisamment la réalité ; il existerait une sous-évaluation des difficultés encourues par une population présentant des troubles liées aux séquelles de lésion cranio-cérébrale (Moseley et al., 2004); l'évaluation en situation « écologique » permet de solliciter à la fois les fonctions locomotrices et exécutives (McFadyen et al., 2017). Pour ce faire, l'outil « réalité virtuelle » a cette capacité de répliquer les effets de la demande d'un environnement physique chez le participant (Keshner & Lamontagne, 2021; Tieri et al., 2018).

Pour simuler l'environnement écologique, le participant sera immergé dans un environnement projeté par un casque de « réalité virtuelle » ; l'environnement projeté reproduit à l'échelle la rue dans laquelle le participant naviguera. Une revue systématique de la littérature de 2019 évoque les avantages des interventions utilisant la réalité virtuelle comme outil visant à mesurer les performances neurocognitives dans une population porteuse de séquelles de traumatisme crânien (Manivannan et al., 2019) ; la réalité virtuelle favoriserait l'engagement

de l'individu dans le processus de rééducation, permettrait une meilleure individualisation de la prise en soin, serait une expérience mieux vécue par le participant et permettrait une meilleure identification et optimisation les progrès réalisés.

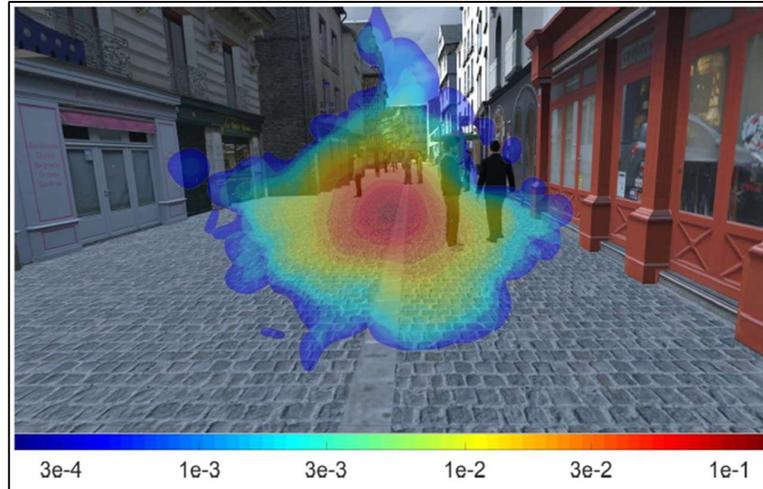
Cet outil a déjà fait le fruit de plusieurs expérimentations ayant mis en évidence la fiabilité de l'outil quant à l'observation de comportements similaires à ceux potentiellement observables en situation réelle. Notamment autour du comportement du regard, les résultats évoqués par Berton montrent que les comportements reproduits en situation de réalité virtuelle sont similaires et comparables à ce que l'on peut retrouver en réalité (cf figure 18-19) (Berton et al., 2020) ; les individus portaient leur regard au centre du champ visuel (cf figure 19) et leur activité oculaire semble avoir des comportement similaires qualitativement entre situation virtuelle et réelle. Plus encore, d'autres expérimentations ont été mené dans le but de démontrer l'acceptabilité et la faisabilité de ce type de protocole. En 2017, Robitaille a montré dans son étude le caractère faisable et bien supporté de l'outil VR dans des perspectives d'évaluation de la double-tâche lors d'une activité locomotrice chez des personnes porteuses de lésions cérébrales acquises (Robitaille et al., 2017). Une autre expérience de double-tâche cognitive et locomotrice a montré sa faisabilité lors de situation de croisement d'avatar et pouvait s'envisager dans une population cérébrolésée (Deblock-Bellamy et al., 2021).

Figure 18 - Illustrations de l'étude comparative entre conditions réelles et virtuelles (Berton et al, 2020)



L'évaluation de l'activité oculo-motrice est aujourd'hui reconnue comme permettant d'accéder aux fonctions visuelles mais aussi cognitives (Heitger et al., 2006; R. Mani et al., 2018; White & Fielding, 2012).

Figure 19- "Heat-Map" ou carte de distribution du balayage du regard lors d'interaction en environnement virtuel (Berton et al, 2020)



Le recueil des données de l'activité locomotrice se fait par les capteurs de mouvement Xsens®, disposé sur l'ensemble du corps.

3.1.2.1. Tâche

Lors de cette expérimentation, il sera demandé aux participants de marcher dans un environnement virtuel dans lequel un ou plusieurs piétons seront présents. Pour la première expérimentation, il sera simplement question de marcher dans cet environnement virtuel en ligne droite. Pour la deuxième expérimentation, le participant devra, dans ce même environnement, marcher et contourner un agent virtuel statique positionné à la moitié de la trajectoire parcourue. Pour la troisième expérimentation, le participant aura à traverser une rue pour se rendre dans la file d'attente d'une boulangerie situé de l'autre côté de cette rue ; cet environnement est peuplée d'une foule d'agents virtuels statiques, regardant un évènement vidéoprojeté sur un écran géant situé derrière le participant.

3.1.2.2. Matériel et environnements

Conformément à l'article L1121-13 du code de la santé publique, la recherche sera réalisée dans un lieu disposant des moyens humains, matériels et techniques adaptés à la recherche et compatibles avec les impératifs de sécurité des personnes qui s'y prêtent (Article L1121-13 - Code de la santé publique - Légifrance, s. d.). Les séances d'évaluations se feront dans le gymnase du laboratoire « Mouvement, Sport, Santé » M2S (cf figure 20) situé sur le campus de Ker Lann, à Bruz, pour chaque participant. Ce laboratoire possède l'agrément permettant de mener ce type d'expérimentation auprès de populations cibles.

Figure 20- Vue du gymnase - Laboratoire M2S- Ker Lann – BRUZ, 35170, FRANCE



Le matériel envisagé dans cette expérimentation est un casque de réalité virtuelle portable, ou HMD, (pour *Head-Mounted Display*), par lequel sera projetée une modélisation d'une rue de Rennes. Le modèle de casque HMD utilisée est le HTC VIVE PRO EYE® (cf figure 21); la fréquence de rafraichissement est de 90Hz ; la largeur du champ visuel est de 110°. Ce casque a l'avantage de posséder un système de capture d'activité oculo-motrice (Eye-tracking). La fréquence de captation de l'activité oculomotrice est de 120hz ; la largeur de captation du champ visuel est de 110°; la sensibilité de détection du mouvement rétinien est de 0.5-1.1°.

Figure 21 - Casque de réalité virtuelle HTC VIVE PRO EYE®



L'outil de capture de mouvement est Xsens[®] (cf figure 22) ; cet outil permettra d'accéder aux paramètres cinétiques et cinématique de l'activité locomotrice et servira au recueil des données du mouvement. L'environnement virtuel a été créé par le logiciel Unity[®] ; cet environnement est la reproduction virtuelle à l'échelle d'une des rues piétonnes de la ville de Rennes, la rue Vasselot. Quatre caméras de type HTC vont compléter le dispositif.

Figure 22 – Disposition et localisation des capteurs de Mouvement Xsens[®] sur le corps



L'espace de capture du mouvement est délimité par le champ des quatre caméras HTC, disposés en forme de trapèze, dans lequel chaque participant parcourra une des diagonales.

Les conditions d'utilisation des outils sont les conditions standards prédéfinies par le constructeur.

Le participant sera équipé des deux outils en même temps (cf figure 23), à l'identique de l'étude proposée en 2020 par Berton (Berton et al., 2020).

Figure 23 - Vue de profil de l'équipement embarqué par le participant (Berton et al, 2020)



3.1.2.3.Design

Chaque séance de mesure n'impliquera qu'une seule personne à la fois. Chaque participant sera accueilli au sein de ce gymnase par l'équipe sur place et pourra poser toutes les questions qui lui semble nécessaire. La séance d'évaluation sera la deuxième visite. Le protocole expérimental est le suivant :

- Cette étude s'articule en 3 temps expérimentaux :
 - La première expérimentation consiste à demander au participant d'effectuer cinq répétitions d'une simple tâche de marche en ligne droite, dans l'environnement simulé, sur une distance de 10 mètres. Cette phase servira à la fois de tâche de familiarisation de l'outil « réalité virtuelle » en situation libre de marche, sans obstacle.
 - La deuxième expérimentation consiste pour le participant à effectuer une activité de marche sur 10 mètres, dans ce même environnement virtuel, et de contourner un humain virtuel en situation statique et positionné à la moitié du trajet à effectuer. Cette tâche de contournement émet l'hypothèse qu'il existerait une différence de comportement locomoteur lors d'une tâche de navigation, comme l'évitement et le contournement, en interaction avec un humain virtuel, entre les personnes porteurs d'une lésion cérébrale traumatique et les personnes asymptomatiques.
 - La troisième manipulation consiste pour le participant, dans ce même environnement virtuel, à traverser une rue peuplée d'une foule statique de densité variable, sur une distance de parcours inférieure à 10m, dans le but de se

rendre dans la file d'attente d'une boulangerie située de l'autre côté de la rue. Cette troisième expérimentation envisage l'hypothèse de potentiels liens faisant émerger des difficultés spécifiquement de la population évaluée lors de la navigation en environnement complexe, entre stratégies visuo-locomotrices observées, mesurées par des variables tel que la distance de croisement, degré de sévérité et phénotypes cliniques, en fonction du niveau de contrainte, simulé ici par la densité croissante de la foule (Cf figure 24-25-26).

Figure 24 - Vue de l'environnement simulé et peuplé d'humains virtuels, à une densité basse (espacement entre humains virtuels de 1.8m)



Figure 25- Vue de l'environnement simulé et peuplé d'humains virtuels, à une densité moyenne (espacement entre humains virtuels de 1.4m)



Figure 26- Vue de l'environnement simulé et peuplé d'humains virtuels, à une haute densité (espacement entre humains virtuels de 1m)



A la fin de la session expérimentale, l'ensemble du matériel sera récupéré et désinfecté. Cela clôturera la séance. Un temps de repos sera alloué à tout moment si nécessaire, pour chaque participant, la fatigue n'étant pas un paramètre pris en compte dans notre étude.

3.1.2.4. Analyse Statistique

L'enregistrement des données de l'activité locomotrice se fait par le système Xsens® ; l'analyse des mesures se fait Matlab®.

L'enregistrement de l'activité oculo-motrice se fait par Eye-Tracking; l'analyse des mesures se fait par Matlab®.

L'analyse statistique permettra de répondre aux différentes hypothèses précédemment énoncées. Les variables mesurées seront comparées les unes aux autres de façon indépendante et pour chaque hypothèse. Le logiciel utilisé est le Logiciel Jamovi®. Une première analyse descriptive étudiera les échantillons des deux groupes indépendamment (valeurs descriptives, variables, normalité de la distribution, variance...). La comparaison entre les deux groupes signera les potentielles différences de comportements liés à la présence ou non d'une lésion cranio-cérébrale, selon les variables mesurées. En ce sens, la première hypothèse pourra donc être vérifiée alors. Du fait de l'indépendance des variables mesurées et des mesures répétées, de façon générale, et dans l'objectif d'étudier l'effet de groupe et de la densité, une comparaison de type Anova factorielle à plan mixte sera réalisée avec pour facteur intergroupe le fait de faire partie d'un des deux groupes, « TCC » ou « C », et pour facteur intragroupe le niveau de densité (3 densités différentes). Plus précisément, des tests post-hoc seront effectués pour comparer les deux groupes et connaître l'effet d'un facteur sur la variable mesurée, en appliquant par exemple la méthode de Tukey.

Pour la première expérimentation, une analyse comparative des valeurs obtenues entre les deux groupes, sur les variables vitesse, paramètres cinétiques de la marche et trajectoire sera effectuée et servira de base de référence aux expérimentations suivantes. Ces résultats seront analysés au regard des données cliniques recueillies lors de la première visite comparativement entre le groupe TCC et le groupe C, soit du facteur « lésion » ; l'objectif est d'identifier les potentielles différences du comportement locomoteur entre les participants des deux groupes effectuant une tâche locomotrice simple, de marche en ligne droite, en environnement simulé, sans obstacle, et potentiellement influencées par les caractéristiques cliniques des populations incluses.

Pour la deuxième expérimentation, une analyse comparative des valeurs obtenues entre les deux groupes, sur les variables vitesse, fluidité, paramètres cinétiques de la marche,

trajectoire, instant de déviation, distance minimale de croisement et regard, sera effectuée et fera l'objet d'une comparaison en fonction du facteur « lésion » ; l'objectif est d'identifier les potentielles différences du comportement locomoteur entre les participants des deux groupes effectuant une tâche locomotrice de contournement d'un humain virtuel, en environnement simulé.

Pour la troisième expérimentation, , un recueil des données observées et des valeurs obtenues entre les deux groupes, sur les variables vitesse, fluidité, paramètres cinétiques de la marche, trajectoire, distance minimale de croisement et regard, sera effectuée et fera l'objet d'une comparaison en fonction des facteurs « lésion » et « densité » ; l'objectif est d'identifier les potentielles différences du comportement locomoteur et des stratégies visuo-locomotrices entre les participants des deux groupes effectuant une tâche locomotrice de contournement dans un environnement complexe peuplée d'une foule d'agents virtuels, en position statique, de densité différente.

Un regard sur la puissance statistique sera porté sur les résultats de l'analyse des paramètres mesurés, avec comme objectif de déterminer une puissance minimale de 0.80. Cette analyse permettra de pondérer les résultats afin d'effectuer une interprétation la plus objective possible sur les tendances dégagées lors de l'analyse.

3.1.2.5. Variables mesurées et facteurs retenus

Les facteurs retenus sont les suivants :

- Le niveau de densité de la foule, réparti en trois niveaux différents selon la distance séparant deux agents virtuels, de faible (1,8m entre chaque humain virtuel, cf figure 19), de moyenne (1,4m entre chaque humain virtuel, cf figure 20) et de forte densité (1m entre chaque humain virtuel, cf figure 21).
- Le type de lésion :
 - L'ancienneté de la lésion (temps en jours séparant de l'épisode traumatique)
 - La sévérité de la lésion (GCS+APT)
 - Le profil de la lésion ou capacités fonctionnelles du participant (Tests cliniques lors de la deuxième visite)+

Les variables mesurées sont les suivantes pour chacune des expérimentations :

- Etude 1 : Marche en ligne droite en VR
 - Vitesse de marche (distance parcourue par rapport au temps)
 - Paramètre cinétique de la marche (longueur du pas, du cycle, largeur du pas, cadence)
 - Trajectoire (Déviation médio-latérale moyenne du centre de masse par rapport à la trajectoire moyenne)
- Etude 2 : Croisement/évitement d'un humain virtuel en position statique
 - Vitesse de marche + variabilité (écart par rapport à la vitesse moyenne)
 - Fluidité (variabilité d'accélération/décélération calculé par le déplacement du centre de masse)
 - Paramètres cinétiques de la marche (longueur du pas, du cycle, largeur du pas, cadence)
 - Trajectoire (Déviation médio-latérale moyenne du centre de masse par rapport à la trajectoire moyenne)
 - Instant de déviation (temps et distance avant changement de trajectoire + temps et distance après changement de trajectoire)
 - Distance minimale de croisement (distance épaule-épaule/coude-coude)
 - Stratégie d'évitement/Contournement (coté préféré)
 - Regard (Allocation et nombre de fixations, séquence d'allocation des fixations, temps et durée des fixations, balayage visuel)
- Etude 3 : Traversée d'une rue peuplée d'humains virtuels en position statique
 - Vitesse de marche + variabilité
 - Fluidité (variabilité d'accélération/décélération calculé par le déplacement du centre de masse)
 - Paramètres cinétiques de la marche (longueur du pas, du cycle, largeur du pas, cadence)
 - Trajectoire (zone de passage traversée définie par la position des agents virtuels dans l'environnement)
 - Distance minimale de croisement (distance épaule-épaule/coude-coude) + Moyenne des distances + variabilité de la distance
 - Collisions (nombre de fois où la distance épaule-épaule < 0.3m (Darekar et al., 2017; Olivier et al., 2012, 2018))
 - Stratégies d'évitement/contournement (giration ceintures)

- Regard (Allocation et nombre de fixations, séquence d'allocation des fixations, temps et durée des fixations, balayage visuel (Berton et al., 2020))

Une évaluation de l'acceptabilité de l'outil « Réalité Virtuelle » ponctuera la fin de la séance ; pour cela, un auto-questionnaire permettra de rendre compte du ressenti du participant à l'aide de l'échelle SSQ (cf annexe 12) (Kennedy et al., 1993) . Cette échelle est validée et traduite en langue française (Bouchard et al., 2007).

3.2. Populations

3.2.1. Description de la population

Nous étudierons deux groupes :

- le premier groupe, TCC pour « Traumatisme Cranio-cérébral », constitué de patients ayant subi un traumatisme crânien modéré ou sévère datant de 6 mois ou plus,
- le second groupe, C pour « Contrôle », constitué de personnes volontaires saines, n'ayant eu aucun antécédent de lésion cérébrale ou traumatisme crânien, commotion y compris, diagnostiqués en date de l'évaluation. Les personnes seront appariées sur les valeurs moyennées en âge, sexe, taille et poids.

Dans le cadre de cette étude, le groupe nommé « groupe TCC » est constitué de personnes, hommes et femmes, adultes, dont l'âge est compris entre 18 et 55 ans, ayant subi un traumatisme crânien, de sévérité modérée à grave. Le choix de l'âge plafond à 55 ans a été déterminé dans l'optique d'éviter tout effet du vieillissement physiologique sur les capacités mesurées. L'expérience aura lieu 6 mois ou plus après le diagnostic lésionnel.

Le nombre de participants attendus pour cette étude est de 10 dans chacun des groupes, soit un total de 20 inclusions.

3.2.2. Critères inclusions

Les critères d'inclusions sont les suivants :

- Groupe TCC
 - $18 \leq \text{Age} \leq 55$ ans
 - Homme/Femme

- Inscrit à un régime de sécurité social
- Ayant fait un premier traumatisme crânien non pénétrant
- Gravité modérée à sévère ($5 < \text{GCS} < 13$)
- Phase chronique (≥ 6 mois à la date de l'expérimentation)
- Marche autonome (≥ 0.8 m/s, ≥ 20 m sans aide technique ou humaine, PM > 600 m)
- Absence d'antécédents de crise d'épilepsie ou de traitement antiépileptique
- Equilibre debout (TUG < 16 s)
- Vision normale ou corrigée à la normale
- Consentement libre, éclairé, exprimé (oral ou écrit)
- Volontaire Sain (Groupe C)
 - 18 ans \leq âge \leq 55 ans
 - Homme/femme
 - Inscrit à un régime de sécurité social
 - Ne présentant pas d'antécédent de traumatisme crânien, de lésion cérébrale ou de commotion diagnostiqué à la date de l'inclusion/première évaluation
 - Ne présentant pas de troubles ou pathologies locomotrices
 - Vision normale ou corrigée à la normale
 - Consentement libre, éclairé, exprimé (oral ou écrit)

Les critères de non-inclusions sont les suivants :

- Groupe TCC
 - Antécédents orthopédiques, rhumatologiques ou visuels ayant une incidence sur la capacité de locomotion
 - Troubles majeurs de compréhension
 - Femmes enceintes ou allaitantes
 - Personnes majeures faisant l'objet d'une protection légale (sauvegarde de justice, curatelle, tutelle)
 - personnes privées de liberté
- Volontaire sain (Groupe C)
 - Antécédents orthopédiques, rhumatologiques ou visuels ayant une incidence sur la capacité de locomotion
 - Femmes enceintes ou allaitantes

- Personnes majeures faisant l'objet d'une protection légale (sauvegarde de justice, curatelle, tutelle)
- personnes privées de liberté

3.2.3. Méthode de recrutement et recueil de consentement

Le recrutement des sujets se fera parmi les personnes victimes d'un traumatisme crânien, hospitalisées ou suivies par le service de médecine physique et de réadaptation du Pole Saint-Hélier, à Rennes, pour leur prise en charge. Après vérification des critères de sélection et des antécédents, le médecin investigateur informera le patient de l'étude et procédera au recueil de son consentement.

Parallèlement à la campagne de recrutement, des sujets volontaires asymptomatiques répondant aux critères de sélection seront recrutés sur la base du volontariat parmi l'entourage du participant et sur des personnes externes. Si le nombre de volontaires sains n'est pas atteint, une campagne d'information chez les professionnels de santé sera envisagée. Le recueil du consentement des volontaires sains se fait par le médecin investigateur.

Dans le cadre d'une recherche interventionnelle impliquant la personne humaine, et conformément à la méthodologie de référence, La loi Jardé (Décret n° 2016-1537 du 16 novembre 2016 relatif aux recherches impliquant la personne humaine, 2016) prévoit l'information du patient et le recueil de son consentement éclairé, libre, exprimé oralement ou écrit. La délivrance d'une lettre d'information relative à l'objet de l'étude et à destination de chaque participant (cf annexe1) leur permet un temps de réflexion avant avis et avant toute signature du formulaire de consentement. Le livret d'information, ou note informative sera datée, signée par le participant et contre signée par l'investigateur ; un exemplaire de ce document sera remis au participant, le double sera conservé par l'investigateur.

Le formulaire de consentement (cf Annexe 2) sera transmis auprès de chaque participant de chaque groupe afin de recueillir leur consentement ; leur accord ou désaccord sera renseigné et conservé, daté et signé par le participant puis contresigné par le médecin investigateur. Le participant conservera un exemplaire du formulaire de recueil du consentement et un deuxième exemplaire sera conservé par l'investigateur.

3.2.4. Suivi

Deux visites sont organisées lors de ces expérimentations. La première visite servira à l'inclusion de chaque participant et sera conduite par le médecin investigateur, certifié aux recommandations de bonnes pratiques cliniques, conformément aux procédures et aux méthodologies référencées (Délibération n° 2018-153 du 3 mai 2018, 2018). La lettre d'information (cf annexe 1) destinée au participant sera remise en main propre. Lors de cette visite, un recueil de plusieurs paramètres (Vérification des critères d'éligibilité à la présente étude, Identitovigilance, état général, recueil et vérification du consentement éclairé/écrit, explications du déroulé de l'expérimentation, connaissances des risques/bénéfices de l'étude) sera effectué pour chaque participant.

La deuxième visite servira à la passation du protocole expérimental. Lors de cette visite, le participant sera accueilli au sein du lieu d'expérimentation par l'opérateur ; ce dernier s'assurera du recueil de plusieurs éléments (identito-vigilance, état général, vérification du consentement, informations complémentaires auprès du participant, test cliniques). Le consentement sera recueilli, à l'aide du formulaire de consentement (cf annexe 2). Avant d'équiper le participant des différents outils servant à la prise de mesure, pour chaque participant, des tests cliniques seront effectués, permettant d'évaluer les capacités suivantes :

- Une évaluation des capacités de mobilité, à l'aide de l'échelle HIMAT (cf Annexe 3) (G. P. Williams et al., 2006) ; cet échelle est validée et traduite en français. Le temps de passation de l'évaluation par l'échelle HIMAT est d'environ 5 à 10 minutes.
- Une évaluation des capacités posturales, à l'aide de l'échelle ICARS (cf Annexe 4) (Trouillas et al., 1997) et l'échelle BBS (Cf annexe 5) (Berg et al., 1989) ; l'échelle BBS est validée et traduite en français par l'institut de réadaptation de Montréal (CNFS, s. d.). Le temps de passation de l'évaluation par l'échelle ICARS est d'environ 20 à 30 minutes. Le temps de passation de l'évaluation BBS est d'environ 10 à 15 minutes.
- Une évaluation des capacités locomotrices, à l'aide du 10MWT (cf Annexe 6) (van Loo et al., 2004) ; cette évaluation peut être administrée sans traduction en langue française spécifiquement au regard de la simplicité des instructions. le temps de passation est de moins d'une minute.

- Une évaluation des capacités d'équilibre, à l'aide du Time-Up-And-Go Test (cf Annexe 7) (Podsiadlo & Richardson, 1991) et de l'échelle ABC-Scale (cf annexe 8) ; l'échelle ABC-Scale est validée et traduite en langue française (Filiatrault et al., 2007; Salbach et al., 2006). Le TUG-Test peut être administré sans traduction en langue française spécifiquement au regard de la simplicité des instructions. Le temps de passation de l'évaluation par le TUG-Test est de moins de 2 minutes. Le temps d'évaluation par l'échelle ABC-Scale est d'environ 10 à 20 minutes.
- Une évaluation des capacités cognitives, à l'aide de l'échelle MoCA (cf Annexe 9) (Nasreddine et al., 2005) ; l'échelle MoCA est validée et traduite en langue française ; le temps de passation est d'environ 10 à 15 minutes.
- Une évaluation des capacités de navigation, à l'aide du Wayfinding Questionnaire (cf annexe 10) (de Rooij et al., 2019; van der Ham et al., 2013). Cette échelle n'est pas validée ni traduite en langue française.
- Une évaluation des conséquences de la lésion, à l'aide de l'échelle NSI (cf annexe 11) (Cicerone & Kalmar, 1995). Le temps de passation de l'évaluation de l'échelle NSI est d'environ 5 à 10 minutes.

Le temps estimé de la partie évaluation clinique de la deuxième visite est comprise entre 1 heure et 1h45. Le temps d'expérimentation hors temps d'installation du matériel est estimé à moins de 10 minutes. Le temps d'installation et de désinstallation est d'environ 1 heure.

A la fin de l'expérimentation, l'opérateur procédera à l'évaluation du ressenti du participant quant à l'expérimentation à l'aide du questionnaire SSQ (cf annexe 12). Cette étape clôturera la session expérimentale. Chacune de ses données sera renseignée dans le cahier d'observation.

Le choix des échelles s'est fait au regard des données de la littérature, en concertation avec les différents partenaires de l'étude en question, promoteur, directeur de mémoire, collaborateur scientifique et médecin investigateur.

4. Résultats

A ce jour, l'expérimentation n'a pas encore commencé. La rédaction des documents d'éthiques est en cours de relecture avant de procéder au dépôt et renseignements pour soumission et avis auprès des autorités compétentes en la matière.

Au regard des résultats des études précitées et de notre connaissance de la littérature actuelle, nous pourrions nous attendre à observer certains comportements.

Premièrement, relatifs aux paramètres locomoteurs, il se pourrait que la vitesse de marche des participants inclus dans le groupe « TCC » soit plus faible que dans le groupe « C » ; plusieurs observations ont en effet montré que la vitesse de marche était significativement plus faible entre personnes porteuses de séquelles de lésions craniocérébrales d'origine traumatique et personnes asymptomatiques (Fait et al., 2009; Gagné et al., 2019; Vallée et al., 2006; G. Williams et al., 2009). Le temps de traversée serait également significativement plus important dans le groupe « TCC », en lien avec une surcharge cognitive et une demande attentionnelle plus importante. Le sujet aurait donc une tendance à répartir les contraintes sur une période plus importante pour limiter cet effet de « surcharge ».

Plus que cette vitesse de marche, la variabilité de certains paramètres locomoteurs pourrait être également plus importante dans le groupe « TCC » comparativement au groupe « C ». Cette variabilité pourrait concerner les variables telles que la vitesse ou cadence de marche mais aussi la déviation du centre de masse dans l'axe médio-latéral, ou bien encore les paramètres tels que la longueur du pas .

Si l'augmentation du temps de traversée peut s'expliquer par une stratégie plus prudente pour le participant, elle peut être aussi le fait d'une diminution du temps de réaction et de traitement de l'information ; cette observation a déjà fait le fruit de précédentes études (Armstrong, 2018; Belanger et al., 2005; Dymowski et al., 2015; Finley et al., 2021; Piponnier et al., 2016).

Sur les stratégies locomotrices et des trajets adoptés, le groupe de participants présentant des lésions séquellaires pourrait être provoquées par la présence des lésions cognitives ; lors de la troisième expérimentation, il serait alors attendu une certaine variabilité dans le choix des trajets effectués pour une même densité de peuplement, témoin à la fois de troubles mnésiques, d'un indiçage plus sensible ou encore une mauvaise reconnaissance de trajectoire ou de représentation mentale du chemin.

Si l'on peut s'attendre à une diminution de la vitesse de marche de façon significative dans le groupe « TCC », le comportement du regard pourrait aussi être modifié ; en particulier, les allocations pourraient être sensiblement différents entre les deux groupes, montrant une fixation

plus importante en nombre d'éléments, par exemple le sol, dans un objectif de recherche de trajectoire et de meilleure stabilité. Plus encore, la durée de fixation du regard sur des éléments de l'environnement ou agents pourrait être également augmentée spécifiquement dans le groupe « TCC » (Cifu et al., 2015). Sur d'autres éléments visuels, le balayage pourrait être aussi lui diminué, par une diminution du champ visuel, en accord avec d'autres observations effectuées (Merezhinskaya et al., 2019).

5. Discussion

Dans l'attente de l'analyse des résultats et de la possible validation ou invalidation des hypothèses énoncées, il convient d'aborder cette discussion avec prudence et relativisme ; c'est la raison pour laquelle nous invitons les lecteurs à une certaine retenue quant à l'interprétation des idées citées dans cette partie. Toutefois, au regard des études citées et des observations faites dans celles-ci, nous pourrions nous attendre à observer certains comportements.

Premièrement, dans la perspective d'une validation de la première hypothèse, soit la présence d'une différence significative entre les deux groupes sur les comportements locomoteurs observés, une forme de comportement plus prudent lors de la navigation dans une foule serait observable spécifiquement dans le groupe « TCC » ; il est attendu que l'augmentation de la densité de la foule ait un effet grossissant des comportements supposés pathologiques dans les stratégies locomotrices adoptées par les participants inclus dans le groupe « TCC ».

Deuxièmement, si la population TCC voit certains paramètres locomoteurs significativement impactés et notamment dans des situations où la densité est un facteur influençant ces stratégies, nous pourrions émettre l'hypothèse que la présence de séquelles de lésions cranio-cérébrales aurait un effet ; l'analyse corrélée aux données cliniques nous permettrait de mieux comprendre les raisons pour lesquelles cette population présenterait des difficultés lors de la navigation en foule, dans des environnements complexes, et ainsi expliquer les limitations de leurs activités ou restriction de participation social ou bien professionnelle. Cela permettrait d'identifier les éléments cliniques particulièrement incidents et responsables de la présence de ces observations. A titre d'exemple, et dans le cas où l'évaluation par l'échelle MoCA sur l'item visuo-spatial ou bien attentionnel révélerait la présence de troubles spécifiquement dans la population « TCC », une des conclusions émises serait que les causes de ces changements de stratégies visuo-locomotrices seraient une plus grande difficulté à

naviguer dans ces espaces complexes par la plus grande difficulté à gérer à la fois les éléments de l'environnement et l'adaptation locomotrice ; cela viendrait renforcer l'observation de certains auteurs ayant évoqués la nécessité de partager les ressources disponibles entre demande attentionnelle et adaptation des paramètres locomoteurs inhérents aux contraintes environnementales (Cantin et al., 2007; Clark, 2015; McFadyen et al., 2017; Vallée et al., 2006; Yogev-Seligmann et al., 2008).

Si l'on aborde la question de la navigation, et en fonction des résultats de l'évaluation à la fois du comportement du regard par Eye-tracking, des réponses du Wayfinding Questionnaire, de la variabilité des trajets empruntés spécifiquement dans le groupe « TCC », corrélées aux lésions séquellaires sur les fonctions exécutives et cognitives mis en évidence par l'échelle MoCA, meilleure serait notre compréhension sur les difficultés de navigation dans des environnements considérés comme hostiles pour des personnes porteuses de ces lésions ; cela permettrait d'expliquer pour quelles raisons cette population exprime tant de difficultés à adopter des trajets extérieurs non routiniers (Sohlberg et al., 2005) et donc aux multiples conséquences dans la participation. Une éventuelle perspective serait alors de pouvoir développer un outil de rééducation envisageant des expérimentations offrant à ces sujets à la possibilité d'effectuer des tâches de navigation de complexité progressive et variée, dans des environnements peuplés, à des niveaux de difficulté graduée ; tout l'intérêt de l'outil « réalité virtuelle », portable et sécurisé, prendrait alors du sens dans le chemin de soin spécifique du sujet porteur de lésion cranio-cérébrale. Cela viendrait appuyer une observation effectuée par plusieurs auteurs qui ont fait état de meilleures perspectives sociales et professionnelles lorsque le sujet porteur de lésion était confronté à un environnement connu, écologique et plus proche de ces conditions de vie habituelles (Lama et al., 2020; Lamontagne et al., 2013).

Une perspective intéressante serait de pouvoir envisager une alternative de rééducation, une autre démarche de prise en soin, précoce, progressive et sécurisée, envisageant l'intervention de l'ensemble des acteurs du soin dans un environnement plus écologique pour la personne, par un retour précoce à domicile du participant. Les enjeux de cette démarche seraient multiples, d'abord et avant tout pour le sujet, dans l'optique de meilleures perspectives socio-professionnelles, mais également pour le coût sociétale que cette pathologie représente à l'heure actuelle; cela pourrait aussi contribuer aux désengorgement des institutions hospitalières et permettrait de concourir à l'amélioration des conditions et de la qualité de soins pour l'ensemble des usagers.

Un des points potentiellement à débattre est de l'analyse des stratégies motrices adoptées par l'individu sur le quadrat corporel supérieur, c'est-à-dire regard-tête-cou-tronc-épaule, qui peut être sensiblement liées à la disponibilité du champ visuel ; naturellement, le champ visuel humain couvre environ 180° ; le casque de réalité virtuelle ne permet qu'une couverture de 110° de ce champ visuel. De fait, lors de situations de croisement, il est possible de voir apparaître une augmentation des mouvements et de l'amplitude de mobilité de la tête et du cou, dans l'objectif de percevoir mieux ou plus fréquemment l'environnement dans lequel le participant interagit. De même, parce qu'il est nécessaire alors pour le participant naviguant dans l'environnement virtuel de multiplier ou de modifier ce comportement visuo-moteur, il paraît logique d'envisager pour une population porteuse de lésions cérébrales la possibilité et l'existence alors d'une forme de vigilance accrue de certains paramètres locomoteurs. Plus encore, certains métriques peuvent être influencées par cette restriction de champ visuel, comme une mauvaise estimation de la distance séparant le participant avec l'objet virtuel croisé, et donc une variabilité de cette distance plus importante. Cette observation a été déjà faite par Gérin-Lajoie en 2008 (Gérin-Lajoie et al., 2008). Enfin, le simple fait de porter un casque modifie nécessairement les stratégies adoptées par ce quadrat, par l'encombrement ; pour exemple, selon Willemsen, ne considérant que la perception des distances, il existerait une différence significative et une sous-estimation des distances par le port d'un casque de réalité virtuelle comparativement aux conditions de perception dites naturelles (Willemsen et al., 2004). En conséquence, les conséquences ne seraient pas étonnantes sur des activités neuromusculaires tels que sur le réflexe oculo-céphalogyre ; mais ceci n'est qu'une simple hypothèse.

Un autre élément qui pourrait faire débat vient du fait qu'aucune partie du corps n'est visible pour le participant en situation virtuelle ; en effet, par le port d'un casque de réalité virtuelle, le participant ne voit ni ses mains, ni ses épaules, ni ses pieds. Pourrait-on alors considérer que ce manque d'informations influence ses réactions comportementales ?

Une autre question que l'on pourrait également soulever vient de l'analyse du comportement visuel ; dans cette étude, le regard a fait le fruit d'une analyse en lien avec les objets fixés par la Fovéa. Il s'agit bien alors de l'analyse de la vision centrale par la durée de fixation rétinienne sur un objet. Mais des stratégies d'évitement peuvent être observées en l'absence de fixation de l'objet évité, par le biais de la vision parafovéal ou périphérique spécialisée dans la détection du mouvement (Berthoz, 1996; Croft & Panchuk, 2018; Meerhoff,

Bruneau, et al., 2018). Alors quel rôle jouerait cette vision « périphérique » dans les interactions visuo-locomotrices lors de la navigation dans un environnement complexe? Plus, parce que cette capacité visuelle de détecter les mouvements de l'environnement pourrait être considérée dans les stratégies locomotrices, ne pourrait on pas imaginer que la présence de troubles de l'attention ne vienne perturber à la fois la détection du mouvement par la vision périphérique et le maintien de son attention fixé sur un objet, soit une forme d'attention ou de vigilance visuelle (Benassi et al., 2021), au même titre que les situations de double-tâche sont également problématique spécifiquement dans cette population (Cossette et al., 2014; Gagné et al., 2019)?

Dans cette expérimentation, il a été question de la fiabilité de l'outil « réalité virtuelle » et des potentiels changements de comportement existants avec la situation réelle. Berton a pu mettre en évidence que le comportement du regard était tout-à-fait similaire entre les deux situations au regard des métriques analysés (Berton et al., 2020). Quelques travaux (Bühler & Lamontagne, 2019; Cano Porras et al., 2018; Levac et al., 2019; Muhla, 2020) se sont interrogés sur la validité de l'outil « VR » sur les capacités motrices et locomotrices et de l'existence de potentiels changements des comportements locomoteurs entre situation réelle et réalité virtuelle. La question de la transférabilité des acquis entre expérience virtuelle et réelle est un enjeu notamment dans le domaine de la réhabilitation. Même si ce dispositif permet une analyse sécurisée et la reproduction des conditions expérimentales à l'identique, comment interpréter les résultats observés et sont ils tout-à-fait transposables dans des conditions réelles ? Quelles perspectives sur la participation sociale ?

Si l'on évoque le dispositif virtuel mis en place dans cette expérimentation, il faut évoquer la question des agents virtuels et de l'incarnation ou « embodiment ». La largeur des épaules des agents est un élément qui détermine l'espacement entre individu ; c'est un élément qui semble être important dans la prise d'information du participant et dans la perspective de navigation (Bourgaize et al., 2021). La corpulence des agents inclus dans ce dispositif était sensiblement le même. Cela détermine sans aucun doute la disponibilité des trajets dans l'environnement. Et n'est évoquée ici que cette différence de profil-agent, question que l'on pourrait étendre à la taille, au morphotype plus généralement.

En lien avec la distribution aléatoire de la densité des agents virtuels dans l'environnement, la disposition spatiale des avatars a été réalisée pour chacun d'entre eux, en respectant la contrainte de densité ; chaque agent est aléatoirement et individuellement disposé pour répondre à la contrainte de densité prédéfinie. Cela impose une interaction participant-agent virtuel

individuellement. En situation réelle, nos interactions et nos choix sont guidés par la représentation et l'identification que l'on pourrait avoir d'un groupe d'humains, couple ou famille, et considéré comme « unitaire » ; cette identification aurait un effet sur les stratégies envisageables et sur les trajets à emprunter dans l'environnement. Comment l'identification d'un groupe d'humains influence les stratégies visuo-locomotrices mises en place dans la réalisation de tâche de navigation dans un environnement dynamique ?

La situation expérimentale fait interagir dans un espace complexe un participant avec des agents virtuels statiques ; les réponses observées et les stratégies mises en place ne permettent pas de transposer ces résultats à des situations où la foule est mobile et dont le comportement est hétérogène. Il semble qu'au regard de notre connaissance les stratégies d'évitement et de contournement ainsi que l'activité du regard seraient différentes entre objets ou agents virtuels statique et mobile (Cutting et al., 2014; Gérin-Lajoie et al., 2005).

Les comportements visuo-locomoteurs et les stratégies d'évitement ou de contournement en environnement dynamique observées dans une population présentant des lésions cranio-cérébrales d'origine traumatique seraient elles aussi prudentes voire même plus conservatrices dans un environnement complexe plus hétérogène ?

Cette étude porte sur une population porteuse de lésions neurologiques cranio-cérébrale d'origine traumatique ; il s'agit d'une situation pathologique acquise lors d'un épisode traumatique. Qu'en est il dans le cadre d'autres pathologies neurologiques acquises ? Quelles sont les effets des lésions neurologiques acquises, consécutives à une paralysie cérébrale ou un accident vasculaire cérébral, présentes dans une population spécifiquement lors de la réalisation d'une tâche locomotrice et des stratégies visuo-locomotrices adoptées en environnement peuplée ? Qu'en est il dans le cadre de pathologies neurologiques évolutives ?

Enfin, il ne serait pas possible d'éluder ici la question de l'influence des représentations sociales sur les stratégies visuo-locomotrices mais cette interrogation paraît malgré tout importante ; l'outil « réalité virtuelle » par le casque HMD propose une solution portable, sécurisante et reproduit à l'identique des conditions environnementales que chacun d'entre nous croise plusieurs fois par jour ; instinctivement et intuitivement, notre perception de l'environnement et nos réactions sont influencées par le comportement des personnes naviguant et faisant partie intégrante de ce contexte ; et il n'est pas rare de voir des changements de comportements locomoteurs adoptés en fonction des interactions sociales présumées ou

prédites. Dans cette expérimentation, la distribution générée des avatars s'est fait aléatoirement ; dans d'autres études faisant intervenir des agents virtuels, un vaste panel d'avatars, de différents genre, origine ou apparence vestimentaire, est proposé à chaque participant en lui demandant de choisir avec lequel il souhaiterait évoluer dans l'environnement. Cela contribue à installer un espace social virtuel favorisant. Cela n'est évidemment pas le reflet de la réalité. Les interactions adoptées dans nos espaces quotidiens font nécessairement appel aux représentations sociales. Plus encore, le comportement ou l'attitude corporel de chaque individu est un reflet personnel et a sa propre part de contribution dans les stratégies adoptées lors d'interactions. Cela pose la question des interactions adoptées dépendant des comportements moteurs, locomoteurs, corporels mais aussi des comportements sociaux. On pourrait donc s'interroger sur l'influence des compétences sociales dans le choix des stratégies adoptées et de la part de celles-ci dans les interactions en environnement peuplé.

Une des limites que cette expérimentation possède vient de l'utilisation de certaines échelles ; en effet, deux échelles utilisées dans ce protocole ne sont pas traduites ni validées en langue française, l'échelle ICARS et le Wayfinding Questionnaire. Cela amène à s'interroger sur les résultats obtenues et sur l'analyse de ces résultats. Une perspective intéressante à moyen terme serait de pouvoir proposer une version validée et traduite en langue française de ces deux évaluations dans de futures travaux.

Une autre limite que cette étude peut comporter tient au nombre d'inclusions dans les deux groupes ; le faible échantillonnage aura certainement un effet sur les résultats obtenus et sur la puissance statistique des tests effectués. Il conviendrait alors d'envisager sur de futurs travaux une taille d'échantillon plus importante, en procédant par exemple à une investigation multicentrique ou bien à élargir les critères d'inclusions, comme l'âge ou l'ancienneté de la lésion; il conviendra alors d'avoir un regard critique sur les analyses des résultats pouvant être directement impactés par l'inclusion d'une population plus large et plus hétérogène d'un point de vue clinique. Relatif à l'âge, le choix a été effectué de ne pas considérer une population dont l'âge dépassait 55 ans ; l'objectif était de pouvoir s'épargner les effets du vieillissement sur les fonctions cognitives, exécutives, locomotrices, visuelles ou de navigation, qui pourraient se confondre avec les lésions provoquées par le traumatisme crânien.

En conclusion, l'ensemble des points évoqués ci-dessus ne peuvent exister sans l'interprétation des résultats attendus de cette étude ; des derniers seront donc particulièrement intéressants pour évoquer raisonnablement des futures perspectives et poursuites à donner à ce

travail, des futures développements et des potentielles collaborations à envisager et des axes de réflexion à mener.

Conclusion

Quel est l'impact de la lésion cérébrale d'origine traumatique, de gravité modérée à sévère, sur les comportements visuo-locomoteurs en interaction avec des piétons ? C'est la question à laquelle nous tenterons de répondre à travers ces expérimentations. Les personnes porteuses de séquelles de lésions cranio-cérébrales d'origine traumatique, au-delà des conséquences liées aux lésions initiales, présentent une persistance de difficultés dans plusieurs fonctions fondamentales, consécutives au traumatisme, et bien connues ; les liens potentiellement existants entre désordres visuo-locomoteurs, dysfonctions exécutives, navigation dans des environnements proches du quotidien et impacts socio-participatifs, sont à notre connaissance et encore à l'heure actuelle mal renseignés.

Il n'est pas possible de conclure actuellement sur les effets potentiels des lésions évoquées et des liens apparents avec les difficultés de navigation spécifiquement dans la population envisagée dans cette étude.

Les documents éthiques sont en cours de relecture avant soumission auprès des autorités pour validation ; la projection envisage un lancement définitif du protocole dès le mois de septembre 2022 et les premiers résultats seront connus au début de l'année 2023.

Il paraît difficile de se projeter sans connaître véritablement de quelle façon les personnes porteuses de troubles réagiront face à ce nouveau paradigme d'évaluation ; les enjeux sont particulièrement importants puisqu'il pourrait s'agir d'une expérimentation mettant en lumière la collaboration entre sciences digitales, recherche dans le domaine du mouvement et monde clinique. La littérature particulièrement riche dans ces domaines impose un travail bibliographique conséquent et conjoint de mise en commun des connaissances dans ces trois domaines. La complémentarité des compétences requises dans des perspectives futures paraît être fondamentale pour les poursuites de ces travaux.

L'évolution des pratiques cliniques en rééducation par l'inclusion grandissante d'outils technologiques est un axe fort des prochaines années et des politiques à horizon 2030 (*Plan Innovation santé 2030*, s. d.) ; les perspectives d'investissement énoncées dans un communiqué de presse présidentiel en 2021 ont évoqué plus de 200 propositions autour de la recherche et de la santé, supportées par trois ministères, celui de l'enseignement supérieur de la recherche et de

l'innovation, celui des solidarités et de la santé et enfin celui de l'économie, des finances et de la relance.

De futurs projets nécessitent de poursuivre les investigations pour mieux identifier et améliorer notre compréhension des désordres provoqués par ce traumatisme et de leurs conséquences sur les troubles du comportement, les difficultés de naviguer dans des espaces du quotidien et envisager de meilleures perspectives de participation socio-professionnelle, comme ils le diraient, à une vie « comme avant ».

Bibliographie

- Andelic, N., Arango-Lasprilla, J. C., Perrin, P. B., Sigurdardottir, S., Lu, J., Landa, L. O., Forslund, M. V., & Roe, C. (2016). Modeling of community integration trajectories in the first five years after traumatic brain injury. *Journal of Neurotrauma*, 33(1), 95-100. <https://doi.org/10.1089/neu.2014.3844>
- Andelic, N., Soberg, H. L., Berntsen, S., Sigurdardottir, S., & Roe, C. (2014). Self-perceived health care needs and delivery of health care services 5 years after moderate-to-severe traumatic brain injury. *PM & R: The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, 6(11), 1013-1021; quiz 1021. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2014.05.005>
- Andelic, N., Stevens, L. F., Sigurdardottir, S., Arango-Lasprilla, J. C., & Roe, C. (2012). Associations between disability and employment 1 year after traumatic brain injury in a working age population. *Brain Injury*, 26(3), 261-269. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.654589>
- Anderson, D., Campos, J., Witherington, D., Dahl, A., Rivera, M., He, M., Uchiyama, I., & Barbu-Roth, M. (2013). The role of locomotion in psychological development. *Frontiers in Psychology*, 4, 440. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00440>
- Armstrong, R. A. (2018). Visual problems associated with traumatic brain injury. *Clinical and Experimental Optometry*, 101(6), 716-726. <https://doi.org/10.1111/cxo.12670>
- Arrêté du 12 avril 2018 fixant la liste des recherches mentionnées au 2° de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique.
- Article L1121-13—Code de la santé publique—Légifrance. Consulté 22 décembre 2021, à l'adresse https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000036515061/

- Azouvi, P., Arnould, A., Dromer, E., & Vallat-Azouvi, C. (2017). Neuropsychology of traumatic brain injury : An expert overview. *Revue Neurologique*, 173(7-8), 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2017.07.006>
- Basford, J. R., Chou, L.-S., Kaufman, K. R., Brey, R. H., Walker, A., Malec, J. F., Moessner, A. M., & Brown, A. W. (2003). An assessment of gait and balance deficits after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84(3), 343-349. <https://doi.org/10.1053/apmr.2003.50034>
- Belanger, H. G., Curtiss, G., Demery, J. A., Lebowitz, B. K., & Vanderploeg, R. D. (2005). Factors moderating neuropsychological outcomes following mild traumatic brain injury : A meta-analysis. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 11(3), 215-227. <https://doi.org/10.1017/S1355617705050277>
- Benassi, M., Frattini, D., Garofalo, S., Bolzani, R., & Pansell, T. (2021). Visuo-motor integration, vision perception and attention in mTBI patients. Preliminary findings. *PLOS ONE*, 16(4), e0250598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250598>
- Benedictus, M. R., Spikman, J. M., & van der Naalt, J. (2010). Cognitive and behavioral impairment in traumatic brain injury related to outcome and return to work. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 91(9), 1436-1441. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2010.06.019>
- Berg, K., Wood-Dauphine, S., Williams, J. i., & Gayton, D. (1989). Measuring balance in the elderly : Preliminary development of an instrument. *Physiotherapy Canada*, 41(6), 304-311. <https://doi.org/10.3138/ptc.41.6.304>
- Berthoz, A. (1996). Chapitre 3—La construction d'une cohérence. In *Le sens du Mouvement* (Odile Jacob, p. p65-105).

- Berton, F., Hoyet, L., Olivier, A.-H., Bruneau, J., Le Meur, O., & Pettre, J. (2020). Eye-Gaze Activity in Crowds : Impact of Virtual Reality and Density. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 322-331. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00052>
- 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. <https://doi.org/10.1093/ageing/26.1.15>
- Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the simulator sickness questionnaire. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 5, 128-137.
- Bourgaize, S. M., McFadyen, B. J., & Cinelli, M. E. (2021). Collision avoidance behaviours when circumventing people of different sizes in various positions and locations. *Journal of Motor Behavior*, 53(2), 166-175. <https://doi.org/10.1080/00222895.2020.1742083>
- Brazinova, A., Rehorcikova, V., Taylor, M. S., Buckova, V., Majdan, M., Psota, M., Peeters, W., Feigin, V., Theadom, A., Holkovic, L., & Synnot, A. (2021). Epidemiology of Traumatic Brain Injury in Europe : A Living Systematic Review. *Journal of Neurotrauma*, 38(10), 1411-1440. <https://doi.org/10.1089/neu.2015.4126>
- Bühler, M. A., & Lamontagne, A. (2019). Locomotor circumvention strategies in response to static pedestrians in a virtual and physical environment. *Gait & Posture*, 68, 201-206. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.10.004>
- Buster, T. W., Chernyavskiy, P., Harms, N. R., Kaste, E. G., & Burnfield, J. M. (2016). Computerized dynamic posturography detects balance deficits in individuals with a history of chronic severe traumatic brain injury. *Brain Injury*, 30(10), 1249-1255. <https://doi.org/10.1080/02699052.2016.1183822>

- Cano Porras, D., Siemonsma, P., Inzelberg, R., Zeilig, G., & Plotnik, M. (2018). Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait : Systematic review. *Neurology*, *90*(22), 1017-1025. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000005603>
- Cantin, J.-F., McFadyen, B. J., Doyon, J., Swaine, B., Dumas, D., & Vallée, M. (2007). Can measures of cognitive function predict locomotor behaviour in complex environments following a traumatic brain injury? *Brain Injury*, *21*(3), 327-334. <https://doi.org/10.1080/02699050701209972>
- Cicerone, K. D. (2004). Participation as an outcome of traumatic brain injury rehabilitation. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *19*(6), 494-501. <https://doi.org/10.1097/00001199-200411000-00006>
- Cicerone, K. D., & Kalmar, K. (1995). Persistent postconcussion syndrome : The structure of subjective complaints after mild traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *10*(3), 1-17. <https://doi.org/10.1097/00001199-199510030-00002>
- Cifu, D. X., Wares, J. R., Hoke, K. W., Wetzel, P. A., Gitchel, G., & Carne, W. (2015). Differential eye movements in mild traumatic brain injury versus normal controls. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *30*(1), 21-28. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000036>
- Ciuffreda, K. J. (2002). The scientific basis for and efficacy of optometric vision therapy in nonstrabismic accommodative and vergence disorders. *Optometry (St. Louis, Mo.)*, *73*(12), 735-762.
- Ciuffreda, K. J., Kapoor, N., Rutner, D., Suchoff, I. B., Han, M. E., & Craig, S. (2007). Occurrence of oculomotor dysfunctions in acquired brain injury : A retrospective analysis. *Optometry (St. Louis, Mo.)*, *78*(4), 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2006.11.011>

- Ciuffreda, K. J., Ludlam, D., & Thiagarajan, P. (2011). Oculomotor diagnostic protocol for the mTBI population. *Optometry (St. Louis, Mo.)*, 82(2), 61-63. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2010.11.011>
- Claessen, M. H. G., & van der Ham, I. J. M. (2017). Classification of navigation impairment : A systematic review of neuropsychological case studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 73, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.12.015>
- Clark, D. J. (2015). Automaticity of walking : Functional significance, mechanisms, measurement and rehabilitation strategies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 246. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00246>
- CNFS. (s. d.). *Échelle d'évaluation de l'équilibre de Berg (BBS)*. Consulté 7 mai 2022, à l'adresse <https://cnfs.ca/agees/tests/mesurer-la-capacite-physique/echelle-d-evaluation-de-l-equilibre-de-berg-bbs>
- Colantonio, A., Ratcliff, G., Chase, S., Kelsey, S., Escobar, M., & Vernich, L. (2004). Long-term outcomes after moderate to severe traumatic brain injury. *Disability and Rehabilitation*, 26(5), 253-261. <https://doi.org/10.1080/09638280310001639722>
- Collewyn, H., & Tamminga, E. P. (1986). Human fixation and pursuit in normal and open-loop conditions : Effects of central and peripheral retinal targets. *The Journal of Physiology*, 379, 109-129.
- Cossette, I., Ouellet, M.-C., & McFadyen, B. J. (2014). A preliminary study to identify locomotor-cognitive dual tasks that reveal persistent executive dysfunction after mild traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 95(8), 1594-1597. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.03.019>

- Croft, J. L., Button, C., & Dicks, M. (2010). Visual strategies of sub-elite cricket batsmen in response to different ball velocities. *Human Movement Science, 29*(5), 751-763. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2009.10.004>
- Croft, J. L., & Panchuk, D. (2018). Watch Where You're Going? Interferer Velocity and Visual Behavior Predicts Avoidance Strategy During Pedestrian Encounters. *Journal of Motor Behavior, 50*(4), 353-363. <https://doi.org/10.1080/00222895.2017.1363695>
- Cullen, S., Montero-Odasso, M., Bherer, L., Almeida, Q., Fraser, S., Muir-Hunter, S., Li, K., Liu-Ambrose, T., McGibbon, C. A., McIlroy, W., Middleton, L. E., Sarquis-Adamson, Y., Beauchet, O., McFadyen, B. J., Morais, J. A., & Camicioli, R. (2018). Guidelines for Gait Assessments in the Canadian Consortium on Neurodegeneration in Aging (CCNA). *Canadian Geriatrics Journal, 21*(2), 157-165. <https://doi.org/10.5770/cgj.21.298>
- Cutting, J., Vishton, P., & Barren, P. (2014). *How we avoid collisions with stationary and moving obstacles.*
- Darekar, A., Lamontagne, A., & Fung, J. (2017). Locomotor circumvention strategies are altered by stroke: I. Obstacle clearance. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 14*(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0264-8>
- Deblock-Bellamy, A., Lamontagne, A., McFadyen, B. J., Ouellet, M.-C., & Blanchette, A. K. (2021). Virtual reality-based assessment of cognitive-locomotor interference in healthy young adults. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 18*(1), 53. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00834-2>
- Décret n° 2016-1537 du 16 novembre 2016 relatif aux recherches impliquant la personne humaine, 2016-1537 (2016).

Délibération n° 2016-263 du 21 juillet 2016—Légifrance. Consulté 16 novembre 2021, à

l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000033028290>

de Rooij, N. K., Claessen, M. H. G., van der Ham, I. J. M., Post, M. W. M., & Visser-Meily, J.

M. A. (2019). The Wayfinding Questionnaire : A clinically useful self-report instrument to identify navigation complaints in stroke patients. *Neuropsychological Rehabilitation*, 29(7), 1042-1061. <https://doi.org/10.1080/09602011.2017.1347098>

Dever, A., Powell, D., Graham, L., Mason, R., Das, J., Marshall, S. J., Vitorio, R., Godfrey, A.,

& Stuart, S. (2022). Gait Impairment in Traumatic Brain Injury : A Systematic Review. *Sensors*, 22(4), 1480. <https://doi.org/10.3390/s22041480>

Dewan, M. C., Rattani, A., Gupta, S., Baticulon, R. E., Hung, Y.-C., Punchak, M., Agrawal,

A., Adeleye, A. O., Shrime, M. G., Rubiano, A. M., Rosenfeld, J. V., & Park, K. B. (2018). Estimating the global incidence of traumatic brain injury. *Journal of Neurosurgery*, 130(4), 1080-1097. <https://doi.org/10.3171/2017.10.JNS17352>

Dymowski, A. R., Owens, J. A., Ponsford, J. L., & Willmott, C. (2015). Speed of processing

and strategic control of attention after traumatic brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 37(10), 1024-1035. <https://doi.org/10.1080/13803395.2015.1074663>

Eagle, S. R., Nindl, B. C., Johnson, C. D., Kontos, A. P., & Connaboy, C. (2021). Does

Concussion Affect Perception-Action Coupling Behavior? Action Boundary Perception as a Biomarker for Concussion. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 31(3), 273-280. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000731>

- Emmah Doig, J. F., Leigh Tooth. (2001). Patterns of community integration 2-5 years post-discharge from brain injury rehabilitation. *Brain Injury*, 15(9), 747-762. <https://doi.org/10.1080/02699050119845>
- Fait, P., McFadyen, B. J., Swaine, B., & Cantin, J. F. (2009). Alterations to locomotor navigation in a complex environment at 7 and 30 days following a concussion in an elite athlete. *Brain Injury*, 23(4), 362-369. <https://doi.org/10.1080/02699050902788485>
- Fajen, B. (2013). Guiding locomotion in complex, dynamic environments. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnbeh.2013.00085>
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(2), 343-362. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.2.343>
- Délibération n° 2018-153 du 3 mai 2018, Pub. L. No. CNIL1818702x (2018). <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037187386>
- Faul, M., Xu, I, Wald, M., & Coronado, V. (2010). *Traumatic Brain Injury in the United States : Emergency Department Visits, Hospitalizations and Deaths 2002–2006*.
- Filiatrault, J., Gauvin, L., Fournier, M., Parisien, M., Robitaille, Y., Laforest, S., Corriveau, H., & Richard, L. (2007). Evidence of the psychometric qualities of a simplified version of the Activities-specific Balance Confidence scale for community-dwelling seniors. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88(5), 664-672. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.02.003>
- Finley, J.-C., Matusz, E. F., & Parente, F. (2021). Cognitive differences between adults with traumatic brain injury and specific learning disorder. *Brain Injury*, 35(4), 411-415. <https://doi.org/10.1080/02699052.2021.1878552>

- Fino, P. C., Parrington, L., Pitt, W., Martini, D. N., Chesnutt, J. C., Chou, L.-S., & King, L. A. (2018). Detecting gait abnormalities after concussion or mild traumatic brain injury : A systematic review of single-task, dual-task, and complex gait. *Gait & Posture*, *62*, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.021>
- Gagné, M.-È., McFadyen, B. J., Cossette, I., Fait, P., Gagnon, I., Sirois, K., Blanchet, S., Le Sage, N., & Ouellet, M.-C. (2019). Alterations in dual-task walking persist two months after mild traumatic brain injury in young adults. *Journal of Concussion*, *3*, 2059700219878291. <https://doi.org/10.1177/2059700219878291>
- Gagné, M.-È., McFadyen, B. J., & Ouellet, M.-C. (2021). Performance during dual-task walking in a corridor after mild traumatic brain injury : A potential functional marker to assist return-to-function decisions. *Brain Injury*, *35*(2), 173-179. <https://doi.org/10.1080/02699052.2020.1863467>
- Gardner, R. C., & Yaffe, K. (2015). Epidemiology of mild traumatic brain injury and neurodegenerative disease. *Molecular and Cellular Neuroscience*, *66*, 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.mcn.2015.03.001>
- GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators. (2019). Global, regional, and national burden of traumatic brain injury and spinal cord injury, 1990-2016 : A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *The Lancet. Neurology*, *18*(1), 56-87. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(18\)30415-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(18)30415-0)
- Géodes—Santé publique France—Indicateurs : Cartes, données et graphiques. (s. d.). Consulté 28 août 2021, à l'adresse https://geodes.santepubliquefrance.fr/#c=indicator&f=0&f2=0&i=cardio_avc.0&i2=cardio_morta_avc.0_morta_txstd&s=2019&s2=2016&t=a01&t2=a01&view=map2

- Gérin-Lajoie, M., Richards, C. L., Fung, J., & McFadyen, B. J. (2008). Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments. *Gait & Posture*, 27(2), 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.03.015>
- Gérin-Lajoie, M., Richards, C. L., & McFadyen, B. J. (2005). The negotiation of stationary and moving obstructions during walking: Anticipatory locomotor adaptations and preservation of personal space. *Motor Control*, 9(3), 242-269. <https://doi.org/10.1123/mcj.9.3.242>
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception—AbeBooks—Gibson, James J. : 0395270499* (Houghton Mifflin). <https://www.abebooks.fr/9780395270493/Ecological-Approach-Visual-Perception-Gibson-0395270499/plp>
- Gormley, M., Devanaboyina, M., Andelic, N., Røe, C., Seel, R. T., & Lu, J. (2019). Long-term employment outcomes following moderate to severe traumatic brain injury: A systematic review and meta-analysis. *Brain Injury*, 33(13-14), 1567-1580. <https://doi.org/10.1080/02699052.2019.1658222>
- Goulter, J. R., Fitzpatrick, L. E., & Crowe, S. F. (2021). An analysis of distinct navigational domains and topographical disorientation syndromes in ABI: A meta-analysis. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 43(5), 449-468. <https://doi.org/10.1080/13803395.2021.1926933>
- Haarbauer-Krupa, J., Pugh, M. J., Prager, E. M., Harmon, N., Wolfe, J., & Yaffe, K. (2021). Epidemiology of Chronic Effects of Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurotrauma*. <https://doi.org/10.1089/neu.2021.0062>
- Hays, K., Tefertiller, C., Ketchum, J. M., Sevigny, M., O'Dell, D. R., Natale, A., Eagye, C. B., & Harrison-Felix, C. (2019). Balance in chronic traumatic brain injury: Correlations

- between clinical measures and a self-report measure. *Brain Injury*, 33(4), 435-441.
<https://doi.org/10.1080/02699052.2019.1565900>
- Heitger, M. H., Jones, R. D., Dalrymple-Alford, J. C., Frampton, C. M., Ardagh, M. W., & Anderson, T. J. (2006). Motor deficits and recovery during the first year following mild closed head injury. *Brain Injury*, 20(8), 807-824.
<https://doi.org/10.1080/02699050600676354>
- Hunt, A. W., Mah, K., Reed, N., Engel, L., & Keightley, M. (2016). Oculomotor-Based Vision Assessment in Mild Traumatic Brain Injury : A Systematic Review. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 31(4), 252-261.
<https://doi.org/10.1097/HTR.000000000000174>
- Iaccarino, M. A., Bhatnagar, S., & Zafonte, R. (2015). Rehabilitation after traumatic brain injury. *Handbook of Clinical Neurology*, 127, 411-422. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52892-6.00026-X>
- Jourdan, C., Azouvi, P., Genêt, F., Selly, N., Jossieran, L., & Schnitzler, A. (2018). Disability and Health Consequences of Traumatic Brain Injury : National Prevalence. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 97(5), 323-331.
<https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000000848>
- Katz, D. I., Polyak, M., Coughlan, D., Nichols, M., & Roche, A. (2009). Natural history of recovery from brain injury after prolonged disorders of consciousness : Outcome of patients admitted to inpatient rehabilitation with 1-4 year follow-up. *Progress in Brain Research*, 177, 73-88. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(09\)17707-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(09)17707-5)
- Katz, D. I., White, D. K., Alexander, M. P., & Klein, R. B. (2004). Recovery of ambulation after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 865-869. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.11.020>

- Kaufman, K. R., Brey, R. H., Chou, L.-S., Rabatin, A., Brown, A. W., & Basford, J. R. (2006). Comparison of subjective and objective measurements of balance disorders following traumatic brain injury. *Medical Engineering & Physics*, 28(3), 234-239. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2005.05.005>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kersey, J., McCue, M., & Skidmore, E. (2020). Domains and dimensions of community participation following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 34(6), 708-712. <https://doi.org/10.1080/02699052.2020.1757153>
- Keshner, E. A., & Lamontagne, A. (2021). The Untapped Potential of Virtual Reality in Rehabilitation of Balance and Gait in Neurological Disorders. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 641650. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.641650>
- Klima, D., Morgan, L., Baylor, M., Reilly, C., Gladmon, D., & Davey, A. (2019). Physical Performance and Fall Risk in Persons With Traumatic Brain Injury. *Perceptual and Motor Skills*, 126(1), 50-69. <https://doi.org/10.1177/0031512518809203>
- Kozlowski, D. A., Leasure, J. L., & Schallert, T. (2013). The control of movement following traumatic brain injury. *Comprehensive Physiology*, 3(1), 121-139. <https://doi.org/10.1002/cphy.c110005>
- Kraus, M. F., Susmaras, T., Caughlin, B. P., Walker, C. J., Sweeney, J. A., & Little, D. M. (2007). White matter integrity and cognition in chronic traumatic brain injury: A diffusion tensor imaging study. *Brain: A Journal of Neurology*, 130(Pt 10), 2508-2519. <https://doi.org/10.1093/brain/awm216>

- Krauss, J. K. (2015). Chapter 30—Movement disorders secondary to craniocerebral trauma. In J. Grafman & A. M. Salazar (Éds.), *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 128, p. 475-496). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63521-1.00030-3>
- Krauss, J. K., Tränkle, R., & Kopp, K. H. (1997). Posttraumatic movement disorders after moderate or mild head injury. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 12(3), 428-431. <https://doi.org/10.1002/mds.870120326>
- Krauss, J. K., Trankle, R., & Kopp, K.-H. (1996). Post-traumatic movement disorders in survivors of severe head injury. *Neurology*, 47(6), 1488-1492. <https://doi.org/10.1212/WNL.47.6.1488>
- Labi, M. L. C., Brentjens, M., Lou Coad, M., Flynn, W. J., & Zielezny, M. (2003). Development of a longitudinal study of complications and functional outcomes after traumatic brain injury. *Brain Injury*, 17(4), 265-278. <https://doi.org/10.1080/0269905021000038410>
- Lama, S., Damkliang, J., & Kitrungrote, L. (2020). Community Integration After Traumatic Brain Injury and Related Factors : A Study in the Nepalese Context. *SAGE Open Nursing*, 6, 2377960820981788. <https://doi.org/10.1177/2377960820981788>
- Lamontagne, M.-E., Poncet, F., Careau, E., Sirois, M.-J., & Boucher, N. (2013). Life habits performance of individuals with brain injury in different living environments. *Brain Injury*, 27(2), 135-144. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.722253>
- Levac, D. E., Huber, M. E., & Sternad, D. (2019). Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality : A perspective review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 16(1), 121. <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0587-8>
- Lippert-Grüner, M., Kuchta, J., Hellmich, M., & Klug, N. (2006). Neurobehavioural deficits after severe traumatic brain injury (TBI). *Brain Injury*, 20(6), 569-574. <https://doi.org/10.1080/02699050600664467>

- Lirani-Silva, E., Stuart, S., Parrington, L., Campbell, K., & King, L. (2021). Saccade and Fixation Eye Movements During Walking in People With Mild Traumatic Brain Injury. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 701712. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.701712>
- Maiden, M. J., Cameron, P. A., Rosenfeld, J. V., Cooper, D. J., McLellan, S., & Gabbe, B. J. (2020). Long-Term Outcomes after Severe Traumatic Brain Injury in Older Adults. A Registry-based Cohort Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 201(2), 167-177. <https://doi.org/10.1164/rccm.201903-0673OC>
- Mani, K., Cater, B., & Hudlikar, A. (2017). Cognition and return to work after mild/moderate traumatic brain injury : A systematic review. *Work (Reading, Mass.)*, 58(1), 51-62. <https://doi.org/10.3233/WOR-172597>
- Mani, R., Asper, L., & Khuu, S. K. (2018). Deficits in saccades and smooth-pursuit eye movements in adults with traumatic brain injury : A systematic review and meta-analysis. *Brain Injury*, 32(11), 1315-1336. <https://doi.org/10.1080/02699052.2018.1483030>
- Manivannan, S., Al-Amri, M., Postans, M., Westacott, L. J., Gray, W., & Zaben, M. (2019). The Effectiveness of Virtual Reality Interventions for Improvement of Neurocognitive Performance After Traumatic Brain Injury : A Systematic Review. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 34(2), E52-E65. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000412>
- Marigold, D. S., & Patla, A. E. (2007). Gaze fixation patterns for negotiating complex ground terrain. *Neuroscience*, 144(1), 302-313. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2006.09.006>

- Mathé, J. F., Richard, I., & Rome, J. (2005). Santé publique et traumatismes crâniens graves. Aspects épidémiologiques et financiers, structures et filières de soins. *Annales françaises d'Anesthésie et de réanimation*, 24(6), 688-694. <https://doi.org/10.1016/j.annfar.2005.03.029>
- Mathias, J. L., & Wheaton, P. (2007). Changes in attention and information-processing speed following severe traumatic brain injury : A meta-analytic review. *Neuropsychology*, 21(2), 212-223. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.21.2.212>
- McFadyen, B. J., Cantin, J.-F., Swaine, B., Duchesneau, G., Doyon, J., Dumas, D., & Fait, P. (2009). Modality-specific, multitask locomotor deficits persist despite good recovery after a traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(9), 1596-1606. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.03.010>
- McFadyen, B. J., Gagné, M.-È., Cossette, I., & Ouellet, M.-C. (2017). Using dual task walking as an aid to assess executive dysfunction ecologically in neurological populations : A narrative review. *Neuropsychological Rehabilitation*, 27(5), 722-743. <https://doi.org/10.1080/09602011.2015.1100125>
- McFadyen, B. J., Swaine, B., Dumas, D., & Durand, A. (2003). Residual effects of a traumatic brain injury on locomotor capacity : A first study of spatiotemporal patterns during unobstructed and obstructed walking. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 18(6), 512-525. <https://doi.org/10.1097/00001199-200311000-00005>
- Mckee, A. C., & Daneshvar, D. H. (2015). The neuropathology of traumatic brain injury. *Handbook of Clinical Neurology*, 127, 45-66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52892-6.00004-0>
- Meerhoff, L. A., Bruneau, J., Vu, A., Olivier, A.-H., & Pettré, J. (2018). Guided by gaze : Prioritization strategy when navigating through a virtual crowd can be assessed through

- gaze activity. *Acta Psychologica*, 190, 248-257.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.07.009>
- Meerhoff, L. A., Pettré, J., Lynch, S. D., Crétual, A., & Olivier, A.-H. (2018). Collision Avoidance With Multiple Walkers : Sequential or Simultaneous Interactions? *Frontiers in Psychology*, 9, 2354. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02354>
- Merezhinskaya, N., Mallia, R. K., Park, D., Bryden, D. W., Mathur, K., & Barker, F. M. (2019). Visual Deficits and Dysfunctions Associated with Traumatic Brain Injury : A Systematic Review and Meta-analysis. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 96(8), 542-555.
<https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001407>
- Montello, daniel. (2005). Navigation. In *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (Cambridge University Press, p. 257-294).
- Moseley, A. M., Lanzarone, S., Bosman, J. M., van Loo, M. A., de Bie, R. A., Hassett, L., & Caplan, B. (2004). Ecological validity of walking speed assessment after traumatic brain injury : A pilot study. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 19(4), 341-348.
<https://doi.org/10.1097/00001199-200407000-00008>
- Muhla, F. (2020). *Impact de l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle immersive sur le contrôle moteur lors d'un Timed Up and Go*. Université de Lorraine.
- Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA : A brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695-699. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>
- Novakovic-Agopian, T., Kornblith, E., Abrams, G., McQuaid, J. R., Posecion, L., Burciaga, J., D'Esposito, M., & Chen, A. J. W. (2019). Long-term effects of executive function

- training among veterans with chronic TBI. *Brain Injury*, 33(12), 1513-1521.
<https://doi.org/10.1080/02699052.2019.1645357>
- Olivier, A.-H., Bruneau, J., Kulpa, R., & Pettre, J. (2018). Walking with Virtual People : Evaluation of Locomotion Interfaces in Dynamic Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(7), 2251-2263.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2714665>
- Olivier, A.-H., Marin, A., Crétual, A., & Pettré, J. (2012). Minimal predicted distance : A common metric for collision avoidance during pairwise interactions between walkers. *Gait & Posture*, 36(3), 399-404. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.03.021>
- Ozolins, B., Aimers, N., Parrington, L., & Pearce, A. J. (2016). Movement disorders and motor impairments following repeated head trauma : A systematic review of the literature 1990-2015. *Brain Injury*, 30(8), 937-947.
<https://doi.org/10.3109/02699052.2016.1147080>
- O'Neil-Pirozzi, T. M., Ketchum, J. M., Hammond, F. M., Philippus, A., Weber, E., & Dams-O'Connor, K. (2018). Physical, Cognitive, and Psychosocial Characteristics Associated With Mortality in Chronic TBI Survivors: A National Institute on Disability, Independent Living, and Rehabilitation Research Traumatic Brain Injury Model Systems Study. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 33(4), 237-245.
<https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000365>
- Patla, A. E. (1997). Understanding the roles of vision in the control of human locomotion. *Gait & Posture*, 5(1), 54-69. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(96\)01109-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(96)01109-5)
- Patla, A. E., Davies, T. C., & Niechwiej, E. (2004). Obstacle avoidance during locomotion using haptic information in normally sighted humans. *Experimental Brain Research*, 155(2), 173-185. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1714-z>

- Patla, A. E., Tomescu, S. S., & Ishac, M. G. A. (2004). What visual information is used for navigation around obstacles in a cluttered environment? *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 82(8-9), 682-692. <https://doi.org/10.1139/y04-058>
- Peeters, W., van den Brande, R., Polinder, S., Brazinova, A., Steyerberg, E. W., Lingsma, H. F., & Maas, A. I. R. (2015). Epidemiology of traumatic brain injury in Europe. *Acta Neurochirurgica*, 157(10), 1683-1696. <https://doi.org/10.1007/s00701-015-2512-7>
- Perry, jacquelin. (1992). *GAIT ANALYSIS : NORMAL AND PATHOLOGICAL FUNCTION* (Slack, Vol. 09). <https://www.jssm.org/hf.php?id=jssm-09-353.xml>
- Piponnier, J.-C., Forget, R., Gagnon, I., McKerral, M., Giguère, J.-F., & Faubert, J. (2016). First- and Second-Order Stimuli Reaction Time Measures Are Highly Sensitive to Mild Traumatic Brain Injuries. *Journal of Neurotrauma*, 33(2), 242-253. <https://doi.org/10.1089/neu.2014.3832>
- Plan Innovation santé 2030 : Faire de la France la première nation européenne innovante et souveraine en santé.* (s. d.). enseignementsup-recherche.gouv.fr. Consulté 8 mai 2022, à l'adresse <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/plan-innovation-sante-2030-faire-de-la-france-la-premiere-nation-europeenne-innovante-et-souveraine-48297>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1991.tb01616.x>
- Rabinowitz, A. R., & Levin, H. S. (2014). Cognitive sequelae of traumatic brain injury. *The Psychiatric Clinics of North America*, 37(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.psc.2013.11.004>

- Robitaille, N., Jackson, P. L., Hébert, L. J., Mercier, C., Bouyer, L. J., Fecteau, S., Richards, C. L., & McFadyen, B. J. (2017). A Virtual Reality avatar interaction (VRai) platform to assess residual executive dysfunction in active military personnel with previous mild traumatic brain injury : Proof of concept. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, *12*(7), 758-764. <https://doi.org/10.1080/17483107.2016.1229048>
- Ruet, A., Bayen, E., Jourdan, C., Ghout, I., Meaude, L., Lalanne, A., Pradat-Diehl, P., Nelson, G., Charanton, J., Aegerter, P., Vallat-Azouvi, C., & Azouvi, P. (2019). A Detailed Overview of Long-Term Outcomes in Severe Traumatic Brain Injury Eight Years Post-injury. *Frontiers in Neurology*, *10*, 120. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00120>
- Ruff, R. M., Marshall, L. F., Crouch, J., Klauber, M. R., Levin, H. S., Barth, J., Kreutzer, J., Blunt, B. A., Foulkes, M. A., Eisenberg, H. M., Jane, J. A., & Marmarou, A. (1993). Predictors of outcome following severe head trauma : Follow-up data from the Traumatic Coma Data Bank. *Brain Injury*, *7*(2), 101-111. <https://doi.org/10.3109/02699059309008164>
- Salbach, N. M., Mayo, N. E., Hanley, J. A., Richards, C. L., & Wood-Dauphinee, S. (2006). Psychometric evaluation of the original and Canadian French version of the activities-specific balance confidence scale among people with stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *87*(12), 1597-1604. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.08.336>
- Saltychev, M., Eskola, M., Tenovu, O., & Laimi, K. (2013). Return to work after traumatic brain injury : Systematic review. *Brain Injury*, *27*(13-14), 1516-1527. <https://doi.org/10.3109/02699052.2013.831131>
- Scaratti, C., Leonardi, M., Sattin, D., Schiavolin, S., Willems, M., & Raggi, A. (2017). Work-related difficulties in patients with traumatic brain injury : A systematic review on

- predictors and associated factors. *Disability and Rehabilitation*, 39(9), 847-855.
<https://doi.org/10.3109/09638288.2016.1162854>
- Schaefer, S. (2014). The ecological approach to cognitive–motor dual-tasking : Findings on the effects of expertise and age. *Frontiers in Psychology*, 5, 1167.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01167>
- Schretlen, D. J., & Shapiro, A. M. (2003). A quantitative review of the effects of traumatic brain injury on cognitive functioning. *International Review of Psychiatry (Abingdon, England)*, 15(4), 341-349. <https://doi.org/10.1080/09540260310001606728>
- Shukla, D., Devi, B. I., & Agrawal, A. (2011). Outcome measures for traumatic brain injury. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 113(6), 435-441.
<https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2011.02.013>
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (2016). *Motor Control. Translating Research Into Clinical Practice 5th edition—Anne Shumway-Cook, Marjorie Woollacott* (5eme éd.). Lippincott Williams Wilkins. <https://www.decitre.fr/livres/motor-control-9781496302632.html>
- Sohlberg, M. M., Todis, B., Fickas, S., Hung, P.-F., & Lemoncello, R. (2005). A profile of community navigation in adults with chronic cognitive impairments. *Brain Injury*, 19(14), 1249-1259. <https://doi.org/10.1080/02699050500309510>
- Spiers, H., & Maguire, E. (2008). The dynamic nature of cognition during wayfinding. *Journal of environmental psychology*, 28, 232-249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2008.02.006>
- Spikman, J. M., Deelman, B. G., & van Zomeren, A. H. (2000). Executive functioning, attention and frontal lesions in patients with chronic CHI. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22(3), 325-338. [https://doi.org/10.1076/1380-3395\(200006\)22:3;1-V;FT325](https://doi.org/10.1076/1380-3395(200006)22:3;1-V;FT325)

- Steffen, T. M., Hacker, T. A., & Mollinger, L. (2002). Age- and gender-related test performance in community-dwelling elderly people : Six-Minute Walk Test, Berg Balance Scale, Timed Up & Go Test, and gait speeds. *Physical Therapy*, 82(2), 128-137. <https://doi.org/10.1093/ptj/82.2.128>
- Stuart, S., Parrington, L., Martini, D., Peterka, R., Chesnutt, J., & King, L. (2020). The Measurement of Eye Movements in Mild Traumatic Brain Injury : A Structured Review of an Emerging Area. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 5. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00005>
- Suh, M., Kolster, R., Sarkar, R., McCandliss, B., Ghajar, J., & Cognitive and Neurobiological Research Consortium. (2006). Deficits in predictive smooth pursuit after mild traumatic brain injury. *Neuroscience Letters*, 401(1-2), 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.02.074>
- Swaine, B. R., & Sullivan, S. J. (1996). Longitudinal profile of early motor recovery following severe traumatic brain injury. *Brain Injury*, 10(5), 347-366. <https://doi.org/10.1080/026990596124368>
- Tagliaferri, F., Compagnone, C., Korsic, M., Servadei, F., & Kraus, J. (2006). A systematic review of brain injury epidemiology in Europe. *Acta Neurochirurgica*, 148(3), 255-268; discussion 268. <https://doi.org/10.1007/s00701-005-0651-y>
- Tieri, G., Morone, G., Paolucci, S., & Iosa, M. (2018). Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation : Facts, fiction and fallacies. *Expert Review of Medical Devices*, 15(2), 107-117. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1425613>
- Trouillas, P., Takayanagi, T., Hallett, M., Currier, R. D., Subramony, S. H., Wessel, K., Bryer, A., Diener, H. C., Massaquoi, S., Gomez, C. M., Coutinho, P., Hamida, M. B., Campanella, G., Filla, A., Schut, L., Timann, D., Honnorat, J., Nighoghossian, N., &

- Manyam, B. (1997). International Cooperative Ataxia Rating Scale for pharmacological assessment of the cerebellar syndrome. *Journal of the Neurological Sciences*, *145*(2), 205-211. [https://doi.org/10.1016/S0022-510X\(96\)00231-6](https://doi.org/10.1016/S0022-510X(96)00231-6)
- Truelle, J.-L., Fayol, P., Montreuil, M., & Chevignard, M. (2010). Community integration after severe traumatic brain injury in adults. *Current Opinion in Neurology*, *23*(6), 688-694. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e3283404258>
- Vallée, M., McFadyen, B. J., Swaine, B., Doyon, J., Cantin, J.-F., & Dumas, D. (2006). Effects of Environmental Demands on Locomotion After Traumatic Brain Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *87*(6), 806-813. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.02.031>
- van der Ham, I. J. M., Claessen, M. H. G., Evers, A. W. M., & van der Kuil, M. N. A. (2020). Large-scale assessment of human navigation ability across the lifespan. *Scientific Reports*, *10*(1), 3299. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60302-0>
- van der Ham, I. J. M., Kant, N., Postma, A., & Visser-Meily, J. M. A. (2013). Is navigation ability a problem in mild stroke patients? Insights from self-reported navigation measures. *Journal of Rehabilitation Medicine*, *45*(5), 429-433. <https://doi.org/10.2340/16501977-1139>
- van der Kuil, M. N. A., Visser-Meily, J. M. A., Evers, A. W. M., & van der Ham, I. J. M. (2021). Navigation ability in patients with acquired brain injury : A population-wide online study. *Neuropsychological Rehabilitation*, 1-24. <https://doi.org/10.1080/09602011.2021.1893192>
- van Loo, M. A., Moseley, A. M., Bosman, J. M., de Bie, R. A., & Hassett, L. (2004). Test-retest reliability of walking speed, step length and step width measurement after traumatic

- brain injury : A pilot study. *Brain Injury*, 18(10), 1041-1048.
<https://doi.org/10.1080/02699050410001672314>
- van Velzen, J. M., van Bennekom, C. a. M., Edelaar, M. J. A., Sluiter, J. K., & Frings-Dresen, M. H. W. (2009). How many people return to work after acquired brain injury? : A systematic review. *Brain Injury*, 23(6), 473-488.
<https://doi.org/10.1080/02699050902970737>
- Vasudevan, E. V. L., Glass, R. N., & Packel, A. T. (2014). Effects of traumatic brain injury on locomotor adaptation. *Journal of Neurologic Physical Therapy: JNPT*, 38(3), 172-182.
<https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000049>
- Walker, W. C., & Pickett, T. C. (2007). Motor impairment after severe traumatic brain injury : A longitudinal multicenter study. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 44(7), 975-982. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2006.12.0158>
- White, O. B., & Fielding, J. (2012). Cognition and eye movements : Assessment of cerebral dysfunction. *Journal of Neuro-Ophthalmology: The Official Journal of the North American Neuro-Ophthalmology Society*, 32(3), 266-273.
<https://doi.org/10.1097/WNO.0b013e3182688230>
- Whiteneck, G. G., Gerhart, K. A., & Cusick, C. P. (2004). Identifying Environmental Factors That Influence the Outcomes of People With Traumatic Brain Injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 19(3), 191-204.
- Wiener, J. M., Büchner, S. J., & Hölscher, C. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks : A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, 9(2), 152-165.
<https://doi.org/10.1080/13875860902906496>
- Willemsen, P., Colton, M. B., Creem-Regehr, S. H., & Thompson, W. B. (2004). The effects of head-mounted display mechanics on distance judgments in virtual environments.

- Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization*, 35-38. <https://doi.org/10.1145/1012551.1012558>
- Williams, G., Galna, B., Morris, M. E., & Olver, J. (2010). Spatiotemporal deficits and kinematic classification of gait following a traumatic brain injury : A systematic review. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 25(5), 366-374. <https://doi.org/10.1097/HTR.0b013e3181cd3600>
- Williams, G., Lai, D., Schache, A., & Morris, M. E. (2015). Classification of Gait Disorders Following Traumatic Brain Injury. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 30(2), E13-E23. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000038>
- Williams, G., Morris, M. E., Schache, A., & McCrory, P. R. (2009). Incidence of Gait Abnormalities After Traumatic Brain Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(4), 587-593. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2008.10.013>
- Williams, G. P., Greenwood, K. M., Robertson, V. J., Goldie, P. A., & Morris, M. E. (2006). High-Level Mobility Assessment Tool (HiMAT) : Interrater reliability, retest reliability, and internal consistency. *Physical Therapy*, 86(3), 395-400.
- Williams, G., Schache, A., & Morris, M. E. (2013). Running abnormalities after traumatic brain injury. *Brain Injury*, 27(4), 434-443. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.750754>
- Williams, G., & Willmott, C. (2012). Higher levels of mobility are associated with greater societal participation and better quality-of-life. *Brain Injury*, 26(9), 1065-1071. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.667586>
- Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.01.001>

Yogev-Seligmann, G., Hausdorff, J. M., & Giladi, N. (2008). The role of executive function and attention in gait. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 23(3), 329-342; quiz 472. <https://doi.org/10.1002/mds.21720>

Références tableaux et figures

Figure 1 - Incidence par tranche d'âge; TCC léger figure A, TCC modéré/sévère figure B (GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators, The Lancet, 2019).....	4
Figure 2 - Répartition des objectifs dans le domaine communautaire (Kersey et al, 2020)	5
Figure 3 - Relation entre domaines de participation communautaire et facteurs associés (Kersey et al, 2020).....	6
Figure 4 - Données résumées de la mobilité, de la participation et de la qualité de vie dans un échantillon (n=39) de personnes symptomatiques, de gravité sévère, en phase chronique (Médiane = 9.2 mois) (Williams et Willmott, 2012).....	6
Figure 5 - Caractéristiques de marche et d'équilibre entre un échantillon symptomatique (TCC, n=10) et sujets sains (n=10) (Kaufman et al, 2006)	7
Figure 6- Paramètres spatio-temporels comparatifs mesurés de la marche entre un échantillon de personnes porteuses de lésion craniocérébrale en phase chronique (« TBI » pour TCC, n=41, médiane = 7.1 ans) et un échantillon de personnes contrôles (« HCs » pour Healthy Person Subjects, n= 15) (Williams et al, 2009).....	8
Figure 7 - Valeurs du TUG Test et du 10MWT entre le groupe symptomatique et le groupe contrôle (Klima et al, 2019)	8
Figure 8 - Moyenne et déviation standard des vitesses de marche effectuées lors des tests cliniques et des évaluations "écologiques" entre de sujets symptomatiques et population Témoin (Moseley et al, 2014)	10
Figure 9 - Fonctions visuelles et oculomotrices : Description, évaluation et exemple (Hunt et al, 2016).....	13
Figure 10 - Effet-taille des domaines cognitifs impactés selon le délai post-lésion (Belanger et al, 2005).....	14
Figure 11 - Proposition taxonomique de la navigation, classée en fonction du niveau de connaissances, de l'existence de ressources et de la destination (Selon Wiener et al, 2009)...	17
Figure 12 - Vue du ciel d'un carrefour et du croisement de foule en situation urbaine (Source : https://fr.freepik.com/photos-premium/personnes-voiture-foule-vue-pietons-carrefour-croisement-croisement-shibuya_4494408.htm)	18

Figure 13 - Méta-analyses des données comparatives des différents domaines de navigation entre individus porteurs de lésions cranio-cérébrales acquises et sujets contrôles (Goulter et al, 2021).....	18
Figure 14 - Trois domaines composant l'élaboration de la tâche de navigation (Claessen et al, 2017).....	19
Figure 15- Moyenne Globale de l'espace personnel (Gerin-Lajoie et al, 2005)	20
Figure 16- Evolution de la distance minimale prédite lors de l'interaction entre deux marcheurs se croisant à 90° en fonction du temps (Olivier et al, 2012)	21
Figure 17 - ratio des fixations des Agents virtuels et de leur évitement (nombre d'évitement n=493) (Meerhoff et al, 2018).....	22
Figure 18 - Illustrations de l'étude comparative entre conditions réelles et virtuelles (Berton et al, 2020).....	28
Figure 19- "Heat-Map" ou carte de distribution du balayage du regard lors d'interaction en environnement virtuel (Berton et al, 2020)	29
Figure 20- Vue du gymnase - Laboratoire M2S- Ker Lann – BRUZ, 35170, FRANCE	30
Figure 21 - Casque de réalité virtuelle HTC VIVE PRO EYE®	30
Figure 22 – Disposition et localisation des capteurs de Mouvement Xsens® sur le corps.....	31
Figure 23 - Vue de profil de l'équipement embarqué par le participant (Berton et al, 2020) ..	32
Figure 24 - Vue de l'environnement simulé et peuplé d'humains virtuels, à une densité basse (espacement entre humains virtuels de 1.8m)	33
Figure 25- Vue de l'environnement simulé et peuplé d'humains virtuels, à une densité moyenne (espacement entre humains virtuels de 1.4m)	34
Figure 26- Vue de l'environnement simulé et peuplé d'humains virtuels, à une haute densité (espacement entre humains virtuels de 1m)	34

Annexe 1 : Lettre information patient

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Lettre information Patient

« Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe »

étude clinique transversale comparative

RIPH 2

Y2.03

28/04/2022

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Table des matières

1. Introduction/Présentation.....	2
2. Contexte et objectifs de l'étude.....	3
3. Déroulement de l'étude.....	4
3.1. Présentation générale.....	4
3.2. Déroulement et participation.....	4
3.3. Bénéfices de l'étude.....	7
3.4. Risques et sources d'inconfort potentiels.....	8
3.4.1. Sources d'inconfort :.....	8
3.4.2. Risques prévisibles :.....	8
3.5. Indemnisation.....	9
3.6. Aspects réglementaires.....	9
3.6.1. Traitement informatique des données personnelles :.....	9
3.6.2. Droit à l'image.....	10
3.6.3. Informations sur l'étude.....	10
3.6.4. Participation volontaire du participant.....	10
Annexe 1 : Recueil de consentement.....	12
Annexe 2 : Droit à l'image.....	13
Bibliographie.....	14
Références tableaux et figures.....	15

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

1

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

1. Introduction/Présentation

Cette note d'information est à destination des futurs volontaires, intervenant dans le cadre de l'étude menée au sein du laboratoire M2S « Mouvement, Sport, Santé », situé sur le campus de Kerlann, 35 Avenue Robert Schuman, à Bruz, 35170 (02 90 09 15 80).

Dans le cadre de la recherche, les personnes sollicitées seront informées, par ce document, du contexte général et des objectifs de l'étude, du déroulement de l'étude (présentation générale, participation, recueil de consentement, droit de rétractation, droit à l'image, bénéfices et contraintes/risques liés à l'étude) ; par cette notice, le recueil de leur consentement ou leur non-opposition, libre, éclairée et exprimé ou écrit, obligation légale, par la loi du 09 Aout 2004 (1), sera renseignée et l'ensemble des informations nécessaires pour ce libre choix fera l'objet d'un échange entre le volontaire et l'investigateur.

Ce document présente l'ensemble des informations nécessaires afin de permettre une pleine compréhension des intérêts et du déroulement de l'étude. En cas d'accord, chaque page sera paraphée des initiales de la personne.

Pour complément, les textes, lois ou documents relatifs au droit, auxquels cette étude fait appel seront référencés en fin de document, au sein de la section bibliographie.

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

2

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

2. Contexte et objectifs de l'étude

Le traumatisme crânien cérébral est causé par une accélération brutale, généralement en lien avec une chute, un accident de la voie publique, ou tout coup porté à la tête, au visage ou indirectement à une autre partie du corps, provoquant des lésions neurologiques, impactant les fonctions cérébrales. Il est considéré comme une pathologie neurologique provoquant indifféremment, et selon les contextes, malaises/vertiges/perte d'équilibre, troubles moteurs, sensitifs, de la mémoire et des fonctions cognitives/exécutives. Ces symptômes, plus ou moins visibles, sont dépendants de la gravité de la lésion et sont responsables de limitations d'activités (marche, course, écriture, conversation, comportement, etc...) et d'une restriction de participation sociale, familiale et/ou professionnelle, entraînant une phase de rééducation nécessaire ; ces lésions peuvent donc parfois avoir un fort impact sur les activités de la vie quotidienne, et notamment sur l'activité locomotrice, comme la marche humaine ou locomotion. La rééducation peut se dérouler sur quelques jours jusqu'à plusieurs mois, voire des années, selon le degré de gravité des lésions provoquées ; la disparition des symptômes n'est pas forcément le signe d'une pleine et entière récupération des fonctions touchées. En effet, divers travaux de recherche ont montré que des déficits persistants peuvent être encore présent même dans un délai de 6 mois après la lésion.

L'objectif de cette expérimentation est ainsi de mieux comprendre les potentiels symptômes persistant, à distance de la lésion traumatique, ayant un impact sur l'activité locomotrice. En particulier, ce projet s'intéresse aux stratégies d'adaptation mises en places, aux capacités visuo-locomotrices et aux fonctions exécutives des patients ayant subi un traumatisme craniocérébral, après 6 mois, et de leur part de responsabilité dans l'exécution de leur locomotion dans un environnement social proche du réel. Plus précisément, la présente étude vise à une meilleure compréhension de ces fonctions, potentiellement déficitaires et quasi-invisibles, dans la gestion des interactions locomotrices dans un environnement nécessitant anticipation et adaptation, environnement du quotidien, que l'on croise tous les jours dans les rues. Nous nous appuierons sur l'analyse du mouvement du corps et des trajectoires mis en œuvres lors d'une tâche de croisement/contournement entre un participant et des humains virtuels dans un environnement proche du réel, chez une personne ayant subi un traumatisme craniocérébral datant de 6 mois ou plus..

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

3

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

3. Déroulement de l'étude

3.1. Présentation générale

- Cette recherche impliquant la personne humaine est menée dans le cadre des travaux de recherche du laboratoire M2S.
- Cette recherche impliquera des participants âgés de 18 à 55 ans. En particulier, nous cherchons à recruter 10 patients ayant subi un traumatisme crânien dans les 6 mois précédant l'expérimentation et 10 personnes saines, n'ayant jamais subi de lésion cérébrale ou traumatisme crânien.
- Cette étude nécessite deux visites :
 - Une première auprès du médecin-investigateur, dans les locaux du Pole Saint Hélier à RENNES, pour informer le participant et recueillir son consentement. Le temps de cette visite sera d'une durée estimée à 1 Heure
 - Une deuxième auprès de l'équipe de recherche, dans les locaux du laboratoire M2S à BRUZ, pour effectuer l'expérimentation et les mesures cliniques. Le temps de cette visite est estimé à environ 3h
- Au total, le temps nécessaire pour votre participation pour ces deux visites est estimé à environ 4h ; ce temps est une estimation et sera fonction des conditions de réalisation (± 30 min). Ce temps ne comprend pas le temps de trajet.

3.2. Déroulement et participation

Chaque sujet participant à l'étude devra se déplacer jusqu'au gymnase du laboratoire M2S (cf figure 1) pour la séance expérimentale, illustrée sur la figure suivante.

Figure 1- Gymnase du laboratoire M2S dans lequel sera effectué l'expérimentation, Laboratoire M2S, Campus de KerLann, 35170, BRUZ



UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Vous serez convié(e) à une séance de mesure correspondant à vos disponibilités. Chaque séance de mesure n'implique qu'un seul participant. Le protocole des tests vous sera exposé avant signature d'un formulaire de non opposition ou d'accord de participation. Si vous le désirez, vous pourrez poser toutes questions complémentaires que vous souhaitez à l'investigateur et/ou expérimentateur, avant d'entrer dans l'étude, ou à tout moment de celle-ci.

Un code unique par participant sera créé afin de garantir la non identification de l'ensemble des données concernant le volontaire.

Chaque participant est équipé d'un casque de réalité virtuelle (cf figure 2) permettant la projection d'un environnement social proche de ce que l'on peut rencontrer dans les rues d'une ville comme Rennes (cf figure 3).

Figure 2 - Casque de réalité virtuelle HTC VIVE PRO EYE®



Figure 3- Vue de l'environnement simulant la rue Vasselot à RENNES, et peuplée d'humains virtuels



UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Afin d'étudier les mouvements, en plus du casque, chaque participant est équipé de capteurs, disposés sur l'ensemble du corps (cf figure 4) ainsi que d'un sac à dos, d'un poids relatif ne dépassant pas le poids d'un sac scolaire.

Figure 4 – Disposition et localisation des capteurs de Mouvement Xsens® sur le corps



Le protocole expérimental est alors le suivant :

- Chaque participant réalise avant tout un recueil de plusieurs paramètres (Identitovigilance, état général, recueil de consentement, explications du déroulé de l'expérimentation, questions éventuelles avec l'opérateur/technicien de recherche, tests cliniques).
- Après vérification du bon fonctionnement du matériel et de l'installation sur le participant, chaque participant réalise tout d'abord un test-essai à travers du couloir de marche défini à l'intérieur du gymnase, afin de mesurer sa vitesse de confort en l'absence d'interaction avec un environnement et de faire un point de vérification lié au port du matériel et à la pris des données.
- Puis, le participant effectue 3 tâches différentes :
 - La première consiste à faire 5 passages en marchant, à vitesse spontanée ou naturelle, en ligne droite et rejoindre le bout de la rue; aucun obstacle n'est

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

- présent sur le chemin lors de cette séquence ; l'objectif est d'appréhender l'environnement dans lequel il déambule.
- o La deuxième consiste à faire 5 passages en marchant en ligne droite et rejoindre le bout de la rue ; un humain virtuel est présent et en position debout immobile, au milieu de la trajectoire ; l'objectif est de le contourner sans le bousculer pour rejoindre le bout de la rue.
 - o La troisième tâche consiste à faire 15 passages en traversant une rue peuplée d'une foule, en contournant sans bousculer les humains se tenant debout et immobiles, regardant une vidéo-projection d'un événement sportif sur un grand écran situé derrière le participant ; l'objectif est de se rendre de l'autre côté de la rue dans une boulangerie (façade jaune) et de vous mettre dans la file d'attente.

A la fin de la session expérimentale, nous récupérerons l'ensemble du matériel. Un temps de repos vous sera alloué à tout moment si nécessaire, la fatigue n'étant pas un paramètre pris en compte dans notre étude. Un questionnaire d'acceptabilité de l'outil « Réalité virtuelle » vous sera proposé à la fin de la séance expérimentale. Cette étape clôture l'expérimentation

3.3. Bénéfices de l'étude

Les bénéfices concernant le volontaire sont indirects dans un premier temps, mais les connaissances acquises permettront une meilleure compréhension des stratégies locomotrices mises en place par les personnes ayant subi un traumatisme crânien lors de la réalisation d'une tâche locomotrice dans un environnement complexe ; cette participation permettrait l'amélioration des connaissances sur ce sujet pour une meilleure prise en soin des personnes victimes de cette pathologie et de ses séquelles. En particulier, cela permettra de mettre en évidence les troubles visuo-locomoteurs et des fonctions exécutives lors d'une tâche ressemblant aux situations rencontrées dans un environnement proche de la réalité, pouvant persister malgré une absence de symptômes cliniques. Dans un second temps, les applications à plus long terme de ces résultats de recherche présentent des bénéfices directs. Ils permettront en effet de proposer de nouveaux protocoles d'évaluation des symptômes à la suite d'une lésion afin de mieux évaluer les patients en situation de rééducation et d'affiner les protocoles de rééducation.

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

7

3.4. Risques et sources d'inconfort potentiels

3.4.1. Sources d'inconfort :

- La nécessité de se déplacer jusqu'au lieu de mesure (Gymnase de KerLann, Bruz)
- La potentielle fatigue liée à l'expérimentation, limitée car vous vous déplacerez durant les différents essais à vitesse de marche de confort, la vitesse naturellement adoptée et qui représente une dépense énergétique minimale. La durée des sessions sera limitée à 3 heures. Au cours de chaque session, vous aurez à parcourir 25 trajets d'une longueur maximale de 12 m avec au moins 10s de pause entre chaque trajet.
- Le placement sur votre tête d'une charlotte (pour des questions d'hygiène) et d'un casque de réalité virtuelle.
- L'installation de capteurs de mouvements sur le corps (tête, épaule, coude, poignet, tronc, hanche, cuisse, jambe, pied) et le port d'un sac à dos

3.4.2. Risques prévisibles :

- Principalement celui d'une chute, mais ne sera pas supérieur à celui habituellement encouru lorsque vous marchez dans la rue :
 - Vous utiliserez les moyens de déambulation (chaussures) que vous avez l'habitude de porter
 - Vous évoluerez dans un environnement que vous avez l'habitude de pratiquer (marche sur sol plan horizontal).
 - Vous aurez pour consigne de stopper immédiatement le test si vous sentez en insécurité ou dans une situation trop inconfortable (Malaises, vertiges ou autre)
- Les mesures proposant une marche à allure de confort, les risques de fatigue, de gêne ou de blessure dus au protocole de mesure seront minimales.
- L'apparition potentielle de vertiges ou malaises pendant l'expérimentation ou sur les quelques minutes qui suivent la fin de l'expérimentation n'est pas exclu même si le risque est minime; il s'agit des mêmes signes que l'on peut rencontrer également lors du « mal des transports ».
- La mesure du mouvement par des marqueurs passifs disposés sur l'ensemble du corps du participant est une mesure non invasive.

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

- L'ensemble des risques attendant à la réalisation d'une expérimentation en laboratoire (incendie, coupure de courant, ...) a été pris en compte dans le cadre de l'agrément obtenu par Laboratoire M2S auprès de l'Agence Régionale de Santé (ARS).

3.5. Indemnisation

Vous ne percevrez aucune contrepartie financière pour votre participation à l'étude. Les frais engagés pour vos déplacements, vous seront intégralement remboursés, sur la base d'un déplacement aller-retour avec comme base de référence le lieu du domicile, et par défaut le lieu d'hospitalisation.

3.6. Aspects réglementaires

Pour participer à l'étude proposée, vous devez être affilié(e) à un régime de sécurité sociale.

Conformément à l'article L1121-4 du code de la santé publique (2), le protocole est en cours de soumission pour validation auprès du Comité de Protection des Personnes (CPP).

Conformément à l'article L1121-4 du code de la santé publique, le protocole est en cours de soumission pour déclaration auprès de l'Agence Nationale de la Sécurité du Médicament et des produits de santé (ANSM).

3.6.1. Traitement informatique des données personnelles :

Un traitement informatisé des données personnelles, conforme à la méthodologie de référence MR001 de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (consultable sur le site de la CNIL (3)), est mis en œuvre par le promoteur de l'étude. Il a pour seule finalité la réalisation de cette recherche et se limite aux données strictement nécessaires et pertinentes au regard des objectifs de l'étude. A cette fin, ces données personnelles seront transmises au promoteur de la recherche ou aux personnes ou sociétés habilitées agissant pour son compte en France dans des conditions assurant leur confidentialité. Elles seront identifiées par un numéro de code ainsi que de vos initiales. Ces données pourront également, dans des conditions assurant leur confidentialité, être transmises aux autorités de santé françaises ou étrangères. A l'issue de la recherche, les données personnelles seront conservées jusqu'à publication des résultats de l'étude puis archivées conformément à la réglementation en vigueur. Vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données. Vous disposez également d'un droit d'opposition à la transmission de vos données personnelles utilisées dans le cadre de cette étude. Ces droits

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

9

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

s'exercent auprès du médecin-investigateur qui suit le volontaire dans le cadre de l'étude et peut connaître l'identité de celui-ci.

3.6.2. Droit à l'image

Dans le cadre de cette étude, et pendant l'évaluation, des enregistrements vidéo et photo peuvent être effectués. L'intérêt de ces photos ou vidéos est de promouvoir et valoriser la recherche. Vous disposez d'un droit d'accès mais aussi d'opposition, dispositions prévues par la loi relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés (loi du 06 Janvier 1978 modifiée (4)) à ce que ces vidéos et photos soient réalisées et/ou utilisées dans le cadre de l'étude et en dehors de l'étude (enseignement ou communication scientifique). Votre accord/désaccord sera renseigné dans un formulaire présent en annexe 2.

3.6.3. Informations sur l'étude

- Tout au long de votre participation, vous serez informé(e) de la survenue de toute nouvelle donnée sur le déroulement de l'étude ou sa mise en œuvre susceptible de modifier votre décision quant à votre participation à l'étude.
- Vous avez la possibilité à tout moment de l'étude de contacter Matthieu ARMAND (m.armand@ifpek.org, 06-21-74-03-07) pour toute demande d'information supplémentaire sur l'étude, sur votre participation ou sur vos données personnelles.
- Vous pourrez être informé(e), si vous le souhaitez, des résultats globaux de la recherche à la fin de l'étude (Art L.1122-1 Code de la Santé Publique (5)) en contactant Matthieu ARMAND (m.armand@ifpek.org, 06-21-74-03-07).

3.6.4. Participation volontaire du participant

Votre participation à cette étude est entièrement volontaire et libre. Votre éventuel refus de participer n'a aucune conséquence. Si vous acceptez de participer, vous pourrez à tout moment quitter cette étude sans justification. Par ailleurs, vous pourrez éventuellement être sorti(e) de l'étude par l'investigateur principale s'il l'estime nécessaire.

Cette note d'information vous appartient et vous pouvez la communiquer à vos proches pour avis.

Nous vous remercions de votre coopération.

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

10

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Si vous êtes d'accord pour participer à cette étude, nous vous demanderons de bien vouloir remplir et signer le formulaire de non opposition, joint en annexe 1, lors de votre venue au laboratoire M2S pour l'expérimentation.

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

11

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Annexe 1 : Recueil de consentement

Recueil de Consentement

Je soussigné(e), reconnais avoir lu et compris le présent formulaire d'informations concernant le projet « Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe » et fais part de mon consentement à participer à ce projet de recherche. Je reconnais avoir été informé(e) que je pouvais mettre fin à ma participation au projet à tout moment sans aucun motif à donner, en contactant simplement les personnes contacts. Je reconnais également que le responsable du projet m'a expliqué le but et les modalités du projet, ainsi que les avantages, risques et inconvénients du projet. Je reconnais que le responsable du projet a répondu à mes questions de manière claire et précise. Je reconnais enfin avoir la possibilité de poser des questions additionnelles sur le projet ou sur mes droits, à tout moment pendant le projet, en communiquant avec les personnes contacts.

Accord :

Oui Non

Fait en deux exemplaires (l'un remis au participant, l'autre conservé par le responsable du projet)

Pour le participant : Initiales Nom et Prénom, Date et signature

Pour le responsable du projet : Initiales Nom, Prénom, Date et signature

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

12

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Annexe 2 : Droit à l'image

Droit à l'image

Il est possible que certains essais soient filmés et que des photographies soient prises. Ces documents pourront être réutilisés, avec votre permission, à des fins de formation, de vulgarisation de la recherche et/ou de présentations scientifiques. Il n'est cependant pas nécessaire de consentir à ce volet pour participer au présent projet. En cas de refus, les enregistrements et les photographies vous concernant seront détruits à la fin du projet dans le respect de la confidentialité et du droit à l'image.

Je soussigné(e), autorise l'utilisation d'images et vidéos enregistrements de ma personne à des fins de formations, de vulgarisation de notre recherche ou de présentations scientifiques, ainsi que leur conservation avec mes données de recherche.

Accord :

Oui Non

Fait en deux exemplaires (l'un remis au participant, l'autre conservé par le responsable du projet)

Pour le participant : Initiales Nom, Prénom, Date et signature

Pour le responsable du projet : Initiales Nom, Prénom, Date et signature

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

13

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Bibliographie

1. LOI n° 2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique (1). 2004-806 août 9, 2004.
2. Article L1121-4 - Code de la santé publique - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032722858/
3. Falque Pierrotin I. Délibération n° 2018-153 du 3 mai 2018 [Internet]. CNIL1818702x mai 3, 2018. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037187386>
4. Loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.
5. Article L1122-1-1 - Code de la santé publique - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032722892

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe

Références tableaux et figures

Figure 1- Gymnase du laboratoire M2S dans lequel sera effectuée l'expérimentation, Laboratoire M2S, Campus de KerLann, 35170, BRUZ	4
Figure 2 - Casque de réalité virtuelle HTC VIVE PRO EYE®	5
Figure 3- Vue de l'environnement simulant la rue Vasselot à RENNES, et peuplée d'humains virtuels	5
Figure 4 – Disposition et localisation des capteurs de Mouvement Xsens® sur le corps.....	6

UFR STAPS- Université Rennes 2

Master 2 APPCM - « Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices »

15

Annexe 2 : Recueil de consentement

Recueil de Consentement

Je soussigné(e), reconnais avoir lu et compris le présent formulaire d'informations concernant le projet « *Effets d'un traumatisme crânien modéré/sévère en phase chronique sur les stratégies locomotrices impliquées lors de la navigation en environnement complexe* » et fais part de mon consentement à participer à ce projet de recherche. Je reconnais avoir été informé(e) que je pouvais mettre fin à ma participation au projet à tout moment sans aucun motif à donner, en contactant simplement les personnes contacts. Je reconnais également que le responsable du projet m'a expliqué le but et les modalités du projet, ainsi que les avantages, risques et inconvénients du projet. Je reconnais que le responsable du projet a répondu à mes questions de manière claire et précise. Je reconnais enfin avoir la possibilité de poser des questions additionnelles sur le projet ou sur mes droits, à tout moment pendant le projet, en communiquant avec les personnes contacts.

Accord :

Oui Non

Fait en deux exemplaires (l'un remis au participant, l'autre conservé par le responsable du projet)

Pour le participant : Initiales Nom et prénom, Date et signature

Pour le responsable du projet : Initiales Nom et Prénom, Date et signature

Annexe 2 Bis : Droit à l'image

<u>Droit à l'image</u>

Il est possible que certains essais soient filmés et que des photographies soient prises. Ces documents pourront être réutilisés, avec votre permission, à des fins de formation, de vulgarisation de la recherche et/ou de présentations scientifiques. Il n'est cependant pas nécessaire de consentir à ce volet pour participer au présent projet. En cas de refus, les enregistrements et les photographies vous concernant seront détruits à la fin du projet dans le respect de la confidentialité et du droit à l'image.

Je soussigné(e), autorise l'utilisation d'images et vidéos enregistrements de ma personne à des fins de formations, de vulgarisation de notre recherche ou de présentations scientifiques, ainsi que leur conservation avec mes données de recherche.

Accord :

Oui

Non

Fait en deux exemplaires (l'un remis au participant, l'autre conservé par le responsable du projet)

Pour le participant : Initiales Nom et Prénom, Date et signature

Pour le responsable du projet : Initiales Nom et Prénom, Date et signature

Annexe 3 : Echelle HiMAT

HiMAT: HIGH LEVEL MOBILITY ASSESSMENT TOOL

DATE.....
 DATE OF ACCIDENT.....
 DIAGNOSIS.....
 AFFECTED SIDE LEFT / RIGHT

PATIENT ID LABEL

ITEM	PERFORMANCE	SCORE					
		0	1	2	3	4	5
WALK	sec	X	> 6.6	5.4-6.6	4.3-5.3	< 4.3	X
WALK BACKWARD	sec		>13.3	8.1-13.3	5.8-8.0	< 5.8	X
WALK ON TOES	sec		> 8.9	7.0 - 8.9	5.4-6.9	< 5.4	X
WALK OVER OBSTACLE	sec		> 7.1	5.4-7.1	4.5-5.3	< 4.5	X
RUN	sec		> 2.7	2.0-2.7	1.7-1.9	< 1.7	X
SKIP	sec		> 4.0	3.5-4.0	3.0-3.4	< 3.0	X
HOP FORWARD (AFFECTED)	sec		> 7.0	5.3-7.0	4.1-5.2	< 4.1	X
BOUND (AFFECTED)	1) 2) 3)	cm	< 80	80-103	104-132	> 132	X
BOUND (LESS-AFFECTED)	1) 2) 3)	cm	< 82	82-105	106-129	> 129	X
UP STAIRS DEPENDENT (Rail OR not reciprocal: if not, score 5 and rate below)	sec		>22.8	14.6-22.8	12.3-14.5	<12.3	
UP STAIRS INDEPENDENT (No rail AND reciprocal: if not score 0 and rate above)	sec		> 9.1	7.6-9.1	6.8-7.5	< 6.8	X
DOWN STAIRS DEPENDENT (Rail OR not reciprocal: if not score 5 and rate below)	sec		>24.3	17.6-24.3	12.8-17.5	<12.8	
DOWN STAIRS INDEPENDENT (No rail AND reciprocal: if not score 0 and rate above)	sec		> 8.4	6.6-8.4	5.8-6.5	< 5.8	X
	SUBTOTAL						

TOTAL HiMAT SCORE /54

Annexe 3 Bis : Echelle HIMAT (suite)

HiMAT: High-level Mobility Assessment Tool

Instructions

Subject suitability:	The HiMAT is appropriate for assessing people with high-level balance and mobility problems. The minimal mobility requirement for testing is independent walking over 20m without gait aids. Orthoses are permitted.
Item testing:	Testing takes 5-10 minutes. Patients are allowed 1 practice trial for each item.
Instructions:	Patients are instructed to perform at their maximum safe speed except for the bounding and stair items.
Walking:	The middle 10m of a 20m trial is timed.
Walk backward:	As for walking.
Walk on toes:	As for walking. Any heel contact during the middle 10m is recorded as a fail.
Walk over obstacle:	As for walking. A house brick is placed across the walkway at the mid-point. Patients must step over the brick without contacting it. A fail is recorded if patients step around the brick or make contact with the brick.
Run:	The middle 10m of a 20m trial is timed. A fail is recorded if patients fail to have a consistent flight phase during the trial.
Skipping:	The middle 10m of a 20m trial is timed. A fail is recorded if patients fail to have a consistent flight phase during the trial.
Hop forward:	Patients stand on their more affected leg and hop forward. The time to hop 10m meters is recorded.
Bound (affected).	A bound is a jump from one leg to the other with a flight phase. Patients stand behind a line on their less affected leg, hands on hips, and jump forward landing on their more affected leg. Each bound is measured from the line to the heel of the landing leg. The average of three trials is recorded.
Bound (less-affected).	Patients stand behind a line on their more affected leg, hands on hips, and jump forward landing on their less affected leg. The average of three trials is recorded.
Up stairs:	Patients are asked to walk up a flight of 14 stairs as they normally would and at their normal speed. The trial is recorded from when the patient starts until both feet are at the top. Patients who use a rail or a non-reciprocal pattern are scored on Up Stairs Dependent . Patients who ascend the stairs reciprocally without a rail are scored on Up Stairs Independent and get an additional 5 points in the last column of Up Stairs Dependent .
Down stairs:	As for Up stairs.
Scoring:	All times and distances are recorded in the 'performance' column. The corresponding score for each item is then circled and each column is then subtotaled. Subtotals are then added to calculate the HiMAT score.

Annexe 4 : Echelle ICARS

I: POSTURE AND GAIT DISTURBANCE		SCORE:
<p>1. WALKING CAPACITIES</p> <p>observed during a 10 meter test including a half-turn, near a wall, at about 1,5meter.</p>	<p>0: normal</p> <p>1: almost normal naturally, but <u>unable</u> to walk with feet in <u>tandem position</u></p> <p>2: Walking <u>without support</u>, but clearly abnormal and irregular</p> <p>3: Walking <u>without support</u> but with considerable staggering, difficulties in half turn</p> <p>4: Walking with autonomous support no longer possible, the patient uses <u>episodic support of the wall</u> for a 10 meter test</p> <p>5: Walking only possible <u>with one stick</u></p> <p>6: Walking only possible <u>with two special sticks or with a stroller</u></p> <p>7: Walking only <u>with accompanying person</u></p> <p>8: walking <u>impossible</u> even with accompanying person (wheelchair)</p>	
<p>2: GAIT SPEED</p> <p>observed in patients with preceeding scores 1-3, preceeding score 4 and up gives automatically score 4 in this test.</p>	<p>0: normal</p> <p>1: <u>slightly</u> reduced</p> <p>2: <u>markedly</u> reduced</p> <p>3: <u>extremely</u> slow</p> <p>4: walking with autonomous support no longer possible</p>	
<p>3: STANDING CAPACITIES, EYES OPEN</p> <p>the patient is asked first to stand on one foot <u>if impossible</u>, to stand with feet in tandem position <u>if impossible</u> to stand with feet together for the natural position the patient is asked to find a comfortable standing position</p>	<p>0: normal, able to stand <u>on one foot</u> more than 10 sec</p> <p>1: <u>able</u> to stand <u>with feet together</u>, but <u>no</u> longer able to stand on <u>one foot</u> more than 10 sec.</p> <p>2: able to stand <u>with feet together</u>, but <u>no</u> longer able to stand in <u>tandem position</u></p> <p>3: <u>no longer</u> able to stand <u>with feet together</u>, but able to stand in <u>natural position without support</u>, with no or moderate sway</p> <p>4: standing in <u>natural position without support</u>, with considerable sway and considerable corrections</p>	

Annexe 4 Bis : Echelle ICARS (suite)

	<p>5: <u>unable</u> to stand in natural position without strong support of the arms</p> <p>6: <u>unable to stand at all</u>, even with string support of the arms</p>	
<p>4: SPREAD OF FEET IN NATURAL POSITION WITHOUT SUPPORT</p> <p>EYES OPEN the patient is asked to find a comfortable position, then the distance between medial malleoli is measured.</p>	<p>0: normal <u><10cm</u></p> <p>1: slightly enlarged <u>>10cm</u></p> <p>2: clearly enlarged <u>25cm < spread <35cm</u></p> <p>3: severely enlarged <u>>35cm</u></p> <p>4: standing in natural position impossible</p>	
<p>5: BODY SWAY WITH FEET TOGETHER</p> <p>EYES OPEN</p>	<p>0: normal</p> <p>1: <u>slightly oscillations</u></p> <p>2: <u>moderate oscillations</u> (<10cm at the level of head)</p> <p>3: <u>severe oscillations</u> (>10cm at the level of head), threatening the upright position</p> <p>4: immediate <u>falling</u></p>	
<p>6: BODY SWAY WITH FEET TOGETHER</p> <p>EYES CLOSED</p>	<p>0: normal</p> <p>1: <u>slight oscillations</u></p> <p>2: <u>moderate oscillations</u> (<10cm at the level of head)</p> <p>3: <u>severe oscillations</u> (>10cm at the level of head), threatening the upright position</p> <p>4: immediate <u>falling</u></p>	
<p>7: QUALITY OF SITTING POSITION</p> <p>thighs together, on a hard surface, arms folded</p>	<p>0: normal</p> <p>1: with <u>slight oscillations</u> of the trunk</p> <p>2: with <u>moderate oscillations</u> of the trunk and legs</p> <p>3: with <u>severe dysequilibrium</u></p> <p>4: <u>impossible</u></p>	
<p>POSTURE AND GAIT SCORE (STATIC SCORE)</p>		<p>___ / 34</p>

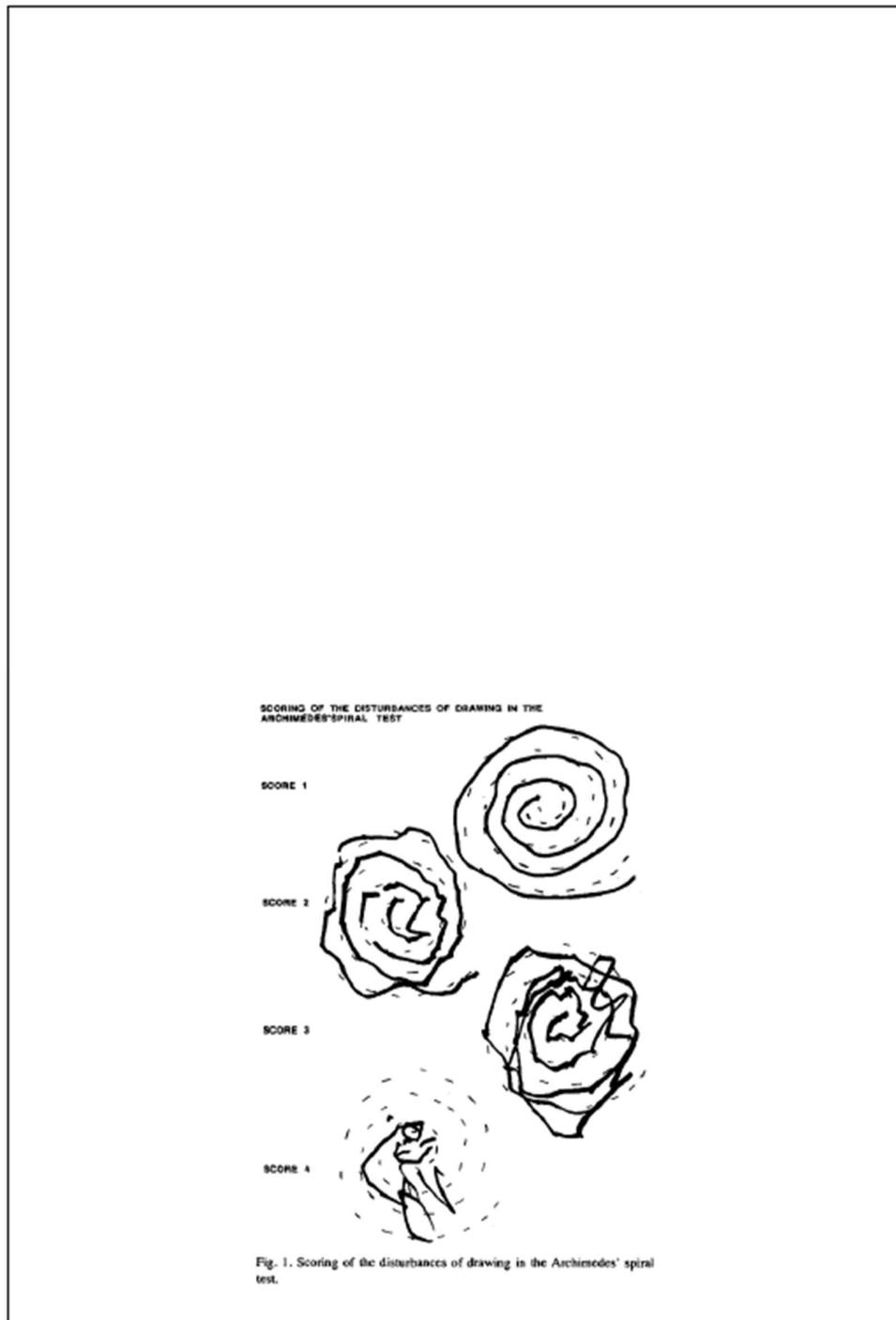
Annexe 4 Ter : Echelle ICARS (Suite)

II: KINETIC FUNCTIONS		SCORE:
<p>8: KNEE-TIBIA TEST decomposition of movement and intention tremor.</p> <p>The test is performed in the supine position, but the head is tilted, so that visual control is possible. The patient is requested to raise one leg and place the heel on the knee, and then slide the heel down the anterior tibial surface of the resting leg towards the ankle. On reaching the ankle joint, the leg is again raised in the air to a height of approximately 40 cms and the action is repeated. At least 3 movements of each limb must be performed for proper assessment.</p>	<p>0: normal</p> <p>1: lowering of <u>heel in continuous axis</u>, but the movement is decomposed in several phases, without real jerks, or abnormally slow</p> <p>2: lowering jerkily <u>in the axis</u></p> <p>3: lowering jerkily with <u>lateral movements</u></p> <p>4: lowering jerkily <u>with extremely strong lateral movements or test impossible</u></p>	<p>R:</p> <p>L:</p>
<p>9: ACTION TREMOR in the HEEL-TO-KNEE Test</p> <p>Same test as preceding one: the action tremor of the heel on the knee is specifically observed when the patient holds the heel on the knee for a few seconds before sliding down the anterior tibial surface; visual control is required</p>	<p>0: No trouble</p> <p>1: Tremor stopping immediately when the heel reaches the knee</p> <p>2: Tremor stopping in less than 10 seconds after reaching the knee</p> <p>3: Tremor continuing for more than 10 seconds after reaching the knee</p> <p>4: uninterrupted tremor or test impossible</p>	<p>R:</p> <p>L:</p>
<p>10: FINGER-TO-NOSE TEST <u>decomposition and dysmetria</u></p> <p>the subject sits on a chair, the hand is resting on the knee before the beginning of the movement, visual control is required. Three movements of each limb must be performed for proper assessment.</p>	<p>0: no trouble</p> <p>1: Oscillating movement without decomposition of the movement</p> <p>2: Segmented movement in more than 2 phases and/or moderate dysmetria in reaching nose</p> <p>3: segmented movement in more than 2 phases and /or considerable dysmetria in reaching nose</p> <p>4: Dysmetria preventing the patient from reaching the nose</p>	<p>R:</p> <p>L:</p>

Annexe 4 quater : Echelle ICARS (suite)

<p>11: FINGER-TO-NOSE TEST intention tremor of the finger the studied tremor is that appeared during the ballistic phase of the movement; the patient is sitting comfortably, with his hands resting on his/her thigh; visual control is required; three movements of each limb must be performed as proper assessment</p>	<p>0: No trouble 1: simple swerve of the movement 2: moderate tremor with estimated amplitude <10cm 3: Tremor with estimated amplitude between 10cm und 40cm 4: severe tremor with estimated amplitude >40cm</p>	<p>R: L:</p>
<p>12: FINGER-FINGER-TEST action tremor and/or instability the sitting patient is asked to maintain medially his/her index fingers pointing at each other for about 10 sec, at a distance of about 1cm, at the level of the thorax, under visual control.</p>	<p>0: normal 1: mild instability 2: moderate oscillations of finger with estimated amplitude <10cm 3: considerable oscillations of finger with estimated amplitude between 10 and 40cm 4: Jerky movement >40cm of amplitude</p>	<p>R: L:</p>
<p>13: PRONATION-SUPINATION altering movements the subject, comfortably sitting on a chair, is asked to raise his/her forearm vertically and to make alternative movements of the hand. Each hand is moved and assessed separately.</p>	<p>0: normal 1: slightly irregular and slowed 2: clearly irregular and slowed, but without sway of the elbow 3: extremely irregular and slowed movement, with sway of the elbow 4: movement completely disorganized or impossible</p>	<p>R: L:</p>
<p>14: DRAWING the Archimedes spiral on a predrawn pattern the subject is comfortably settled in front of the table, the sheet of paper is being fixed to avoid artefacts. The subject is asked to perform the task without timing requirements. The same condition of examination must be used at each examination.</p>	<p>0: normal 1: impairment and decomposition, the line quitting the pattern slightly, but without hypermetric swerve 2: line completely out of the pattern without recrossing and/or hypermetric swerves 3: major disturbance due to hypermetria and decomposition 4: drawing completely disorganised or impossible</p>	
<p><u>KINETIC SCORE (limb coordination):</u></p>		<p>___/52</p>

Annexe 4 quinquies : Echelle ICARS (Suite)



Annexe 4 sexes : Echelle ICARS (suite)

III: SPEECH DISORDERS		SCORE:
15: DYSARTHRIA: fluency of speech The patient is asked to repeat several times a standard sentence, always the same.	0: normal 1: mild modification of fluency 2: moderate modification of fluency 3: considerably slow and dysarthric speech 4: no speech	
16: DYSARTHRIA: clarity of speech	0: normal 1: suggestion of slurring 2: definite slurring, most words understandable 3: severe slurring, speech not understandable 4: no speech	
DYSARTHRIA SCORE:		<u> </u> /8
IV: OCULOMOTOR DISORDERS		SCORE:
17: GAZE EVOKED NYSTAGMUS the subject is asked to look laterally at the finger of the examiner: the movement assessed are mainly horizontal, but they may be oblique, rotatory, or vertical.	0: normal 1: transient 2: persistent but moderate 3: persistent as severe	
18: ABNORMALITIES OF THE OCULAR PURSUIT the subject is asked to follow the slow lateral movement, performed by the finger of the examiner	0: normal 1: slightly saccadic 2: clearly saccadic	
19: DYSMETRIA OF THE SACCADE the two index fingers of the examiner in each visual field, average overshoot/undershoot is estimated	0: absent 1: bilateral clear overshoot or undershoot of the saccade	
OCULOMOTOR MOVEMENT SCORE:		<u> </u> /6
TOTAL ATAXIA SCORE:		<u> </u> /100

Annexe 5 : Echelle d'équilibre de Berg BBS

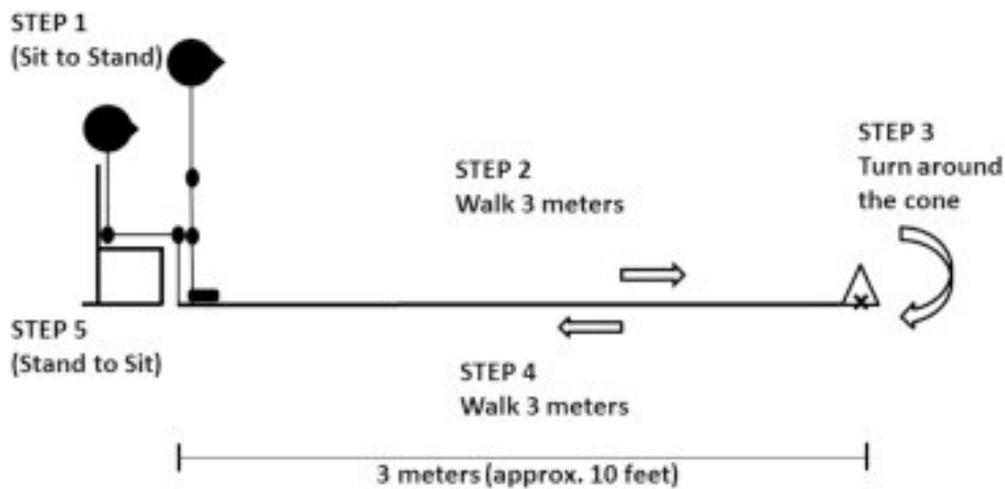
BERG BALANCE SCALE	Patient Name: _____
	Rater Name: _____
	Date: _____
<hr/>	
Balance Item	Score (0-4)
1. Sitting unsupported	_____
2. Change of position: sitting to standing	_____
3. Change of position" standing to sitting	_____
4. Transfers	_____
5. Standing unsupported	_____
6. Standing with eyes closed	_____
7. Standing with feet together	_____
8. Tandem standing	_____
9. Standing on one leg	_____
10. Turning trunk (feet fixed)	_____
11. Retrieving objects from floor	_____
12. Turning 360 degrees	_____
13. Stool stepping	_____
14. Reaching forward while standing	_____
	TOTAL (0-56): _____
<hr/>	
Interpretation	
0-20, wheelchair bound	
21-40, walking with assistance	
41-56, independent	

Annexe 6 : Evaluation 10 Meter-Walk-Test

But	Évaluation des capacités fonctionnelles à la marche			
Équipement	Chronomètre, circuit métré			
Méthode	/			
Position patient	Debout, en sécurité			
Position thérapeute	A côté du patient, chronomètre en main, prêt à intervenir			
Consignes patient	« Marcher le plus rapidement possible, sans courir »			
Interprétation	Compter le nombre de pas pour parcourir une distance de 10 mètres (à vitesse confortable)			
	<i>Sujets jeunes, allure tranquille</i> 11-17	<i>Sujets jeunes, allure rapide</i> 8-10	<i>Sujets âgés</i> 12-14	<i>Sujets pathologiques</i> 13-25
	Chronométrer le temps nécessaire pour parcourir une distance de 10 mètres			
	Sujets masculins	<i>Moyenne</i> 7,6 s		<i>Extrêmes</i> 5,0-10,0 s
Sujets féminins	8,0 s		6,0-12,0 s	

Annexe 7 : Evaluation Time-Up-And-Go Test

But	Évaluation du transferts assis-debout, de l'équilibre, de la marche, du demi-tour
Équipement	Chronomètre, chaise, toise de 5m
Méthode	/
Position patient	Départ assis sur la chaise
Position thérapeute	A côté du patient, chronomètre en main
Consignes patient	<ul style="list-style-type: none"> - Se lever - Marcher 3m (vitesse confortable) - Faire demi-tour - Revenir jusqu'à la chaise - S'asseoir



Annexe 8 : Echelle ABC-Scale

Instructions: For each of the following activities, please indicate your level of balance confidence by choosing one of the points on the scale below from 0% to 100%.

If you do **not currently do the activity**, try and imagine how confident you would be if you had to do the activity. If you **normally use a walking aid to do the activity or hold onto someone**, rate your confidence as if you were using these supports. If you have any questions, please ask the administrator.

0% 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100%
No Confidence Completely Confident

"How confident are you that you can maintain your balance and remain steady when you...."

1. walk around the house? ____%
2. walk up or down stairs? ____%
3. bend over and pick up a slipper from the front of a closet floor? ____%
4. reach for a small can off a shelf at eye level? ____%
5. stand on your tip toes and reach for something above your head? ____%
6. stand on a chair and reach for something? ____%
7. sweep the floor? ____%
8. walk outside the house to a car parked in the driveway? ____%
9. get into or out of a car? ____%
10. walk across a parking lot to the mall? ____%
11. walk up or down a ramp? ____%
12. walk in a crowded mall where people rapidly walk past you? ____%
13. are bumped into by people as you walk through the mall? ____%
14. step onto or off of an escalator while holding onto a railing? ____%
15. step onto or off an escalator while holding onto parcels such that you cannot hold onto the railing? ____%
16. walk outside on icy sidewalks? ____%

Annexe 9 : Echelle MoCA, Montréal Cognitive Assessment

NAME : _____
 Education : _____
 Sex : _____ Date of birth : _____
 DATE : _____

MONTREAL COGNITIVE ASSESSMENT (MOCA)

VISUOSPATIAL / EXECUTIVE	Copy cube	Draw CLOCK (Ten past eleven) (3 points)	POINTS																			
<p style="text-align: center;">[] []</p>	<p style="text-align: center;">[] []</p>	<p style="text-align: center;">[] [] []</p> <p style="text-align: center;">Contour Numbers Hands</p>	___/5																			
NAMING																						
<p style="text-align: center;">[]</p>	<p style="text-align: center;">[]</p>	<p style="text-align: center;">[]</p>	___/3																			
MEMORY	Read list of words, subject must repeat them. Do 2 trials. Do a recall after 5 minutes.		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">FACE</td> <td style="text-align: center;">VELVET</td> <td style="text-align: center;">CHURCH</td> <td style="text-align: center;">DAISY</td> <td style="text-align: center;">RED</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1st trial</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2nd trial</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		FACE	VELVET	CHURCH	DAISY	RED	1st trial						2nd trial						No points
	FACE	VELVET	CHURCH	DAISY	RED																	
1st trial																						
2nd trial																						
ATTENTION	Read list of digits (1 digit/ sec.). Subject has to repeat them in the forward order [] 2 1 8 5 4 Subject has to repeat them in the backward order [] 7 4 2		___/2																			
	Read list of letters. The subject must tap with his hand at each letter A. No points if ≥ 2 errors [] FBACMNAAJKLBAFAKDEAAAJAMOF AAB		___/1																			
	Serial 7 subtraction starting at 100 [] 93 [] 86 [] 79 [] 72 [] 65 4 or 5 correct subtractions: 3 pts, 2 or 3 correct: 2 pts, 1 correct: 1 pt, 0 correct: 0 pt		___/3																			
LANGUAGE	Repeat: I only know that John is the one to help today. [] The cat always hid under the couch when dogs were in the room. []		___/2																			
	Fluency / Name maximum number of words in one minute that begin with the letter F [] ____ (N ≥ 11 words)		___/1																			
ABSTRACTION	Similarity between e.g. banana - orange = fruit [] train - bicycle [] watch - ruler		___/2																			
DELAYED RECALL	Has to recall words WITH NO CUE	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">FACE</td> <td style="text-align: center;">VELVET</td> <td style="text-align: center;">CHURCH</td> <td style="text-align: center;">DAISY</td> <td style="text-align: center;">RED</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[]</td> </tr> </table>	FACE	VELVET	CHURCH	DAISY	RED	[]	[]	[]	[]	[]	Points for UNCUE recall only ___/5									
FACE	VELVET	CHURCH	DAISY	RED																		
[]	[]	[]	[]	[]																		
Optional	Category cue																					
	Multiple choice cue																					
ORIENTATION	[] Date [] Month [] Year [] Day [] Place [] City		___/6																			
© Z.Nasreddine MD Version November 7, 2004 www.mocatest.org			Normal ≥ 26 / 30 TOTAL ___/30 Add 1 point if ≤ 12 yr edu																			

Annexe 10 : Wayfinding Questionnaire

The next 22 questions will be about navigation. You answer the questions by **marking the numbers** most suitable to you.

Explanation of numbers 1 to 7:

1	2	3	4	5	6	7
Not applicable to me at all	Almost never applicable to me	Seldom applicable to me	Sometimes applicable to me	Often applicable to me	Nearly always applicable to me	Totally applicable to me

- When I am in a building for the first time, I can easily point to the main entrance of this building.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- If I see a landmark (building, monument, intersection) multiple times, I know exactly from which side I have seen that landmark before.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- In an unknown city I can easily see where I need to go when I read a map on an information board.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- Without a map, I can estimate the distance of a route I have walked well, when I walk it for the first time.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- I can estimate well how long it will take me to walk a route in an unknown city when I see the route on a map (with a legend and scale).

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- I can always orient myself quickly and correctly when I am in an unknown environment.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- I always want to know exactly where I am (meaning, I am always trying to orient myself in an unknown environment).

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- I am afraid of losing my way somewhere.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- I am afraid of getting lost in an unknown city.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------
- In an unknown city, I prefer to walk in a group rather than by myself.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

Annexe 10 Bis : Wayfinding Questionnaire (Suite)

11. When I get lost, I get nervous.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

How uncomfortable are you in the following situation (item 12, 13, 14):

12. Deciding where to go when you are just exiting a train, bus, or subway station.

Not uncomfortable at all	1	2	3	4	5	6	7	Very uncomfortable
--------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------

13. How uncomfortable are you in the following situation: Finding your way in an unknown building (e.g., a hospital).

Not uncomfortable at all	1	2	3	4	5	6	7	Very uncomfortable
--------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------

14. How uncomfortable are you in the following situation: Finding your way to a meeting in an unknown city or part of a city.

Not uncomfortable at all	1	2	3	4	5	6	7	Very uncomfortable
--------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------

15. I find it frightening to go to a destination I have not been before.

Not uncomfortable at all	1	2	3	4	5	6	7	Very uncomfortable
--------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------

16. I can usually recall a new route after I have walked it once.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

17. I am good at estimating distances (e.g., from myself to a building I can see).

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

18. I am good at understanding and following route descriptions.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

19. I am good at giving route descriptions (meaning, explaining a known route to someone).

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

20. When I exit a store, I do not need to orient myself again to determine where I have to go.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

21. I enjoy taking new routes (e.g., shortcuts) to known destinations.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

22. I can easily find the shortest route to a known destination.

Not applicable to me at all	1	2	3	4	5	6	7	Totally applicable to me
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------

Annexe 11 : Echelle NSI

Neurobehavioral Symptom Inventory (NSI)					
Please rate the following symptoms with regard to how much they have disturbed you IN THE LAST 2 Weeks. The purpose of this inventory is to track symptoms over time. Please do not attempt to score.					
0 = None – Rarely if ever present; not a problem at all					
1 = Mild – Occasionally present, but it does not disrupt my activities; I can usually continue what I'm doing; doesn't really concern me.					
2 = Moderate – Often present, occasionally disrupts my activities; I can usually continue what I'm doing with some effort; I feel somewhat concerned.					
3 = Severe – Frequently present and disrupts activities; I can only do things that are fairly simple or take little effort; I feel I need help.					
4 = Very Severe – Almost always present and I have been unable to perform at work, school or home due to this problem; I probably cannot function without help.					
Symptoms	0	1	2	3	4
Feeling Dizzy	<input type="radio"/>				
Loss of balance	<input type="radio"/>				
Poor coordination, clumsy	<input type="radio"/>				
Headaches	<input type="radio"/>				
Nausea	<input type="radio"/>				
Vision problems, blurring, trouble seeing	<input type="radio"/>				
Sensitivity to light	<input type="radio"/>				
Hearing difficulty	<input type="radio"/>				
Sensitivity to noise	<input type="radio"/>				
Numbness or tingling on parts of my body	<input type="radio"/>				
Change in taste and/or smell	<input type="radio"/>				
Loss of appetite or increased appetite	<input type="radio"/>				
Poor concentration, can't pay attention, easily distracted	<input type="radio"/>				
Forgetfulness, can't remember things	<input type="radio"/>				
Difficulty making decisions	<input type="radio"/>				
Slowed thinking, difficulty getting organized, can't finish things	<input type="radio"/>				
Fatigue, loss of energy, getting tired easily	<input type="radio"/>				
Difficulty falling or staying asleep	<input type="radio"/>				
Feeling anxious or tense	<input type="radio"/>				
Feeling depressed or sad	<input type="radio"/>				
Irritability, easily annoyed	<input type="radio"/>				
Poor frustration tolerance, feeling easily overwhelmed by things	<input type="radio"/>				

<p>Date:</p> <p>Name:</p> <p>Medical Record #:</p>
--

Used with permission: Cicerone, KD: J Head Tr Rehabil 1995;10(3):1-17

Annexe 12 : Echelle SSQ



Questionnaire sur les cybermalaises*

Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO
(Traduit de Kennedy, R.S. et al., 1993)

Numéro _____ Date _____

Consignes : Encercliez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte présentement.

- | | | | | |
|---|--------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 1. Inconfort général | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 2. Fatigue | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 3. Mal de tête | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 4. Fatigue des yeux | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 5. Difficulté à faire le focus | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 6. Augmentation de la salivation | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 7. Transpiration | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 8. Nausées | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 9. Difficulté à se concentrer | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 10. Impression de lourdeur dans la tête | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 11. Vision embrouillée | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 12. Étourdissement les yeux ouverts | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 13. Étourdissement les yeux fermés | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 14. *Vertiges | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 15. **Conscience de l'estomac | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |
| 16. Rots | <u>Pas du tout</u> | <u>Un peu</u> | <u>Modérément</u> | <u>Sévèrement</u> |

* Les vertiges sont vécus comme une perte de l'orientation par rapport à la position verticale.

** L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort sans nausée.

Dernière version : Mars 2013

***Version originale : Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220

Annexe 12 bis : Echelle SSQ (Suite)

Questionnaire sur les Cybermalaises Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO

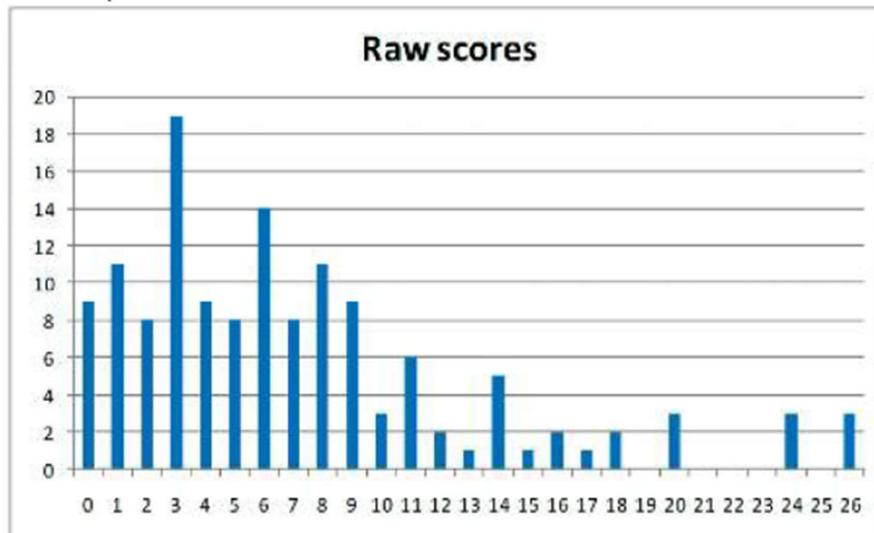
Cotation de la version canadienne-française du Questionnaire sur les cybermalaises :

- Faire le Total des items 1 à 16 : échelle de 0 (pas du tout) à 3 (sévèrement).
 - Sous-échelle « Nausée » : items 1 + 6 + 7 + 8 + 12 + 13 + 14 + 15 + 16.
 - Sous-échelle « Oculo-moteur » : items 2 + 3 + 4 + 5 + 9 + 10 + 11.

Pour consulter les articles scientifiques sur la validation canadienne-française de ce questionnaire, veuillez-vous référer aux articles suivants :

- BOUCHARD, S., Robillard, & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire. Acte de colloque du *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 5, 117-122.
- BOUCHARD, S., St-Jacques, J., Renaud, P., & Wiederhold, B.K. (2009). Side effects of immersions in virtual reality for people suffering from anxiety disorders. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 2(2), 127-137.
- BOUCHARD, S. Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. (2011). Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side-effects. *Journal of Computer and Information Technology*, 1(3), 20-32.

Basée sur les résultats de l'étude de Bouchard, St-Jacques, Renaud, & Wiederhold (2009), voici la moyenne des scores reportés dans l'étude de validation:



Note. Pour la cotation et validation de la version originale anglaise, veuillez consulter l'article suivant : Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.

Résumé : *Contexte :* Le traumatisme crânio-cérébral touche près de 150 000 personnes en France par an, dont 30 000 souffriront de séquelles graves. Ces lésions font apparaître déficiences chroniques physiques, cognitives, émotionnelles ou comportementales, ayant des conséquences sur la locomotion, les activités et la participation socio-professionnelle. Alors que les évaluations cliniques de la fonction locomotrice s'effectuent souvent dans des tâches de marche en ligne droite, elles ne considèrent pas des situations écologiques. *Objectifs :* Cette étude vise à proposer un nouveau paradigme d'évaluation de la locomotion en environnement écologique complexe chez des personnes ayant subi un traumatisme crânien sévère en phase chronique, permettant de mieux comprendre les difficultés rencontrées par ces patients lors des interactions locomotrices de la vie quotidienne. *Méthodes :* Nous avons développé un paradigme de marche en réalité virtuelle où les participants (Groupe TCC et C) sont amenés à se déplacer dans une rue peuplée de piétons virtuels de densité variable selon les essais. Nous analyserons les stratégies visuo-locomotrices en considérant la cinématique de la marche et l'activité du regard. Les deux groupes seront évalués en laboratoire et feront l'objet d'une comparaison sur la base d'indicateurs permettant d'identifier les différences de stratégies comportementales observées. *Mots-clés :* Traumatisme Crânien, Locomotion, Réalité Virtuelle, Environnement Complexe

Abstract : *Context:* Traumatic Brain Injury is concerning most of 150 000 people yearly, including 30 000 of them who were suffering from heavy after-effects. Consequences also will appear like physical, cognitive, emotional or behavioral chronic diseases, affecting locomotion, activities, social participation and return to work. Even if clinic assessments of locomotor functions by straight line walking were often realized, little is known about ecological situations. *Objectives:* The aim of this study is to propose a new locomotor assessment paradigm including a complex ecological environment in adults with moderate-to-severe traumatic brain injury in chronic phase. By this, best knowledges about difficulties encountered by these patients performing locomotor interactions in daily life will be allowed. *Methods:* A new walk-on paradigm using virtual reality was developed and patients (TBI and C Group) were able to ambulate on a pedestrian street with randomized density trials. Visuo-motor behaviors will be analyzed, considering cinematics of walking and ocular activity. Both of groups will be evaluated in an laboratory complex and compared with indicators allowing and identifying the differences in behavioral observed strategies. *Key Words:* Traumatic Brain Injury, locomotion, virtual reality, complex environment