



HAL
open science

Étude de validation chez le sujet sain d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive

Yasmine Sidahmed

► To cite this version:

Yasmine Sidahmed. Étude de validation chez le sujet sain d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive. Médecine humaine et pathologie. 2021. dumas-03412672

HAL Id: dumas-03412672

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03412672v1>

Submitted on 3 Dec 2021

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 - ShareAlike 4.0 International License

UNIVERSITE DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement
Par

Yasmine SIDAHMED

le 13.09.2021

TITRE

**Etude de validation chez le sujet sain d'un outil de quantification et de
rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation
prismatique en réalité virtuelle immersive**

Directeur de thèse : Dr Jérôme FROGER

JURY

Président : Pr Isabelle LAFFONT

Assesseurs : Dr Jérôme FROGER
Dr Sylvain FAZILLEAU

UNIVERSITE DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement

Par

Yasmine SIDAHMED

le 13.09.2021

TITRE

**Etude de validation chez le sujet sain d'un outil de quantification et de
rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation
prismatique en réalité virtuelle immersive**

Directeur de thèse : Dr Jérôme FROGER

JURY

Président : Pr Isabelle LAFFONT

Assesseurs : Dr Jérôme FROGER
Dr Sylvain FAZILLEAU

ANNEE UNIVERSITAIRE 2020-2021 PERSONNEL ENSEIGNANT

Professeurs Honoraires

ALBAT Bernard	DIMEGLIO Alain	MARY Henri
ALLIEU Yves	DUBOIS Jean Bernard	MATHIEU-DAUDE Pierre
ALRIC Robert	DUJOLS Pierre	MEYNADIER Jean
ARNAUD Bernard	DUMAS Robert	MICHEL François-Bernard
ASENCIO Gérard	DUMAZER Romain	MION Charles
ASTRUC Jacques	ECHENNE Bernard	MION Henri
AUSSILLOUX Charles	FABRE Serge	MIRO Luis
AVEROUS Michel	FREREBEAU Philippe	NAVARRO Maurice
AYRAL Guy	GALIFER René Benoît	NAVRATIL Henri
BAILLAT Xavier	GODLEWSKI Guilhem	OTHONIEL Jacques
BALDET Pierre	GRASSET Daniel	PAGES Michel
BALDY-MOULINIER Michel	GUILHOU Jean-Jacques	PEGURET Claude
BALMES Jean-Louis	GUI TER Pierre	PELLISSIER Jacques
BANSARD Nicole	HEDON Bernard	PETIT Pierre
BAYLET René	HERTAULT Jean	POUGET Régis
BILLIARD Michel	HUMEAU Claude	PUJOL Henri
BLARD Jean-Marie	JAFFIOL Claude	RABISCHONG Pierre
BLAYAC Jean Pierre	JANBON Charles	RAMUZ Michel
BLOTMAN Francis	JANBON François	REBOUL Jean
BONNEL François	JARRY Daniel	RIEU Daniel
BOURGEOIS Jean-Marie	JOURDAN Jacques	ROCHFORD Henri
BOUSQUET Jean	KLEIN Bernard	ROUANET DE VIGNE LAVIT Jean Pierre
BRUEL Jean Michel	LAFFARGUE François	SAINT AUBERT Bernard
BUREAU Jean-Paul	LALLEMANT Jean Gabriel	SANCHO-GARNIER Hélène
BRUNEL Michel	LAMARQUE Jean-Louis	SANY Jacques
CANAUD Bernard	LAPEYRIE Henri	SEGNARBIEUX François
CHAPTAL Paul-André	LE ROUX Jean-Louis	SENAC Jean-Paul
CIURANA Albert-Jean	LESBROS Daniel	SERRE Arlette
CLOT Jacques	LOPEZ François Michel	SOLASSOL Claude
COSTA Pierre	LORIOT Jean	VIDAL Jacques
D'ATHIS Françoise	LOUBATIERES Marie Madeleine	VISIER Jean Pierre
DEMAILLE Jacques	MAGNAN DE BORNIER Bernard	
DESCOMPS Bernard	MARTY ANE Charles	

Professeurs Emérites

ARTUS Jean-Claude	GROLLEAU RAOUX Robert	MONNIER Louis
BLANC François	GUERRIER Bernard	MOURAD Georges
BONAFE Alain	GUILLOT Bernard	PREFAUT Christian
BOULENGER Jean-Philippe	JONQUET Olivier	PUJOL Rémy
BOURREL Gérard	LANDAIS Paul	RIBSTEIN Jean
BRINGER Jacques	LARREY Dominique	SCHVED Jean-François
CLAUSTRES Mireille	LE QUELLEC Alain	SULTAN Charles
DAURES Jean-Pierre	MARES Pierre	TOUCHON Jacques
DAUZAT Michel	MAUDELONDE Thierry	UZIEL Alain
DAVY Jean-Marc	MAURY Michèle	VOISIN Michel
DEDET Jean-Pierre	MESSNER Patrick	ZANCA Michel
ELEDJAM Jean-Jacques	MILLAT Bertrand	

Docteurs Emérites

PRAT Dominique
 PUJOL Joseph

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

PU-PH de classe exceptionnelle

ALRIC Pierre - Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option chirurgie vasculaire)
BACCINO Eric - Médecine légale et droit de la santé
BASTIEN Patrick - Parasitologie et mycologie
BEREGI Jean-Paul - Radiologie et imagerie médicale
BLAIN Hubert - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
BOULOT Pierre - Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
CAPDEVILA Xavier - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
CHAMMAS Michel - Chirurgie orthopédique et traumatologique
COLSON Pascal - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
COMBE Bernard - Rhumatologie
COSTES Valérie - Anatomie et cytologie pathologiques
COTTALORDA Jérôme - Chirurgie infantile
COUBES Philippe - Neurochirurgie
COURTET Philippe - Psychiatrie d'adultes ; addictologie
CRAMPETTE Louis - Oto-rhino-laryngologie
CRISTOL Jean Paul - Biochimie et biologie moléculaire
CYTEVAL Catherine - Radiologie et imagerie médicale
DE LA COUSSAYE Jean Emmanuel - Médecine d'urgence
DE WAZIERES Benoît - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
DELAPORTE Éric - Maladies infectieuses ; maladies tropicales
DEMOLY Pascal - Pneumologie ; addictologie
DOMERGUE Jacques - Chirurgie viscérale et digestive
DUFFAU Hugues - Neurochirurgie
ELIAOU Jean François - Immunologie
FABRE Jean Michel - Chirurgie viscérale et digestive
FRAPIER Jean-Marc - Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
HAMAMAH Samir - Biologie et Médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
HERISSON Christian - Médecine physique et de réadaptation
JABER Samir - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
JEANDEL Claude - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
JORGENSEN Christian - Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie
KOTZKI Pierre Olivier - Biophysique et médecine nucléaire
LABAUGE Pierre - Neurologie
LEFRANT Jean-Yves - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
LEHMANN Sylvain - Biochimie et biologie moléculaire
LUMBROSO Serge - Biochimie et Biologie moléculaire
MERCIER Jacques - Physiologie
MEUNIER Laurent - Dermato-vénéréologie
MONDAIN Michel - Oto-rhino-laryngologie
MORIN Denis - Pédiatrie
PAGEAUX Georges-Philippe - Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PUJOL Pascal - Biologie cellulaire
QUERE Isabelle - Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option médecine vasculaire)
RENARD Éric - Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; médecine gynécologie
REYNES Jacques - Maladies infectieuses, maladies tropicales
RIPART Jacques - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
ROUANET Philippe - Cancérologie ; radiothérapie
SOTTO Albert - Maladies infectieuses ; maladies tropicales
TAOUREL Patrice - Radiologie et imagerie médicale
TOUITOU Isabelle - Génétique
VANDE PERRE Philippe - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
YCHOU Marc - Cancérologie ; radiothérapie

PU-PH de 1^{re} classe

AGUILAR MARTINEZ Patricia - Hématologie ; transfusion
ASSENAT Éric - Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
AVIGNON Antoine - Nutrition
AZRIA David - Cancérologie ; radiothérapie
BAGHDADLI Amaria - Pédiopsychiatrie ; addictologie
BLANC Pierre - Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BORIE Frédéric - Chirurgie viscérale et digestive
BOURDIN Arnaud - Pneumologie ; addictologie
CAMBONIE Gilles - Pédiatrie
CAMU William - Neurologie
CANOVAS François - Anatomie
CAPTIER Guillaume - Anatomie
CARTRON Guillaume - Hématologie ; transfusion
CAYLA Guillaume - Cardiologie
CHANQUES Gérald - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
CORBEAU Pierre - Immunologie
COULET Bertrand - Chirurgie orthopédique et traumatologique
CUVILLON Philippe - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
DADURE Christophe - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
DAUVILLIERS Yves - Physiologie
DE TAYRAC Renaud - Gynécologie-obstétrique, gynécologie médicale
DE VOS John- Histologie, embryologie et cytogénétique
DEMARIA Roland - Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
DEREURE Olivier - Dermatologie - vénéréologie
DROUPY Stéphane - Urologie
DUCROS Anne - Neurologie
DUPEYRON Arnaud - Médecine physique et de réadaptation
FESLER Pierre - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
GARREL Renaud - Oto-rhino-laryngologie
GENEVIEVE David - Génétique
GUILLAUME Sébastien - Psychiatrie d'adultes ; addictologie
GUIU Boris - Radiologie et imagerie médicale
HAYOT Maurice - Physiologie
HOUEDE Nadine - Cancérologie ; radiothérapie
KLOUCHE Kada - Médecine intensive-réanimation
KOENIG Michel - Génétique
KOUYOUMDJIAN Pascal - Chirurgie orthopédique et traumatologique
LAFFONT Isabelle - Médecine physique et de réadaptation
LAVABRE-BERTRAND Thierry - Histologie, embryologie et cytogénétique
LAVIGNE Jean-Philippe - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
LE MOING Vincent - Maladies infectieuses ; maladies tropicales
LECLERCQ Florence - Cardiologie
MARIANO-GOULART Denis - Biophysique et médecine nucléaire
MATECKI Stéfan - Physiologie
MORANNE Olivier - Néphrologie
MOREL Jacques - Rhumatologie
NAVARRO Francis - Chirurgie viscérale et digestive
NOCCA David - Chirurgie viscérale et digestive
PASQUIE Jean-Luc – Cardiologie
PERNEY Pascal - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
PRUDHOMME Michel - Anatomie
PUJOL Jean Louis - Pneumologie ; addictologie
PURPER-OUAKIL Diane - Pédiopsychiatrie ; addictologie
ROGER Pascal - Anatomie et cytologie pathologiques
TRAN Tu-Anh - Pédiatrie
VERNHET Hélène - Radiologie et imagerie médicale

PU-PH de 2ème classe

BOURGIER Céline - Cancérologie; radiothérapie
CANAUD Ludovic - Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option chirurgie vasculaire)
CAPDEVIELLE Delphine - Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
CLARET Pierre-Géraud - Médecine d'urgence
COLOMBO Pierre-Emmanuel - Cancérologie ; radiothérapie
COSTALAT Vincent - Radiologie et imagerie médicale
DAIEN Vincent - Ophtalmologie
DORANDEU Anne - Médecine légale et droit de la santé
FAILLIE Jean-Luc - Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
FUCHS Florent - Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
GABELLE DELOUSTAL Audrey - Neurologie
GAUJOUX Viala Cécile - Rhumatologie
GODREUIL Sylvain - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
GUILPAIN Philippe - Médecine Interne, gériatrie et biologie du vieillissement; addictologie
HERLIN Christian - Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique, brûlologie
IMMEDIATO DAIEN Claire - Rhumatologie
JACOT William - Cancérologie ; Radiothérapie
JEZIORSKI Éric - Pédiatrie
JUNG Boris – Médecine intensive-réanimation
KALFA Nicolas - Chirurgie infantile
LACHAUD Laurence - Parasitologie et mycologie
LALLEMANT Benjamin - Oto-rhino-laryngologie
LE QUINTREC DONNETTE Moglie - Néphrologie
LETOUZEY Vincent - Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
LONJON Nicolas - Neurochirurgie
LOPEZ CASTROMAN Jorge - Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
LUKAS Cédric - Rhumatologie
MENJOT de CHAMPFLEUR Nicolas - Radiologie et imagerie médicale
MILLET Ingrid - Radiologie et imagerie médicale
MURA Thibault - Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
NAGOT Nicolas - Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
OLIE Emilie - Psychiatrie d'adultes; addictologie
PANARO Fabrizio - Chirurgie viscérale et digestive
PARIS Françoise - Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PELLESTOR Franck - Histologie, embryologie et cytogénétique
PEREZ MARTIN Antonia – Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option médecine vasculaire)
POUDEROUX Philippe - Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
RIGAU Valérie - Anatomie et cytologie pathologiques
RIVIER François - Pédiatrie
ROSSI Jean François - Hématologie ; transfusion
ROUBILLE François - Cardiologie
SEBBANE Mustapha - Médecine d'urgence
SIRVENT Nicolas - Pédiatrie
SOLASSOL Jérôme - Biologie cellulaire
STOEBNER Pierre - Dermato-vénéréologie
SULTAN Ariane - Nutrition
THOUVENOT Éric - Neurologie
THURET Rodolphe - Urologie
TUAILLON Edouard - Bactériologie-virologie; hygiène hospitalière
VENAIL Frédéric - Oto-rhino-laryngologie
VILLAIN Max - Ophtalmologie
VINCENT Denis - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
VINCENT Thierry - Immunologie
WOJTUSCISZYN Anne - Endocrinologie-diabétologie-nutrition

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

1^{re} classe :

COLINGE Jacques (Cancérologie, Signalisation cellulaire et systèmes complexes)
LAOUDJ CHENIVESSE Dalila (Biochimie et biologie moléculaire)
VISIER Laurent (Sociologie, démographie)

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - Médecine générale

1^{re} classe :

LAMBERT Philippe
AMOUYAL Michel

PROFESSEURS ASSOCIES - Médecine Générale

CLARY Bernard
DAVID Michel
GARCIA Marc

PROFESSEURS ASSOCIES - Médecine

BESSIS Didier (Dermato-vénéréologie)
MEUNIER Isabelle (Ophtalmologie)
MULLER Laurent (Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire)
PERRIGAULT Pierre-François (Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire)
QUANTIN Xavier (Pneumologie)
ROUBERTIE Agathe (Pédiatrie)
VIEL Eric (Soins palliatifs et traitement de la douleur)

Maîtres de Conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers

MCU-PH Hors classe - Echelon Exceptionnel

RICHARD Bruno – Médecine palliative
SEGONDY Michel - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

MCU-PH Hors classe

BADIOU Stéphanie - Biochimie et biologie moléculaire
BOULLE Nathalie - Biologie cellulaire
CACHEUX-RATABOUL Valère - Génétique
CARRIERE Christian - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
CHARACHON Sylvie - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
FABBRO-PERAY Pascale - Epidémiologie, économie de la santé et prévention
GIANSILY-BLAIZOT Muriel - Hématologie ; transfusion

MCU-PH de 1^{re} classe

BERTRAND Martin - Anatomie
BOUDOUSQ Vincent - Biophysique et médecine nucléaire
BRET Caroline - Hématologie biologique
BROUILLET Sophie - Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
COSSEE Mireille - Génétique
GIRARDET-BESSIS Anne - Biochimie et biologie moléculaire
LAVIGNE Géraldine - Hématologie ; transfusion
LESAGE François-Xavier - Médecine et Santé au Travail
MARTRILLE Laurent - Médecine légale et droit de la santé
MATHIEU Olivier - Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MOUZAT Kévin - Biochimie et biologie moléculaire
PANABIERES Catherine - Biologie cellulaire
RAVEL Christophe - Parasitologie et mycologie
SCHUSTER-BECK Iris - Physiologie
STERKERS Yvon - Parasitologie et mycologie
THEVENIN-RENE Céline – Immunologie

MCU-PH de 2^{ème} classe

BERGOUIGNOUX Anne - Génétique
CHIRIAC Anca - Immunologie
DE JONG Audrey - Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
DU THANH Aurélie - Dermato-vénérologie
FITENI Frédéric - Cancérologie ; radiothérapie
GOUZI Farès - Physiologie
HERRERO Astrid - Chirurgie viscérale et digestive
HUBERLANT Stéphanie - Gynécologie-obstétrique ; Gynécologie médicale
KUSTER Nils - Biochimie et biologie moléculaire
MAKINSON Alain - Maladies infectieuses, Maladies tropicales
PANTEL Alix - Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
PERS Yves-Marie - Thérapeutique; addictologie
ROUBILLE Camille - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
SZABLEWSKY - Anatomie et cytologie pathologiques

Maîtres de Conférences des Universités - Médecine Générale

MCU-MG de 1^{re} classe

COSTA David
OUDE ENGBERINK Agnès

MCU-MG de 2^{ème} classe

FOLCO-LOGNOS Béatrice
CARBONNEL François

Maîtres de Conférences associés - Médecine Générale

CAMPAGNAC Jérôme
LOPEZ Antonio
MILLION Elodie
PAVAGEAU Sylvain
REBOUL Marie-Catherine
SERAYET Philippe

Maitres de Conférences des Universités

Maîtres de Conférences hors classe

BADIA Éric - Sciences biologiques fondamentales et cliniques
CHAZAL Nathalie - Biologie cellulaire

Maîtres de Conférences de classe normale

BECAMEL Carine - Neurosciences
BERNEX Florence - Physiologie
CHAUMONT-DUBEL Séverine - Sciences du médicament et des autres produits de santé
DELABY Constance - Biochimie et biologie moléculaire
GUGLIELMI Laurence - Sciences biologiques fondamentales et cliniques
HENRY Laurent - Sciences biologiques fondamentales et cliniques
HERBET Guillaume - Neurosciences
LADRET Véronique - Mathématiques appliquées et applications des mathématiques
LAINE Sébastien - Sciences du Médicament et autres produits de santé
LE GALLIC Lionel - Sciences du Médicament et autres produits de santé
LOZZA Catherine - Sciences physico-chimiques et technologies pharmaceutiques
MAIMOUN Laurent - Sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé
MOREAUX Jérôme - Science biologiques, fondamentales et clinique
MORITZ-GASSER Sylvie - Neurosciences
MOUTOT Gilles - Philosophie
PASSERIEUX Emilie - Physiologie
RAMIREZ Jean-Marie - Histologie
RAYNAUD Fabrice - Sciences du Médicament et autres produits de santé
TAULAN Magali - Biologie Cellulaire

Praticiens Hospitaliers Universitaires

BARATEAU Lucie- Physiologie
BASTIDE Sophie - Epidémiologie, économie de la santé et prévention
CAZAUBON Yoann - Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
DAGNEAUX Louis - Chirurgie orthopédique et traumatologique
DUFLOS Claire- Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
GOULABCHAND Radjiv - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
LATTUCA Benoit - Cardiologie
MARIA Alexandre - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
MIOT Stéphanie- Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
SARRABAY Guillaume - Génétique
SOUCHE François-Régis - Chirurgie viscérale et digestive

PH chargés d'enseignements

ABOUKRAT Patrick	COLIN Olivier	MATTATIA Laurent
AKKARI Mohamed	CONSEIL Mathieu	MEROUEH Fadi
ALRIC Jérôme	CORBEAU Catherine	MEYER Pierre
AMEDRO Pascal	COROIAN Flavia-Oana	MILESI Christophe
AMOUROUX Cyril	COUDRAY Sarah	MORAU Estelle
ANTOINE Valéry	CRANSAC Frédéric	MOSER Camille
ARQUIZAN Caroline	CUNTZ Danielle	MOUSTY Eve
ATTALIN Vincent	DARDALHON Brigitte	MOUTERDE Gaël
AYRIGNAC Xavier	DAVID Aurore	PANSARD Nicole
BADR Maliha	DE BOUTRAY Marie	PERNIN Vincent
BAIS Céline	DE LA TRIBONNIÈRE Xavier	PERRIGAULT Pierre François
BARBAR Saber Davide	DEBIEN Blaise	PEYRON Pierre-Antoine
BASSET Didier	DELPONT Marion	PICARD Eric
BATIFOL Dominique	DENIS Héléne	PICOT Marie Christine
BATTISTELLA Pascal	DEVILLE de PERIERE Gilles	PIERONI Laurence
BAUCHET Luc	DJANIKIAN Flora	POQUET Héléne
BENEZECH Jean-Pierre	DONNADIEU-RIGOLE Héléne	PUJOL Sarah-Lise
BENNYNS Karim	FAIDHERBE Jacques	PUPIER Florence
BERNARD Nathalie	FATTON Brigitte	QUANTIN Xavier
BERTCHANSKY Ivan	FAUCHERRE Vincent	RAFFARD Laurence
BIBOULET Philippe	FILLERON Anne	RAPIDO Francesca
BIRON-ANDREANI Christine	FITENI Frédéric	RIBRAULT Alice
BLANC Brigitte	FOURNIER Philippe	RICHAUD-MOREL Brigitte
BLANCHARD Sylvie	GAILLARD Nicolas	RIDOLFO Jérôme
BLANCHET Catherine	GALMICHE Sophie	RIPART Sylvie
BLATIERE Véronique	GENY Christian	RONGIERES Michel
BOBBIA Xavier	GERONIMI Laetitia	ROULET Agnès
BOGE Gudrun	GINIES Patrick	RUBENOVITCH Josh
BOURRAIN Jean Luc	GRECO Frédéric	SANTONI Fannie
BOUYABRINE Hassan	GUEDJ Anne Marie	SASSO Milène
BRINGER-DEUTSCH Sophie	GUYON Gaël	SCHULDINER Sophie
BRINGUIER BRANCHEREAU Sophie	HENRY Vincent	SEGURET Fabienne
BRISOT Dominique	JAMMET Patrick	SENESSE Pierre
BRONER Jonathan	JEDRYKA François	SKALLI EI Mehdi
CADE Stéphane	JREIGE Riad	SOLA Christelle
CAIMMI Davide Paolo	KINNE Mélanie	SOULLIER Camille
CARR Julie	LABARIAS Coralie	STOEBNER DELABARRE Anne
CARTIER César	LACAMBRE Mathieu	TEOT Luc
CASPER Thierry	LANG Philippe	THIRION Marina
CASSINOTTO Christophe	LAZERGES Cyril	VACHIERY-LAHAYE Florence
CATHALA Philippe	LE GUILLOU Cédric	VERNES Eric
CAZABAN Michel	LEGLISE Marie Suzanne	VINCENT Laure
CHARBIT Jonathan	LOPEZ Régis	WAGNER Laurent
CHEVALLIER Thierry	LUQUIENS Amandine	ZERKOWSKI Laetitia
CHEVALLIER-MICHAUD Josyane	MANZANERA Cyril	
	MARGUERITTE Emmanuel	
	MARTIN Lucille	

REMERCIEMENTS

Aux membres du jury

Au Professeur Isabelle Laffont, présidente de mon jury, merci pour votre soutien sur ce projet, merci pour votre disponibilité et votre écoute. Mon plus grand regret est de ne jamais avoir eu l'occasion de travailler et de me former à vos côtés. Merci de m'avoir fait l'honneur de faire partie de mon jury.

Au Dr Jérôme Froger, mon directeur de thèse, tout d'abord, merci pour ton enseignement en rééducation lors de mon semestre au Grau du Roi. Tu m'as appris la rigueur et la patience. Merci pour ton encadrement sur ce travail, merci pour ta disponibilité et ta réactivité, j'en suis extrêmement reconnaissante.

Au Dr Sylvain Fazilleau, c'est un honneur de faire suite à ton projet. Merci de m'avoir transmis les connaissances que tu avais concernant le système de réalité virtuelle. J'espère que ce travail sera à la hauteur de tes attentes. Merci d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

A mes collaborateurs sur ce projet

Germain, merci pour ton aide précieuse sur ce travail. Tu m'as initiée à cette belle branche qu'est la recherche. A nos multiples péripéties ! « Eh oui, c'est ça la recherche ! ». Merci pour ton implication pendant les tests et pour les analyses statistiques. Merci pour ta réactivité. Je te souhaite une belle réussite dans tes projets futurs.

Karima, merci de m'avoir transmis toutes tes connaissances concernant le fonctionnement du Zebris, merci pour ton implication, merci pour ta bienveillance.

A mes chefs de MPR

Au Professeur Arnaud Dupeyron, merci pour tout l'enseignement que vous avez pu nous apporter. Merci pour votre encadrement, merci pour votre implication dans notre spécialité. Merci pour votre bienveillance.

A mes chefs de Nîmes

Frédéric P., Emilie G., Célia D., Nicolas M., merci pour tout l'enseignement que vous avez pu m'apporter.

Clarisse B., grâce à tes précieux conseils et recommandations, j'ai pu rejoindre l'équipe de Montpellier-Nîmes, merciiii !!!!

A mes chefs du Grau du Roi

Marion D., merci d'avoir participé à la logistique pour mes tests. Ce fut d'une aide précieuse ! Merci pour ton soutien lors de notre semestre au Grau du Roi. Ton arrivée dans l'équipe créa une nouvelle dynamique. Quel plaisir d'avoir pu travailler à tes côtés.

Juliette H., merci d'avoir été là lors de mon semestre. Ce fut tellement agréable de travailler à tes côtés ! Merci pour ta bonne humeur au quotidien et tes fous rires ! Merci d'avoir été aussi bon public.

A mes chefs de Propara

Hélène R., merci pour ton accueil à Propara, merci de m'avoir appris énormément de choses sur les blessés médullaires. Merci pour ton calme et ta simplicité. J'étais « la petite » pour toi, j'espère être devenue plus grande à l'issue de ce semestre. Ce fut un honneur et un plaisir de travailler à tes côtés.

Claire P., merci pour toutes les connaissances que tu as pu me transmettre ! Tu es d'une rigueur et d'un professionnalisme incroyable. J'ai beaucoup apprécié travailler à tes côtés. Je te souhaite le meilleur dans tes nouveaux projets.

Anthony G., merci pour l'enseignement que tu as pu m'apporter lors de ce semestre à Propara. Tu es d'une simplicité et d'une ouverture d'esprit incroyable !

Huei-Yune B., merci pour l'enseignement que tu as pu m'apporter, merci pour ta bienveillance.

A toutes les équipes de MPR

Infirmièr(e)s, aides-soignant(e)s, orthophonistes, kinésithérapeutes, ergothérapeutes, psychologues, diététiciennes, assistantes sociales, secrétaires, merci à tous pour votre accueil au sein des différents services. Merci pour votre collaboration. Notre belle spécialité n'a de sens que si on travaille en équipe ! Vous m'avez confortée dans l'idée que c'est possible !

Aux équipes de neurologie et de pédiatrie

A mes chefs, et à toutes les équipes, merci de m'avoir accueillie au sein de vos équipes. Merci pour tout l'enseignement que vous avez pu m'apporter.

A mes cointernes

Julien, à notre semestre au Grau du Roi. J'ai découvert quelqu'un de très patient, à l'écoute et d'une gentillesse énorme ! Merci pour tes conseils, merci de m'avoir supportée lors de ces 6 mois !

Cédric, aaaaah, mon sacré faisan ! Merci pour ce semestre passé à tes côtés. J'appréhendais beaucoup ce stage, mais grâce à toi je l'ai bien vécu ! Tu m'as coachée pour m'éviter de finir à pas d'heure, tu m'as permis de manger à des horaires corrects, surtout pour l'améliorer ! Qu'est-ce que j'ai pu rigoler à tes côtés ! Merci d'avoir été là !

Romane, à ta discrétion et à ton sérieux, à tes débuts en tant que bébé interne à nos côtés. Ce fut un plaisir de travailler avec toi !

Eva, je n'ai jamais eu l'occasion de travailler avec toi, mais merci pour ton implication en tant que responsable de filière. Merci pour ton soutien !

Cloé, Robin, Léa, Boris, Benjamin, Guillaume, Mathias, Tim et tous les autres, je suis fière de notre petite famille qu'est la MPR.

A mes cointernes de neuro et de pédiatrie: Pauline (la bible de la neurologie), **Sophie H., Ophélie, Nejm, Adrien, Morgane, Estelle, Sophie L., Mathieu, Claire, Mehdi, Dune et Lison,** à nos pauses déjeuner et nos pauses café où on pouvait décompresser ! Merci pour ce semestre passé à vos côtés.

A mes amis

A mes toulousaines

Louise et Justine, depuis le collège jusqu'à l'ECN, quel chemin nous avons traversé ensemble! Merci pour votre soutien pendant toutes ces années! Merci Justine de nous avoir accueillis dans ton appartement, le QG lors de tant de soirées !

Mathilde, à nos débuts en médecine. On l'a fait, on a eu la PACES ensemble ! Tu m'as permis de mieux vivre ces années de concours, avec ta petite touche de folie. A nos années folles d'externat ! Merci d'avoir été là !

Gabrielle, ma Gaby ! A toutes ces années passées à tes côtés depuis la quatrième. A nos vacances à Hossegor où on était si bien accueillies. Même si on ne se voit pas souvent je suis toujours heureuse de te retrouver.

Johanne, à toutes nos années passées ensemble. Ton départ de Toulouse vers de nouveaux horizons ne t'a pas empêché de rester fidèle à toi-même. A ta sincérité et à ton ouverture d'esprit !

Manue, Ducky, Lorène à nos années de collège et de lycée, nos chemins se sont séparés lors de notre entrée à la fac. Je suis tellement fière de ce que vous êtes aujourd'hui. A nos soirées entre filles !

A la team MPR

Agathe, sacrée gatou. Toujours pleine d'énergie et de bonne humeur. A nos pauses déjeuner à Nîmes et au Grau du Roi. Après un an et demi, ce fut bizarre de se retrouver sans toi. Tu as été ma cointerne, tu es devenue mon amie. Merci d'être ce que tu es, ne change pas !

Manon, ma zimus, à notre début d'internat ensemble, à nos fous rires (#chutesurletoitdela voiture), à nos pauses café, à nos covoit et aux nombreux apéros. Merci pour ta joie de vivre !

Baptiste, à ta simplicité, à ta gentillesse incroyable. On peut toujours compter sur toi !

A mes doudous

Sacré semestre à Nîmes. J'appréhendais mon arrivée dans une nouvelle ville sans connaître personne. Grâce à vous, je ne me suis jamais sentie seule. Merci pour ce super semestre, merci pour cette bonne ambiance !

A mes ptits délinquants

A nos goûters, à nos repas et à nos soirées, à nos rando... Sacrée équipe ! Quel bonheur d'avoir partagé ces années d'internat avec vous ! Et j'espère en partager bien plus !

Will et Laure, la team zebrina. A vos petits bébés, à Noël. **Will**, merci pour la confiance aveugle que tu me portes (#undercover), à tes allergies à chaque fois que tu nous vois, à ta gentillesse, à ta serviabilité, à Jeannette. **Laure**, à ta gentillesse, à ta bonne humeur, à nos craquages sur Vinted, à nos trocs de fringues, à ton énergie dont je suis admirative, à tes talents de chanteuse (#Céline), à ton déhanché incroyable sur le dancefloor. Quelle belle rencontre ! ;)

Aristide et Romane, mes alcoolytites, toujours motivés ! **Aristide**, toujours la classe avec ton bob, à ta simplicité, à ton humour. « Ça part ? ». **Romane**, ma beauté, à ta joie de vivre, à ton rire, à tes moments de folie à faire des battles de bouteille, à nos moments à rêver avec des maisons de maîtres, quel bonheur de vous avoir rencontré !

Jb et Chloé, mes supers voisins ! **Jb**, notre hyperactif du groupe ! (Même s'il n'est pas officiellement diagnostiqué, dixit une source que je ne citerai pas...). Ton énergie dynamise le groupe. Merci pour tous les bons plans que tu as pu me donner. Tu es d'une gentillesse et d'une serviabilité incroyable ! « On joue au Spikeball ??? ». **Chloé**, ma ptite mamie ! A ton rire unique, que je reconnaissais de loin au self ! A ta joie de vivre, à ta gentillesse, à tes nombreuses gaffes ! Merci pour ton écoute !

Justine, wonderwoman, la fille qui sait tout faire ! Je suis admiratrice de toutes tes prouesses ! A ta simplicité et à ton dynamisme. Toujours souriante, toujours motivée. A ton pas de dance unique que je n'ai jamais réussi à imiter !

Marine, à ton grain de folie, à ton sourire, à ta motivation en toutes circonstances !

Julie, à ton calme, à ta sérénité, à ta simplicité, à ta gentillesse.

Girod, à ton twerk endiablé et à nos craquages post-garde !

A la MAM en constitution

Merci d'avoir été là lors de mes années d'externat. Grâce à vous, j'ai pu décompresser entre deux bouquins de médecine !

Stéphane, à tes talents de danseur et de chanteur, à tes lasagnes préparées à peine sortis de table le midi pour le soir (eh oui, « il faut laisser la sauce mijoter »), à ton tarama et à ta côte de bœuf ; un vrai épicurien ! Ne change pas ;) **Charlotte**, à ta gentillesse, à nos confidences, à ton accueil chaleureux, merci de m'avoir si bien intégrée à vous !

Dimi, à ta cuisine bien huilée (mais très bonne !), à tes citations (#OSS 117) que je trouve tellement plus drôle lorsque c'est toi qui les dit ! (Désolée Stéphane et Gwendal...), à ton génie notamment concernant le fonctionnement des toilettes dans l'avion. Qu'est-ce que tu peux me faire rire ! **Marie**, à ta simplicité, à ta sincérité, à ta bonne humeur, à ta patience en toutes circonstances !

Baptiste, à tous les surnoms que tu as pu me donner (« la princesse du désert », et d'autres que je ne citerai pas ...), à ton énergie, à tes histoires si bien racontées qui nous font toujours rire. **Sandrine**, à ton calme en toutes circonstances, à ta bienveillance, à ton organisation hors pairs, à ta correction des histoires de Baptiste tant déformées !

Quel bonheur de vous voir épanouis en tant que parents. Eh oui, en un an il y a eu du changement ! Bienvenue à **Albane, Gaspard** et à **Eléonore**.

A ma famille

A mes parents, merci pour tous les sacrifices que vous avez fait pour nous offrir un avenir meilleur. Merci de m'avoir inculqué vos valeurs. Merci pour votre soutien sans faille en toutes circonstances. Sans vous je n'en serais pas là aujourd'hui. Merci pour tout, je vous aime.

A Hakim et Samia, mon grand frère et ma petite sœur, à notre enfance à se chamailler... que de souvenirs ! Je suis tellement fière de ce que vous êtes aujourd'hui. **Hakim** tu as toujours été un exemple pour moi, tu as mis la barre haute ! **Samia**, sistah, je suis tellement fière d'être ta sœur ! La distance fait qu'on ne se voit pas souvent, mais je pense fort à vous. Je vous aime.

A ma grand-mère, Yemas, à ton grand cœur, à ta gentillesse, à ta simplicité, à ton courage, à ta générosité. Merci pour ton soutien. Tu es un modèle pour moi, une leçon de vie. Je t'aime.

A mon grand-père, Papy, je pense souvent à toi ; à ton courage, à ton dévouement pour la famille, à toutes les histoires que tu nous racontais à la Colonne et à tes tours de magie... Pendant toute mon enfance, tu nous as montré l'importance de faire des études. Je souhaite te rendre hommage à travers cette soutenance.

A mes grands-parents paternels, que je n'ai malheureusement pas eu la chance de connaître, mais dont je suis tellement fière. Je souhaite vous rendre hommage à travers ce travail.

A mes oncles, tantes, cousins et cousines, quel honneur de tous vous avoir au sein de ma belle et grande famille ! Vous comptez tous beaucoup pour moi.

A Gwendal, merci pour ta patience, merci pour ta gentillesse, merci pour ton calme et ta sérénité. Merci de m'avoir soutenue toutes ces années, que ce soit pour le concours ou pour la thèse, tu as été d'un soutien sans faille. Tu es mon ami, mon confident, l'amour de ma vie. Je t'aime.

LISTE DES ABREVIATIONS

AP	Adaptation prismatique
AVC	Accident Vasculaire Cérébral
BIT	Behavioral Inattention Test
CHU	Centre Hospitalier Universitaire
ECB	Echelle de Catherine Bergego
NSU	Négligence Spatiale Unilatérale
SSA-m	Subjective Straight Ahead (droit devant manuel), en condition réelle
SSA-mV	Subjective Straight Ahead, en condition virtuelle
VOL	Visual Open Loop (pointage sans rétroaction visuelle en boucle ouverte)

Table des matières

INTRODUCTION	20
CHAPITRE I : LA NEGLIGENCE SPATIALE UNILATERALE	21
DEFINITIONS.....	21
MANIFESTATIONS CLINIQUES	21
TROUBLES ASSOCIES.....	22
EPIDEMIOLOGIE	22
CORRELATS NEURO-ANATOMIQUES.....	22
MODELES EXPLICATIFS.....	23
<i>Les théories attentionnelles</i>	23
<i>Les théories représentationnelles</i>	24
EVALUATION DE LA NEGLIGENCE SPATIALE UNILATERALE.....	25
<i>Les tests « papier-crayon »</i>	25
<i>Les tests représentationnels</i>	28
<i>Les tests comportementaux</i>	28
REEDUCATION DE LA NEGLIGENCE SPATIALE UNILATERALE.....	29
<i>L'approche de type « top-down »</i>	29
<i>L'approche de type « bottom-up »</i>	29
<i>L'approche de type « top-down » et « bottom-up »</i>	30
<i>L'approche neuropsychopharmacologique</i>	31
CHAPITRE II : L'ADAPTATION PRISMATIQUE	32
ADAPTATION AU PORT DE LUNETTES PRISMATIQUES	32
<i>Mécanismes impliqués dans le pointage d'une cible</i>	32
<i>Effets directs et consécutifs</i>	33
<i>Mesure des effets consécutifs</i>	34
<i>Nature de la recalibration sensorielle</i>	35
<i>Référentiels utilisés lors de l'adaptation prismatique</i>	36
<i>Modèle découlant des études des prismes</i>	36
GENERALISATION, TRANSFERT ET EXPANSION	37
<i>Généralisation</i>	37
<i>Transfert d'apprentissage</i>	37
<i>Expansion</i>	39
LES PRISMES COMME OUTIL DE REEDUCATION	40
<i>Protocole de rééducation par adaptation prismatique en condition réelle</i>	40
<i>Efficacité de la rééducation par adaptation prismatique</i>	43
<i>Protocole de rééducation par adaptation prismatique en condition virtuelle</i>	44
CHAPITRE III : ETUDE DE VALIDATION DE L'ADAPTATION PRISMATIQUE EN REALITE VIRTUELLE IMMERSIVE CHEZ LES SUJETS SAINS	45
MATERIEL ET METHODE	45
<i>Type d'étude</i>	45
<i>Matériel</i>	46
<i>Mesure du droit devant</i>	48
<i>Population</i>	49
<i>Procédure pour H1</i>	50
<i>Critères de jugement pour H1</i>	52
<i>Procédure et critère d'évaluation pour vérifier l'hypothèse H2</i>	55
<i>Analyse statistique</i>	57
RESULTATS.....	58

<i>H1 : La différence d'angle (la déviation due à l'exposition) est-elle au moins aussi grande avec l'exposition virtuelle qu'avec l'exposition réelle ?</i>	58
<i>H2: l'angle donné par le systèmes HTC vive est-il le même que celui donné par le ZEBRIS ?</i>	59
DISCUSSION	60
<i>Pour l'hypothèse H1</i>	60
<i>Pour l'hypothèse H2</i>	63
CONCLUSION	65
BIBLIOGRAPHIE	66
ANNEXES	71
ANNEXE 1.....	71
ANNEXE 2.....	72
ANNEXE 3.....	73

INTRODUCTION

La négligence spatiale unilatérale (NSU) est un trouble neuropsychologique caractérisé par des difficultés à signaler, répondre ou à orienter son attention vers des stimuli présents du côté opposé à la lésion cérébrale, non imputable à un déficit sensoriel ou moteur. Ce syndrome touche environ un tiers des patients après un accident vasculaire cérébral (AVC) (1). En France, 140 000 nouveaux cas d'AVC surviennent chaque année, ce qui fait de la NSU un problème de santé publique majeur.

Il s'agit d'un trouble du comportement sensori-moteur ayant un impact important sur les activités de la vie quotidienne. Ce syndrome est un facteur de mauvais pronostic de récupération après un AVC. L'enjeu en rééducation est donc majeur.

De nombreux protocoles de rééducation ont été proposés, dont l'adaptation prismatique qui semble être une des méthodes les plus prometteuses. Cependant, cette technique nécessite un matériel spécifique et un protocole d'exposition contraignant limitant son recours en centre de rééducation. La rééducation en réalité virtuelle immersive pourrait permettre de s'affranchir de ces obstacles.

Le premier chapitre a pour objectif de décrire la négligence spatiale unilatérale, son évaluation et les méthodes de rééducation utilisées.

Le second chapitre sera dédié à l'adaptation prismatique chez le sujet sain et comme outil de rééducation chez le patient présentant une NSU.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude que nous avons menée sur des sujets sains afin de valider l'outil de mesure et de rééducation par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive en comparaison à l'adaptation prismatique classiquement décrite.

Chapitre I : La négligence spatiale unilatérale

Définitions

Selon Heilman (2), la négligence spatiale unilatérale est un trouble neuropsychologique caractérisé par des difficultés à signaler, répondre ou à orienter son attention vers des stimuli présents du côté opposé à la lésion cérébrale, non imputable à un déficit sensoriel ou moteur. Ce syndrome est principalement retrouvé après une lésion hémisphérique ; plus particulièrement dans les suites d'un accident vasculaire cérébral (AVC) hémisphérique droit (3), responsable d'une négligence de l'hémi-espace gauche. Ce trouble peut avoir un impact significatif sur de nombreuses activités de la vie quotidienne (4) et aggraver le pronostic de l'AVC. Le fait qu'il s'agisse d'un trouble du comportement sensori-moteur et non d'un déficit élémentaire complexifie sa prise en charge.

Manifestations cliniques

La négligence peut être **extra-corporelle** ; le sujet peut alors omettre ce qu'il y a à sa gauche, ou la partie gauche d'un objet. Le patient héminégligent présente souvent une déviation conjuguée de la tête et des yeux du côté de la lésion cérébrale. Il peut avoir des difficultés à se déplacer avec son fauteuil roulant du côté gauche (5) ou encore des difficultés à répondre aux stimuli présents à sa gauche (6). Par ailleurs, il peut omettre de manger les aliments présents sur la partie gauche de son assiette.

La négligence peut également être **corporelle**. Le patient peut omettre de se raser la partie gauche de son visage. Une négligence de l'hémicorps entier peut se manifester chez certains patients.

La négligence peut être **sensorielle** (visuelle le plus souvent, auditive, somesthésique ou olfactive).

Enfin, elle peut affecter le **comportement moteur** et correspondre à une pseudo-hémiplégie (7).

On peut retrouver des troubles posturaux du fait de l'atteinte du référentiel égocentrique ; le patient aura tendance à incliner le tronc vers la gauche. Cela peut dans les formes les plus sévères se manifester par un syndrome Pusher (8), le patient résiste alors lorsqu'on essaye de le remettre droit.

Troubles associés

La négligence spatiale unilatérale s'intègre souvent dans le cadre du syndrome d'Anton-Babinski, associant héminégligence, anosognosie, anosodiaphorie et hémi-asomatognosie.

- L'anosognosie correspond à l'absence de conscience du déficit,
- L'anosodiaphorie correspond à l'indifférence du patient à l'égard de son déficit (5),
- L'hémi-asomatognosie se manifeste par le fait que le patient ne reconnaisse plus l'hémicorps opposé à sa lésion comme lui appartenant.

Epidémiologie

La négligence spatiale unilatérale est principalement retrouvée après une lésion cérébrale droite (9). Son incidence pourrait atteindre jusqu'à 85% des patients à la phase aigüe (10). Environ un tiers des patients présenteraient des séquelles de NSU (1) de manière chronique, ce qui fait de ce syndrome un problème de santé publique majeur.

Corrélat neuro-anatomiques

La négligence spatiale unilatérale est le plus souvent liée à une lésion hémisphérique droite, responsable d'une héminégligence gauche. Il peut toutefois plus rarement s'agir d'une héminégligence droite, liée à une lésion gauche (11).

Ce syndrome est le plus souvent dû à une occlusion de l'artère cérébrale moyenne droite. Les zones le plus souvent touchées sont le carrefour temporo-pariéto-occipital droit et le lobule pariétal inférieur droit (5).

D'autres sites peuvent également être impliqués ; notamment le gyrus cingulaire, le cortex pré-frontal, le striatum ou encore le thalamus (10).

Enfin, des lésions sous-corticales peuvent être en cause, par phénomène de diaschisis (inhibition fonctionnelle d'une zone corticale située à distance d'une lésion cérébrale, mais qui possède des liens anatomiques et physiologiques directs ou indirects avec la zone lésée). Le pronostic de récupération est alors meilleur dans cette situation (12).

Les diverses zones impliquées dans ce syndrome expliquent ainsi l'hétérogénéité des symptômes.

Modèles explicatifs

Le polymorphisme clinique de la négligence spatiale unilatérale fait que ce syndrome ne peut être expliqué par une origine physiopathologique unique.

En effet, la négligence spatiale unilatérale peut résulter de différentes atteintes ; troubles de l'intégration perceptive, troubles de l'orientation de l'attention, perte de la représentation spatiale ou encore troubles de la programmation du mouvement (10).

Ainsi, deux grandes théories ont été développées afin d'expliquer ce syndrome.

Les théories attentionnelles

- Heilman (13) propose un support anatomo-fonctionnel selon lequel la NSU résulterait de l'interruption d'une boucle cortico-cingulo-réticulaire. Cette structure assurerait le contrôle moteur, sensoriel et attentionnel de l'hémi-espace controlatéral.

- Posner (14), dans sa théorie cognitive a étudié l'attention sélective chez des sujets sains et des sujets présentant une lésion cérébrale droite. L'expérience qu'il a menée était la suivante : les patients présentant une lésion cérébrale devaient appuyer sur un bouton lorsqu'une cible s'allumait devant eux. Une mesure du temps de latence était réalisée. Chez les patients présentant une lésion cérébrale droite, lorsque la cible était présentée à gauche, le temps de latence était supérieur au temps de latence droit. En revanche, lorsqu'avant de présenter la cible,

le regard et l'attention du patient étaient attirés par un carré lumineux dans l'hémi-espace gauche, les temps de latences se normalisaient. A l'inverse, si le regard et l'attention du patient étaient attirés du côté droit, les temps de latence augmentaient. Posner a ainsi évoqué la possibilité d'un défaut de désengagement attentionnel.

- Rizzolatti et Camarda (15) mettent en avant le rôle de l'étape pré-motrice de l'attention spatiale. La NSU résulterait de l'interruption d'un réseau de neurones impliqués dans le traitement d'informations issues d'une partie de l'espace et utilisée pour l'action.

- Kinsbourne (16) a développé sa théorie sur le déséquilibre inter hémisphérique selon laquelle chaque hémisphère contrôlerait l'attention de l'hémi-espace controlatéral selon des vecteurs attentionnels opposés. La NSU résulterait d'un déséquilibre entre ces deux vecteurs attentionnels.

- Mesulam (17) avance l'existence d'un réseau cortical à l'origine de l'attention sélective. Il serait organisé autour de quatre structures fonctionnelles interactives : le cortex pariétal postérieur (perception et représentation interne de l'espace), le cortex cingulaire (motivation pour sélectionner les stimuli pertinents), le cortex frontal (programmation motrice) et la rétículo-mésencéphalique (pour l'activation globale non spécifique). La NSU serait ainsi partielle si la lésion concerne un des éléments de ce réseau ou complète si l'ensemble du réseau est atteint. L'intervention des structures sous-corticales dans la fonction d'attention sélective n'est pas prise en compte dans ce modèle.

Les théories représentationnelles

- Bisiach (18) en est le précurseur avec ses travaux sur la description de la Place du Dôme à Milan par évocation mentale. Il observait alors que les patients ne décrivaient que la partie de la place située à leur droite, qu'ils s'imaginent regarder la place de face ou de dos. Ainsi, d'après Bisiach, la négligence n'est pas toujours limitée au domaine perceptif ou intentionnel. Il avance l'idée qu'il existerait au niveau de chaque cortex pariétal une représentation mentale analogique de l'hémi-espace controlatéral.

- Jeannerod (19) postule l'existence d'un système interne de coordonnées dans lequel est définie la position des objets dans l'espace. Il définit ainsi le référentiel égocentrique. Ce référentiel est utilisé pour l'orientation dans l'espace et pour la coordination visuo-motrice. Il peut être évalué en demandant au sujet de pointer droit devant dans l'obscurité. Le patient présentant une NSU gauche va ainsi présenter une déviation du pointage vers la droite (en direction de son biais comportemental). Les travaux de Richard et al. (20) montrent qu'il s'agit d'une translation du référentiel égocentrique plutôt que d'une rotation ; en effet, lorsque les patients réalisaient des pointages en direction du droit devant à l'aide d'une tige horizontale, ils présentaient systématiquement une translation vers la droite de la tige et non pas une rotation.

Evaluation de la négligence spatiale unilatérale

La négligence spatiale unilatérale est un trouble du comportement complexe qui ne se résume pas à un déficit élémentaire. Son évaluation nécessite ainsi une batterie de tests qui permettent d'en appréhender les différentes composantes.

Les tests « papier-crayon »

* **Les tests visuo-perceptifs** ; qui explorent à la fois les aspects perceptifs et attentionnels.

- *L'identification de figures enchevêtrées* : qui permet d'évaluer la composante visuo-perceptive.

- *Le test des bœufs* : il s'agit d'un test très sensible mais peu spécifique ; il est fréquemment perturbé lorsqu'il existe un trouble visuel.

- *Le test de lecture* (21) : qui met en évidence l'alexie ; le sujet ne peut lire que la partie droite du texte dans sa globalité (les erreurs sont alors égocentrées), ou seulement la partie droite de chaque mot (les erreurs est alors allocentrées).

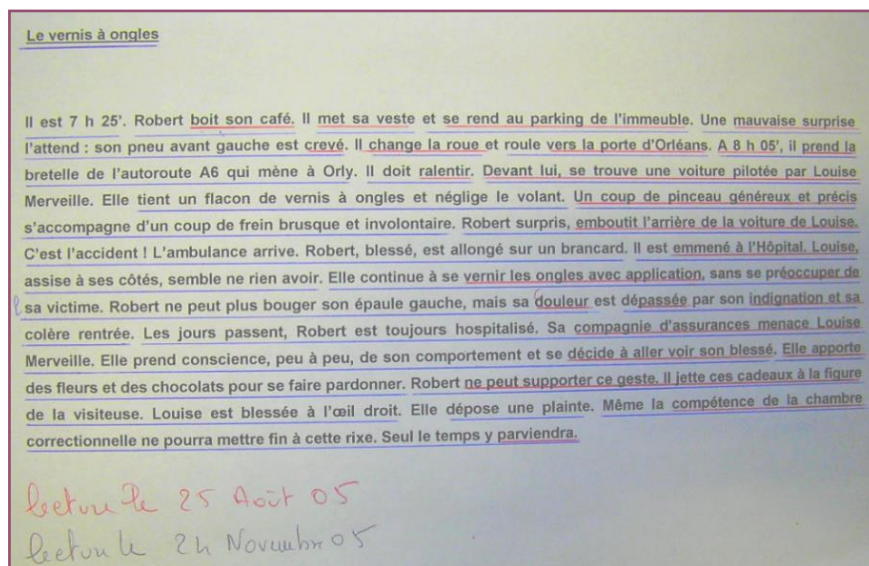


Figure 1: test de lecture, les mots lus par le patient sont soulignés par l'examinateur. Ici, exemple d'erreurs égocentrées.

* **Les tests visuo-graphiques** : qui explorent à la fois les aspects perceptifs et intentionnels.

- Les tests de barrage d'objets (barrage de lignes de Albert (22), test des cloches (23) ; les patients débutent l'exploration du côté droit et vont omettre les éléments situés à gauche dans le cadre d'une NSU gauche.

Test d'Albert (24) : une série de 40 lignes sont orientées de façon aléatoire sur 6 rangées sur une feuille en format A4. L'évaluateur demande au patient de barrer toutes les lignes. La NSU est fonction du nombre de lignes non barrées. Si plus de 70% des lignes non barrées se trouvent du même côté, la NSU est présente. La sensibilité de ce test est de 67% avec une valeur prédictive positive de 100%.

Test des cloches (25) : on demande au patient d'entourer les cloches présentes sur une feuille au sein de 40 éléments de distraction. Il y a 35 cloches réparties sur 7 colonnes (15 cloches à gauche, 15 cloches à droite, 5 cloches au milieu). Le nombre total de cloches encadrées est comptabilisé ainsi que le temps mis par le patient pour réaliser le test. Une omission de 6 cloches ou plus sur une des moitiés de la page indique une NSU. Le patient présentant une NSU gauche commence en général par la partie droite de la feuille.

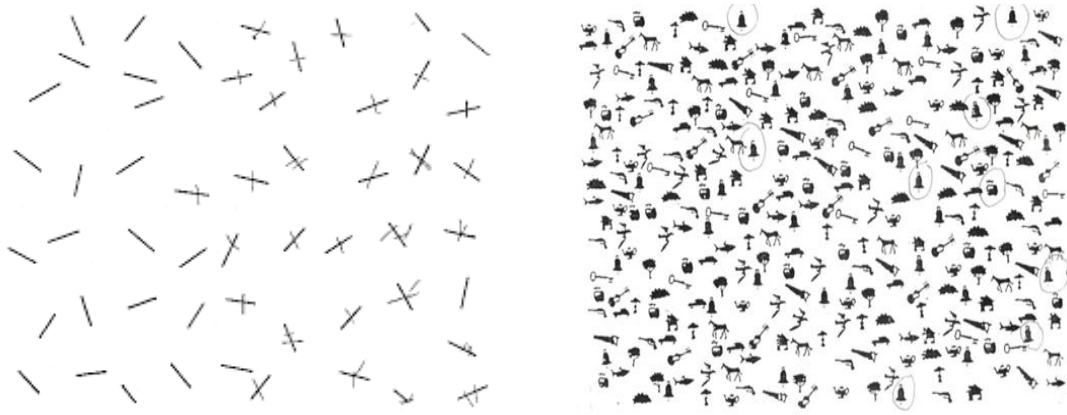


Figure 2: test de barrage d'Albert à gauche et test des cloches à droite.

- Les tests de bissection de ligne (26) : le sujet doit indiquer le milieu de la ligne qui lui est présentée. Le patient négligent aura tendance à décaler le milieu en direction de la lésion cérébrale. Ce test est peu sensible.

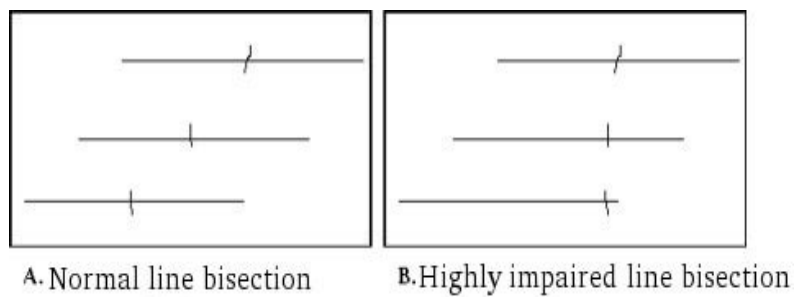


Figure 3: test de bissection de ligne.

- Les dessins sur copie d'objets symétriques : le patient héminégligent omettra de dessiner la partie gauche du dessin.

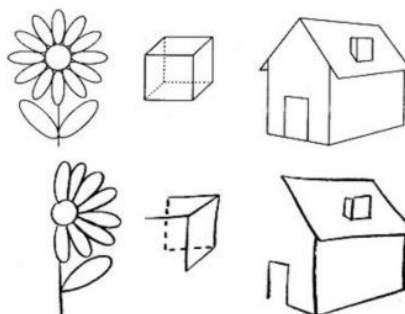


Figure 4 : copie de dessins symétriques.

Les tests représentationnels

- Les dessins de mémoire

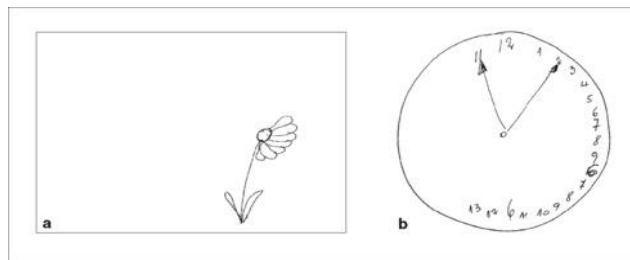


Figure 5 : dessins réalisés par un patient héminégligent gauche.

L'ensemble des tests précédemment cités ne suffisent pas à eux seuls au diagnostic de la NSU. En effet, la réalisation de tests comportementaux est essentielle.

Les tests comportementaux

* **L'échelle de Catherine Bergego (ECB)** : test d'évaluation du retentissement de la NSU dans les actes de la vie quotidienne. Elle est évaluée par le patient et par le thérapeute et permet donc d'évaluer l'anosognosie en plus de la NSU.

* Les batteries standardisées d'évaluation :

- Le *Behaviour Inattention Test* (B.I.T) (27) : qui comporte en plus des tests conventionnels de la NSU, des tests comportementaux simulant les activités de la vie quotidienne (manger un repas, composer un numéro de téléphone, lire un menu, lire l'heure, régler l'heure, trier des pièces, copier une adresse, et suivre une route sur une carte).

- La *batterie d'Evaluation de la Négligence Unilatérale de GEREN* (B.E.N) (28) : qui intègre des tests visuo-graphiques et visuo-perceptifs ainsi que l'échelle de Catherine Bergego.

Rééducation de la négligence spatiale unilatérale

Afin de diminuer la négligence spatiale unilatérale, deux grandes approches sont décrites : l'approche « top-down » et l'approche « bottom-up ».

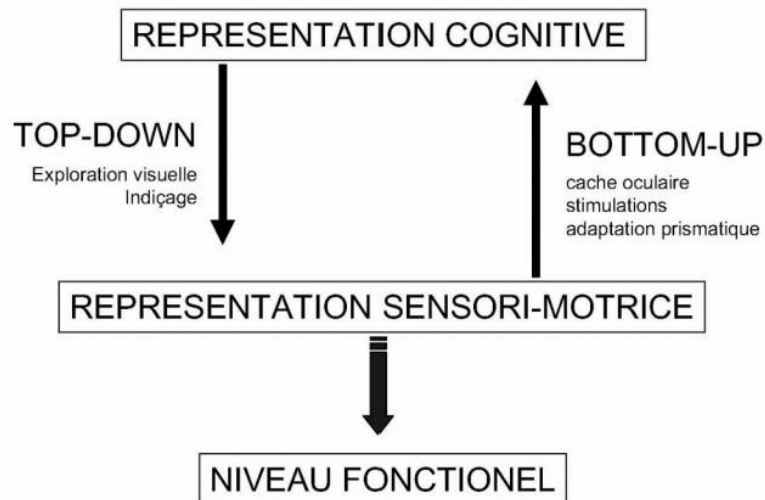


Figure 6: les deux approches de la rééducation du syndrome d'héminégligence.

L'approche de type « top-down »

Cette approche incite le patient à explorer l'espace négligé en se basant sur une orientation consciente et volontaire vers cet espace. Cela implique une charge cognitive élevée. Cela peut se faire à travers l'exploration visuelle ou encore l'indiçage. Diller et Weinberg en ont été les précurseurs (29). Les exercices répétés d'orientation des yeux du côté négligé ont pour but de restaurer une orientation automatique du regard.

L'approche de type « bottom-up »

A partir d'un processus passif agissant par le biais de manipulations sensorielles, cette approche permet d'améliorer la représentation spatiale du patient (30). Ce processus ne demande aucun travail attentionnel de la part du patient.

Différentes méthodes de rééducation sont décrites à travers cette approche ;

- *Les stimulations sensorielles* ; stimulations vestibulaires hypokinétiques, stimulation électrique transcutanée ou vibratoire des muscles de côtes... Par ces méthodes, il a été rapporté une réduction de la négligence extra-personnelle, personnelle, des déficits moteurs et sensitifs associés et même de l'anosognosie. Malheureusement, ces effets bénéfiques n'étaient que transitoires, ce qui pourrait être expliqué par le fait que la NSU soit consécutive à la lésion d'aires cérébrales multi-modales impliquées dans l'intégration des informations multi sensorielles (30).

- *Le cache œil ou « eye patching »* qui en occultant l'hémi-espace sain oblige la patient à explorer l'hémi-espace négligé (31).

- *L'adaptation prismatique* ; (dont nous nous intéresserons plus spécifiquement dans le chapitre II) (AP) qui est une technique qui a été proposée par l'équipe de G. Rodes et Y. Rossetti (7). Une déviation de l'environnement visuel est provoquée de façon artificielle par le port de prismes optiques (10° vers la droite). Lorsque le sujet pointe en direction d'une cible, son mouvement est dévié. Il prend alors conscience de son erreur qu'il va progressivement corriger ; il s'agit du phénomène d'adaptation. Au retrait des lunettes, les mouvements de pointages sont décalés dans la direction opposée aux prismes (vers la gauche). Il s'agit du post-effet proprioceptif. L'idée est d'utiliser ce post-effet proprioceptif pour réorienter le comportement du patient du côté gauche.

Une rééducation intensive par adaptation prismatique (deux séances d'AP deux fois par jour pendant deux semaines) améliorerait selon une étude les patients sur le plan de la négligence visuelle et des paramètres plus fonctionnels jusqu'à 5 semaines après exposition (32).

L'approche de type « top-down » et « bottom-up »

- Wiart et al. (33) ont montré une amélioration durable de l'héminégligence en associant une tâche d'exploration visuelle et le port d'une orthèse du tronc qui oblige le patient à désigner les stimuli grâce à une rotation guidée du tronc, à l'origine, d'après les auteurs, d'un recalibrage du référentiel égocentré.

- Schindler et al. (34) ont plus récemment montré une amélioration des symptômes de la NSU et de leurs conséquences fonctionnelles grâce à l'association d'une tâche d'exploration visuelle et d'une vibration des muscles postérieurs de la nuque.

Ces travaux suggèrent que l'association des deux approches serait susceptible d'entraîner des effets supérieurs à ceux de liés à l'utilisation d'une seule méthode

L'approche neuropsychopharmacologique

Certains travaux ont montré une amélioration transitoire de la négligence gauche sévère suite à l'administration de Guanfacine (alpha-2-agoniste noradrénergique) (35). D'autre part, l'utilisation de Rotigotine (agoniste dopaminergique) permettrait d'améliorer la recherche visuelle et l'attention sélective chez les patients héminégligents (36).

Enfin, des études montrent une amélioration transitoire de la NSU grâce à l'utilisation de la Stimulation Magnétique Transcrânienne répétitive (rTMS) (37) et de la stimulation transcrânienne à courant continu (tDCS) (38) du fait de la réduction de l'hyperexcitabilité anormale du cortex pariétal de l'hémisphère non lésé.

Ces diverses approches ont une efficacité sur les tests, qui est souvent transitoire. D'autre part leur efficacité sur les activités de la vie quotidienne reste à démontrer. Une méta-analyse réalisée en 2013 (39) montre que l'adaptation prismatique semble être le traitement le plus efficace. Cependant, une revue Cochrane de 2021 incluant de nombreux essais randomisés sur les méthodes non pharmacologiques de rééducation de la NSU (y compris la rééducation par adaptation prismatique) montre que l'efficacité de ces méthodes sur les activités de la vie quotidienne reste à démontrer.

Lors du chapitre suivant, nous aborderons plus en détail la méthode de rééducation par adaptation prismatique.

Chapitre II : L'adaptation prismatique

En conditions normales, les informations spatiales provenant de modalités sensorielles différentes sont congruentes. Cette coordination entre les différentes modalités sensorielles peut être modifiée par des dispositifs optiques, ce qui crée un conflit sensori-moteur. Les systèmes moteur et perceptifs peuvent ainsi s'ajuster afin de réduire ou d'éliminer ce conflit.

Dans ce chapitre, nous allons expliquer le phénomène d'adaptation au port de lunettes prismatiques. Nous nous intéresserons ensuite à la rééducation par adaptation prismatique.

Adaptation au port de lunettes prismatiques

Mécanismes impliqués dans le pointage d'une cible

Les lunettes prismatiques, équipées de deux prismes d'une puissance de 20 dioptries, sont responsables d'une déviation du champ visuel de 10° vers la droite qui induit un conflit entre vision et proprioception lorsque la main est visible.

Lors de la première exposition, la trajectoire du pointage en direction de la cible est déviée vers la droite. Le sujet va se rendre compte de cette déviation et il va alors tenter de corriger ce biais. Pour cela plusieurs méthodes de compensation sont possibles : soit modifier la direction initiale du mouvement (compensation motrice). C'est le seul phénomène responsable de l'adaptation vrai. Soit corriger la trajectoire du pointage en temps réel en utilisant le rétrocontrôle visuel (ce qui ne peut se faire que pour des mouvements lents). A l'inverse, si le sujet se base uniquement sur son rétrocontrôle proprioceptif, il sera attiré vers la cible virtuelle et présentera des erreurs de pointage.

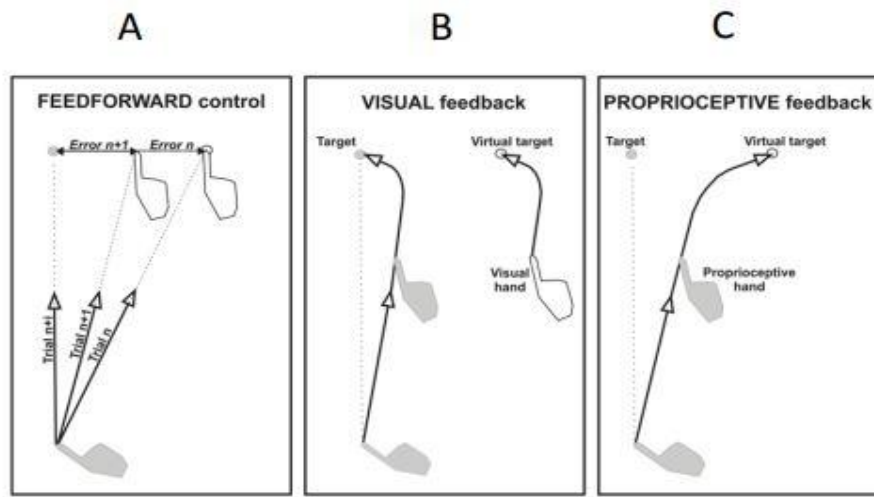


Figure 7: mécanismes impliqués dans les tâches de pointage. La main est grise lorsqu'elle n'est pas vue par le sujet et blanche lorsqu'il la voit.

La figure 7A représente la compensation à l'initiation du mouvement ; le sujet ne voit sa main qu'en position finale au moment du pointage. Il visualise alors son erreur terminale et adapte sa trajectoire à l'initiation du mouvement suivant. La figure 7B représente la compensation par rétrocontrôle visuel en temps réel ; le sujet visualise sa main au cours du mouvement à la moitié de la trajectoire environ et adapte alors sa trajectoire en temps réel pour pointer en direction de la cible. Enfin, la figure 7C représente le rétrocontrôle proprioceptif attirant le pointage vers la cible virtuelle, entraînant une erreur de pointage. Le sujet ne visualise pas sa main tout au long du pointage (10).

Deux types d'effets vont être observés lors de l'exposition aux prismes (les effets directs) ou après l'exposition (les effets consécutifs).

Effets directs et consécutifs

- **Effets directs** : le premier pointage réalisé lors du port de prismes (sans vision de la main) se traduit souvent par une erreur motrice importante en direction du biais visuel introduit et représente environ 50 à 100% de cette perturbation (40,41). Cette erreur décroît très rapidement pour atteindre le niveau de précision observé en l'absence de prismes au bout d'une trentaine de pointages (42).

- **Effets consécutifs** : au retrait des lunettes prismatiques, lors du premier pointage, une erreur motrice se produit dans la direction opposée à celle du biais directionnel et représente environ 40 à 80% de la perturbation. Cette recalibration perceptivo-motrice ne peut être observée que si le sujet ne voit pas son membre en position de départ (40). L'ampleur de l'effet consécutif est fortement corrélée à l'adaptation prismatique : i) à l'importance de la déviation prismatique en degrés et ii) au nombre d'essais lors du port de prismes (jusqu'à atteindre un plateau au bout de 25 à 50 essais) (43). L'adaptation visuo-motrice consécutive au port de prismes est incomplète, même après un grand nombre d'essais. Sans que l'on sache pourquoi, l'effet consécutif est de 40% de la déviation du prisme (44). De plus l'adaptation prismatique semble être impactée par les facteurs cognitifs. En effet, l'étude de Jakobson & Goodale (45) montre que lorsque les sujets sont informés du déplacement visuel, leurs performances sont similaires à celle des sujets contrôles (ne portant pas de prismes).

Mesure des effets consécutifs

- **Le droit devant manuel (proprioceptif) = « Subjective Straight Ahead » manuel, SSA-m** : Le sujet place la main droite contre le sternum. Avec les yeux fermés, le sujet effectue 10 mouvements de pointage en direction de son « droit devant ». Entre chaque pointage il revient à la position de départ. Il mesure la composante proprioceptive uniquement et permet de mettre en évidence l'alignement du référentiel égocentrique. Il s'agit du test pour lequel l'effet des prismes est le plus important (46) et qui présente la plus grande corrélation avec l'amélioration des patients (47). Rode et al (48) recommandent d'utiliser ce test pour quantifier le phénomène d'adaptation prismatique ainsi que pour le suivi de la référence égocentrique des patients. Dans l'étude de Rossetti (7), un effet consécutif a été retrouvé chez le sujet sain avec une déviation de 4 degrés vers la gauche sur la tâche du droit devant manuel.

- **Le droit devant visuel (visuo-perceptif) = « Subjective Straight Ahead » visuel, SSA-v** : le sujet doit stopper le déplacement d'une cible visuelle dans le noir lorsqu'elle est perçue en position « droit-devant ». Il mesure uniquement la composante visuelle. L'étude de Rode et al. (46) met en évidence un décalage compensateur du côté de la déviation optique (à droite) dans cette situation.

- **La précision du pointage sans rétraction visuelle en boucle ouverte = « Visual Open Loop pointing », VOL :** le sujet réalise 10 pointages en ouvrant les yeux pour visualiser la cible puis en les fermant avant chaque pointage. Le but est de tester le réalignement proprioceptif en s'affranchissant de la compensation par rétrocontrôle visuel. Il a été décrit l'additivité des effets visuels et proprioceptifs de l'adaptation : $VOL = SSA-m + SSA-v$ (46).

Ainsi, comme le décalage compensateur de la composante visuelle se fait vers la droite, la déviation du SSA-m qui se fait vers la gauche est plus élevée que celle du VOL.

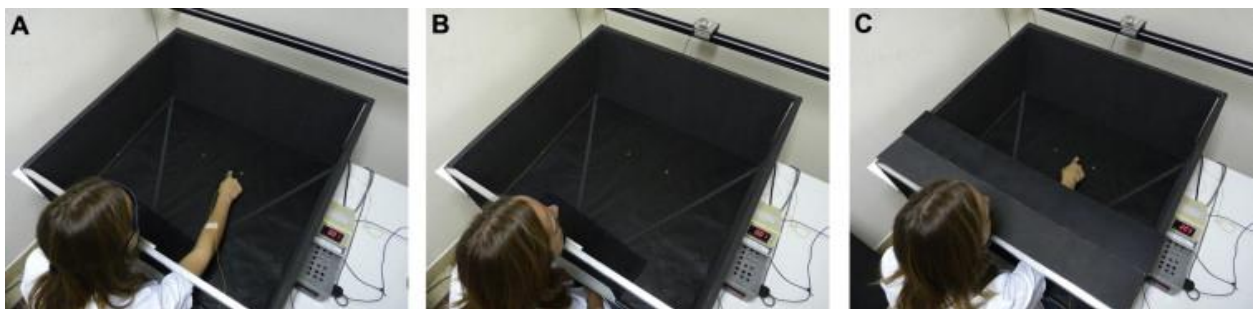


Figure 8 : mesure du post effet selon Rode et Al. (46). A : mesure du SSA-m, B : mesure du SSA-v, C : mesure du VOL.

Nature de la recalibration sensorielle

La nature de l'adaptation dépend essentiellement des conditions dans lesquelles la tâche est effectuée :

- L'adaptation est proprioceptive lorsque la main est visible très tôt pendant le mouvement ; le contrôle de la trajectoire motrice étant essentiellement visuel.

- L'adaptation est visuelle lorsque la main est visible en fin de mouvement ; le contrôle de la trajectoire motrice étant surtout proprioceptif (49).

Ceci est valable pour des mouvements lents. Lorsque les mouvements sont plus rapides, l'adaptation proprioceptive est dans tous les cas plus importante que l'adaptation visuelle (50). En effet, dans l'étude de Redding et Wallace, les sujets étaient exposés aux prismes et devaient réaliser 60 pointages toutes les 2 ou 3 secondes avec visualisation précoce ou plus tardive de leur membre supérieur. Ils mesuraient ensuite le post-effet avec 10 mouvements de pointages. Ils remarquent que si les pointages lors de l'exposition étaient réalisés toutes les 3 secondes, lorsque le bras était visible précocement lors des pointages, l'adaptation proprioceptive était plus importante que l'adaptation visuelle. A l'inverse, l'adaptation était essentiellement visuelle lorsque le bras était visualisé en fin de mouvement seulement. En revanche, lorsque les pointages

étaient réalisés toutes les 2 secondes, l'adaptation était principalement proprioceptive, que le membre supérieur soit vu précocement ou tardivement.

Référentiels utilisés lors de l'adaptation prismatique

Selon Redding et Wallace (40), l'absence de vision de la main avant le début du mouvement induit l'utilisation d'un système de codage absolu de la position de la cible par rapport au corps alors que la vision simultanée de la main et de la cible met en jeu un système de codage relatif. Ainsi, lorsque seule la cible est vue avant le début du mouvement, l'erreur motrice en fin de trajectoire est importante. Le sujet va alors corriger sa trajectoire à chaque initiation de mouvement, il s'aidera ensuite de son rétrocontrôle visuel à la fin du mouvement afin de diminuer son erreur motrice et de pointer en direction de la cible. A l'inverse, si la cible et la main sont visibles simultanément avant le début du mouvement, aucune erreur motrice n'est constatée en fin de mouvement. En effet, le sujet corrigera sa trajectoire en temps réel grâce au rétrocontrôle visuel.

Modèle découlant des études des prismes

Il est important de dissocier l'adaptation à la perturbation pendant que le sujet est exposé aux prismes à celle observée au retrait des prismes. En effet, selon Redding & Wallace (51), ces deux formes d'adaptation permettent de rendre compte de deux processus interdépendants ; le contrôle perceptivo-moteur stratégique et l'alignement spatial adaptatif.

- ***Le contrôle perceptivo-moteur stratégique*** : il est mesuré grâce aux effets directs. Grâce au retour d'information visuelle, ce système va substituer aux paramètres moteurs perçus comme étant inefficaces de nouveaux paramètres moteurs favorisant l'atteinte de la cible. Il se met en place rapidement, pour atteindre une compensation de l'erreur motrice au bout d'une trentaine d'essais. Ce système induit ainsi une réduction rapide de l'erreur motrice à court terme. L'adaptation reste cependant spécifique à une région spatiale limitée autour de la localisation apprise (52).

- ***L'alignement spatial adaptatif*** : il est mesuré grâce aux effets consécutifs. Ces effets traduisent la plasticité entre le système perceptif et moteur, ce qui devrait permettre une adaptation à long terme. Après 60 essais, l'adaptation consécutive au port de prismes ne

correspond qu'à une compensation de 40% du décalage (53). Dans cette situation, l'apprentissage serait transférable à l'ensemble des localisations spatiales possibles (54).

La détection du désaccord entre les différentes sources d'informations perceptives par le contrôle perceptivo-moteur stratégique est essentielle à la mise en place de l'alignement spatial adaptatif.

Généralisation, transfert et expansion

Généralisation

Il s'agit des applications de la compensation acquise dans un contexte spécifique à de nouvelles conditions (55) ; notamment à des cibles de localisations différentes de celles pour lesquelles le sujet a été entraîné (56). Ce mécanisme permet ainsi d'améliorer la prise de conscience des informations situées du côté vers lequel le comportement moteur a été réorienté.

L'étude d'Alexander et al. (57) réalisée sur 24 sujets sains exposés à des lunettes prismatiques déviant le regard vers la droite pendant qu'ils marchaient vers deux cibles ou évitaient un obstacle montre que les sujets exposés à l'une ou l'autre tâche présentaient également un post-effet (vers la gauche) dans la tâche pour laquelle ils n'avaient pas été entraînés. Ce phénomène de généralisation était cependant observé uniquement sur le membre inférieur gauche.

Transfert d'apprentissage

Le transfert d'apprentissage fait référence à la capacité à transférer le post-effet de l'adaptation prismatique à une tâche pour laquelle le sujet n'a pas été entraîné (conduire un fauteuil roulant par exemple) ou à l'utilisation du membre controlatéral.

Il semblerait que l'adaptation prismatique pourrait être transférée d'un segment corporel à l'autre préférentiellement lorsque l'apprentissage a été effectué dans certaines conditions ; notamment lorsque la position du membre effecteur n'est contrôlée qu'en fin de mouvement (58).

D'autre part, l'étude de Wallace & Fisher (59) montre qu'aucun transfert n'est observé lorsque le membre utilisé est anesthésié. Les réafférences proprioceptives sembleraient ainsi jouer un rôle majeur lors du transfert inter-manuel.

Un apprentissage portant sur une localisation spatiale définie ne se transfère qu'aux localisations spatiales proches de celles apprises lorsqu'il faut atteindre une cible en mouvement. A l'inverse, lorsque les cibles sont statiques, le transfert d'apprentissage est observé quelle que soit la position des cibles dans l'espace (54). Ainsi, les stimuli dynamiques entraîneraient une adaptation locale alors que les stimuli statiques permettraient d'induire une adaptation généralisée à l'ensemble de l'espace d'action.

Chez le sujet sain, l'étude de Fleury et al. (60), comparant le transfert de compensation après des mouvements de pointage et de lancer d'objet en direction d'une cible en portant des lunettes prismatiques, montre que le transfert était conditionné par la tâche réalisée lors de l'exposition aux prismes. Dans cette étude, 24 participants ont été inclus dans deux groupes. Un groupe réalisant des mouvements de pointage et un groupe réalisant des lancers de balle en direction de cibles pendant qu'ils étaient exposés aux prismes. Les sujets ont dans un premier temps été familiarisés aux deux tâches. Les performances ont été mesurées sur les deux tâches avant l'exposition (pré-test). Les sujets portaient ensuite les lunettes qui induisaient une déviation de 10° vers la droite pendant qu'ils réalisaient les tâches de pointage ou de lancer. Immédiatement après l'exposition, au retrait des prismes, le post-effet était mesuré avec la tâche pour laquelle ils étaient exposés (mesure classique de l'adaptation) et celle pour laquelle ils n'étaient pas exposés (mesure du transfert d'apprentissage). Les angles de déviations étaient mesurés entre le pointage (ou l'impact de la balle) et la position de la cible. Les résultats montrent que le groupe réalisant des mouvements de pointage pendant l'exposition présentait une déviation lors de la mesure du post-effet au lancer de balle. A l'inverse, aucun post-effet au pointage n'était retrouvé dans le groupe réalisant des lancers de balle pendant l'exposition.

Pour la seconde expérience, 6 joueurs de fléchettes professionnels étaient exposés de la même façon que dans le groupe « lancer de balle » de l'expérience précédente. Il leur était ensuite demandé de faire des mouvements de pointage à l'issue de l'exposition afin de mesurer le transfert. Dans cette situation, un post-effet était bien retrouvé.

Ainsi, était observé un transfert unidirectionnel du pointage vers le lancer. Aucun transfert ne se faisait du lancer vers le pointage. En revanche, les joueurs de fléchettes professionnels avaient une capacité de transfert remarquable vers le pointage, ce qui montre l'importance de l'expertise de la tâche réalisée pendant l'exposition sur le transfert vers une tâche pour laquelle le sujet n'a pas été exposé.

Expansion

Le post-effet lié à l'adaptation prismatique s'étend depuis un niveau sensori-moteur à des fonctions plus cognitives ou à des modalités sensorielles différentes (61–64) ; copie de dessin (7), représentation mentale (65) ou lecture (66) par exemple. De nombreux niveaux de symptomatologie de la négligence spatiale unilatérale sont affectés par l'adaptation prismatique, ce qui suggère que les effets de l'AP s'étendent aux systèmes moteurs, sensoriels et cognitifs non exposés (67). Fortis et al. (68) montrent même que l'AP permettrait une amélioration sur certaines activités de la vie quotidienne.

Une revue de la littérature sur l'expansion de l'adaptation prismatique à des fonctions cognitives chez les sujets sains durant les 15 dernières années a été publiée en 2015 (69). Elle montre un post-effet cognitif sur de nombreuses tâches, y compris sur celles qui ne sont pas de nature spatiale. Ces résultats suggèrent l'existence d'un lien solide entre le niveau de plasticité sensori-motrice et le niveau des fonctions cognitives.

Les prismes comme outil de rééducation

Protocole de rééducation par adaptation prismatique en condition réelle

Le premier protocole de rééducation de l'héminégligence par adaptation prismatique a été décrit par l'équipe de Rossetti en 1998 (7). Il consistait à exposer le sujet héminégligent à des prismes déviant le regard de 10° vers la droite et à lui demander de réaliser des pointages rapides (pour empêcher le rétrocontrôle visuel et proprioceptif) en direction d'une cible localisée à 10° vers la droite ou vers la gauche de façon aléatoire. Le sujet reposait son menton sur une plateforme rigide qui permettait de masquer sa main en début de mouvement (pour empêcher le rétrocontrôle visuel en temps réel).

Le protocole comprenait une phase de pré-tests, l'exposition aux prismes et une phase de post-tests.

- Pré-tests : le sujet assis confortablement devant une table, repose son menton sur un support dédié qui masque le début du mouvement. Les mesures de droit-devant (manuel et visuel) et du pointage sans rétroaction visuelle sont réalisées. Chez le sujet sain, les pointages réalisés à cette étape sont bien centrés au milieu alors que chez le patient héminégligent, il existe une déviation vers la droite.

- Exposition aux prismes : le sujet porte les lunettes prismatiques et doit réaliser les mouvements de pointage rapides en direction d'une cible localisée à droite ou à gauche. Lors des premiers pointages, le sujet fait des erreurs (effet direct), qu'il va progressivement corriger par un phénomène de compensation.

- Post-exposition : au retrait des lunettes, lorsque l'on demande au sujet de pointer en direction d'une cible, le mouvement est décalé dans la direction opposée à la déviation des prismes. Il s'agit de l'effet consécutif. Cet effet est mesuré par le pointage sans rétroaction visuelle (quantifie l'amplitude de l'adaptation totale), le droit devant manuel (mesure la composante proprioceptive de l'adaptation) et le droit devant visuel (mesure la composante visuelle de l'adaptation).

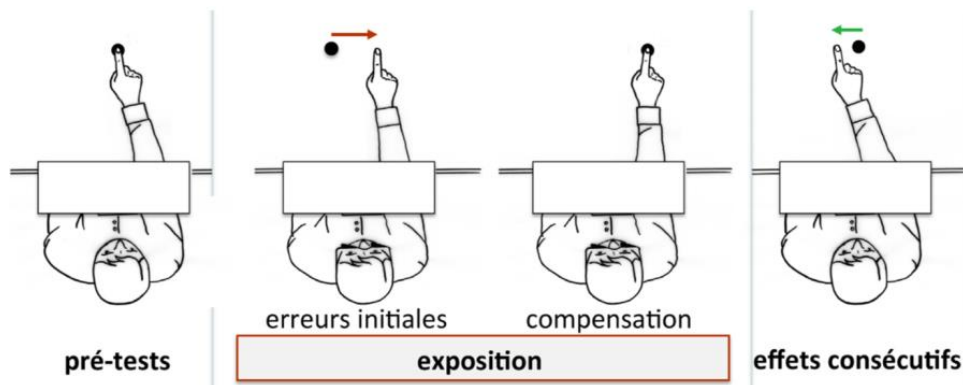


Figure 9 : pré-tests, exposition et effet consécutif (46).

De nombreuses études montrent que les patients hémiparétiques présentent une déviation pré-exposition importante du SSA vers la droite mais pas de déviation importante en VOL. Rossetti (7), montre par ailleurs que le post-effet est plus important chez les patients hémiparétiques en comparaison aux sujets sains.

Sarri et al. (47) réalisent une méta-analyse qui montre que le post-effet sur le SSA est le double de celui observé en VOL ($3,5^\circ$ vs $1,5^\circ$) chez les patients hémiparétiques. Cependant, le SSA et le VOL n'avaient pas été comparés chez les mêmes patients. Ils réalisent dans ce contexte une étude mesurant le SSA et le VOL chez 13 patients hémiparétiques et 13 sujets contrôle de même âge.

Ils montrent que le SSA est plus dévié vers la droite que le VOL en pré-exposition chez les patients (figure 10). Qu'en post-exposition, la déviation du SSA vers la gauche est beaucoup plus importante que celle du VOL ($7,8^\circ$ vs $3,9^\circ$) (figure 10). Que la déviation du VOL post-exposition chez les patients est proche de celle des sujets sains (figure 11). Et enfin, que l'amélioration sur les tests de barrage est importante quand le post-effet du SSA est important, alors qu'il n'y a pas de corrélation avec le VOL.

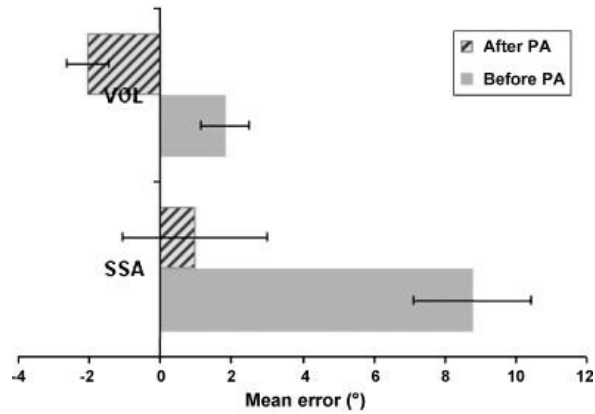


Figure 10 : déviations lors des pointages chez les 13 patients avant et après exposition aux prismes. En gris uni, la déviation observée avant l'exposition aux prismes. En rayé, les déviations observées après l'exposition aux prismes. Par convention, une déviation droite est positive et une déviation gauche est négative.

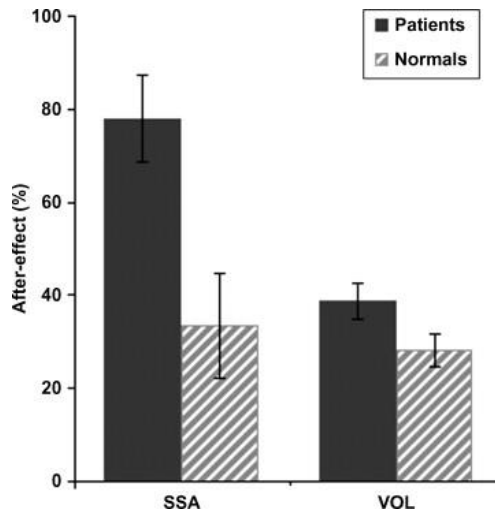


Figure 11 : mesure du post-effet chez les patients (en noir) et chez les sujets sains contrôles (en gris rayé) sur le VOL et le SSA.

Sarri et al. expliquent ces résultats par le fait que le SSA mesure le post-effet ainsi que l'effet des prismes sur le référentiel égocentrique, alors que le VOL mesure uniquement le post-effet. Ainsi, il pourrait être intéressant de sélectionner les patients qui dévient beaucoup le SSA car ils répondent mieux aux prismes.

Efficacité de la rééducation par adaptation prismatique

De nombreux protocoles de rééducation par adaptation prismatique dans la rééducation de la négligence spatiale unilatérale mettent en évidence une amélioration significative des patients au retrait des prismes : l'étude de Rossetti (7) suggérait l'efficacité des prismes chez le patient héminégligent jusqu'à deux heures après le retrait des lunettes. Frassinetti et al. (32) montrent que le post-effet peut persister pendant une période assez longue ; jusqu'à 5 semaines après une rééducation intensive (deux séances par jour pendant deux semaines).

L'importance de l'effet consécutif est fortement corrélée aux nombres de pointages réalisés lors de l'exposition prismatique (jusqu'à atteindre un plateau au bout de 25 à 50 essais) (43). Un nombre suffisant de pointage est donc nécessaire pour obtenir le meilleur effet consécutif possible. De plus, le degré de déviation prismatique joue un rôle important dans l'adaptation ; plus le degré est important, meilleure est l'adaptation (70).

L'effet consécutif est différent selon les patients pour une même exposition. Sarri et al. (47) montrent en effet que les patients présentant une lésion corticale dans le sillon intra-pariétal droit, du lobe pariétal inférieur ou du gyrus frontal moyen n'étaient pas améliorés après l'exposition aux prismes. Par ailleurs, dans cette étude, ils montrent que les patients présentant une déviation importante du SSA sont ceux qui améliorent davantage leurs performances au test des cloches.

La majorité des études réalisées sur l'efficacité de l'adaptation prismatique chez le patient héminégligent montre une efficacité sur les tests. L'efficacité sur les activités de la vie quotidienne reste cependant à démontrer. Rode et al. (46) montrent qu'une séance d'adaptation prismatique hebdomadaire pendant 4 semaines est insuffisante pour produire un effet fonctionnel à long terme (les patients ne présentaient pas d'amélioration de la MIF (mesure de l'indépendance fonctionnelle) au terme de 6 mois de suivi).

Une méta-analyse de 2021 (71) incluant huit essais contrôlés randomisés jusqu'au 30 décembre 2019, avec 244 patients victimes d'un AVC hémisphérique droit dont 130 dans le groupe expérimental (exposé aux lunettes prismatiques en plus du traitement conventionnel) et 144 dans le groupe contrôle (bénéficiant du traitement conventionnel seul ou associé au port de

lunettes placebo) montre que l'adaptation prismatique permet une amélioration notamment sur les tests comportementaux évaluant l'amélioration sur les activités de la vie quotidienne (BIT et ECB) et sur les tests de barrage mais uniquement de façon transitoire (moins d'un mois).

Une revue Cochrane de 2021 (72) montre cependant que parmi l'ensemble des méthodes de rééducation proposées (dont l'adaptation prismatique), aucune ne montre d'efficacité sur les activités de la vie quotidienne.

Protocole de rééducation par adaptation prismatique en condition virtuelle

L'adaptation prismatique en condition virtuelle présente de nombreux avantages par rapport à la méthode classique ; possibilité d'automatiser le processus d'évaluation et de rééducation, matériel disponible en centre de rééducation, coût moindre par rapport à la rééducation classique, modification du degré de déviation en fonction des patients. Ainsi, cette méthode permettrait d'adapter le protocole de rééducation à chaque patient.

Un logiciel de réalité virtuelle a été développé dans ce contexte en 2019 (Protopointage), permettant de mimer la thérapie dans un environnement virtuel. Une étude pilote, menée sur des sujets sains (10) montrait l'efficacité des prismes virtuels avec un effet consécutif statistiquement significatif (sur le SSA et le VOL).

L'effet de l'adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive n'a pour l'instant pas été évalué quantitativement. D'autre part, l'outil de mesure dans sa version virtuelle n'a pas été validé.

Le chapitre suivant sera ainsi consacré à l'étude que nous avons menée chez des sujets sains afin de valider l'outil de mesure et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive.

Chapitre III : Etude de validation de l'adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive chez les sujets sains

Matériel et méthode

Type d'étude

Nous avons mené deux études chez des sujets sains.

La première avait pour objectif de comparer l'exposition prismatique en réalité virtuelle immersive à l'exposition aux lunettes prismatiques. Il s'agit d'une étude prospective avec tirage au sort de l'ordre de l'exposition.

La seconde étude était une étude de validation de l'outil HTC vive pour la mesure de l'angle de déviation lors du SSAm par rapport à un système de capture du mouvement (MoCap ZEBRIS). Il s'agit d'une étude prospective, les mesures sont faites dans le même temps avec les deux outils.

Ainsi, deux grandes hypothèses ont été testées : (H1) l'adaptation prismatique en condition virtuelle est au moins aussi efficace que l'adaptation prismatique en condition réelle, et (H2) l'angle mesuré par le système HTC vive est le même que celui mesuré par le ZEBRIS.

Ces deux études ont été menées sur le même groupe de sujets sains, recrutés au CHU de Montpellier dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation du Pr I. Laffont, parmi les étudiants présents.

Matériel

Pour H1, afin de comparer l'efficacité des prismes réels et virtuels, nous avons utilisé le matériel suivant :

Prismes réels et support de tête



Figure 12 : lunettes prismatiques (optique Peter).



Figure 13 : support de tête.

Les lunettes prismatiques étaient responsables d'une déviation de 10 degrés vers la droite. Le support de tête permettait de masquer la course proximale du membre supérieur lors du pointage. Sur la planche horizontale étaient disposées 2 gommettes de couleur, l'une verte (à droite) l'autre rouge (à gauche). Ces gommettes étaient placées pour être à 10° du plan sagittal du sujet.

Prismes virtuels

Le matériel utilisé était un système de réalité virtuelle immersive (head-mounted display) de type HTC Vive (HTC Corp., Taoyuan, Taïwan). Le casque avait un champ de vision de 110 degrés avec une fréquence de rafraîchissement de 90 Hz. Il était couplé à un ordinateur dont la puissance permettait de supporter des jeux en réalité virtuelle. Un contrôleur et un traqueur étaient utilisés, respectivement pour le pointage, et pour le calibrage. Deux émetteurs-récepteurs infrarouges permettaient la capture de mouvement des différents dispositifs dans l'espace à l'échelle de la pièce.

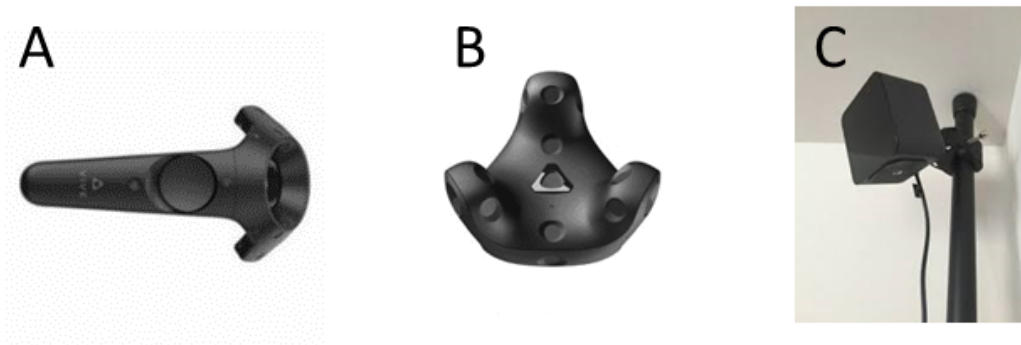


Figure 14 : matériel du système HTC-Vive.

Le contrôleur (figure 14A) était utilisé pour les tâches de pointage. Le traqueur (figure 14B) permettait de calibrer la hauteur et l'éloignement de la table virtuelle. Les stations de bases (figure 14C) émettaient des infrarouges. Deux bases étaient installées de part et d'autre de la table en hauteur et se faisaient face. Elles émettaient des infra-rouges qui étaient détectés au niveau des capteurs du casque et du contrôleur.

Le logiciel permettait de projeter un environnement virtuel où le sujet était placé face à une table avec en arrière-plan le thérapeute. Lors de la phase d'exposition aux prismes virtuels, l'ensemble de la scène était déviée de 10° vers la droite ; des cibles apparaissaient de façon aléatoire sur la table, à droite ou à gauche, à 10° de l'axe médian du sujet. Lors du pointage, la main virtuelle du sujet était masquée sur les 6 dixièmes du parcours et n'apparaissait que pour les quatre derniers $10^{\text{èmes}}$. Une consigne vocale pré-enregistrée indiquait au sujet la démarche à suivre.



Figure 15: casque de réalité virtuelle.

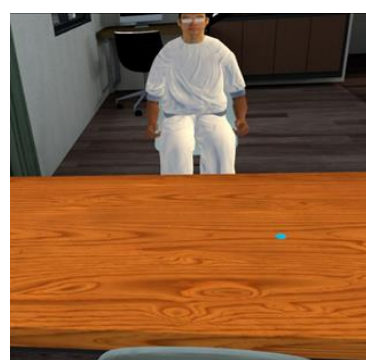


Figure 16 : scène visualisée dans le casque.

Sur la figure 16, le sujet visualise la scène avec une déviation de 10° vers la droite. Une cible est ici localisée à 10° de déviation vers la droite. Lorsque le sujet pointera au niveau de la cible, une nouvelle cible va apparaître à droite ou à gauche de façon aléatoire.

Mesure du droit devant

Pour la mesure du droit devant, nous avons utilisé le système de capture du mouvement Zebris. Il est composé d'une unité de mesure, de marqueurs et d'une base qui est branchée à un ordinateur. Pour le mesure du droit devant, le patient tenait dans la main droite le contrôleur. Deux marqueurs étaient positionnés sur le contrôleur de telle sorte que cela permettait de déterminer la position de la pointe du contrôleur.



Figure 17 : systèmes de capture du mouvement, ZEBRIS.

Sur la figure 17, en haut à gauche de la photo, en forme de T (measuring unit), le système qui détecte les ultrasons au niveau des bases vertes localisées sur les extrémités. En dessous, se trouvent les marqueurs (markers) qui émettent les ultrasons qui sont détectés par le système de mesure. Ces marqueurs sont branchés à l'unité (Basic unit) qui se trouve sur la droite de la photo qui est connectée à un ordinateur.

Pour H2, afin de comparer les différentes mesures, nous avons effectué les mesures en utilisant dans le même temps le système de capture du mouvement ZEBRIS ainsi que le système de réalité virtuelle HTC-vive. Avec ce dernier, la position de la pointe du contrôleur était déterminée à partir des données des 2 émetteurs-récepteurs à infrarouges.

Population

L'étude a été réalisée sur 17 sujets sains. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé. Leurs caractéristiques ont été inscrites sur une feuille de recueil d'informations (cf Annexe 2 et 3). Les tests ont eu lieu au mois de juin 2021 au CHU de Lapeyronie.

Les critères d'inclusion étaient:

- Plus de 18 ans
- Droitiers selon les critères d'Edinburg (cf annexe 1)
- Vision nette des cibles sans lunettes correctrices

Les critères d'exclusion étaient :

- Désorientation temporo-spatiale
- Antécédents neurologiques
- Troubles psychiatriques
- Troubles neuro-orthopédiques pouvant limiter la réalisation des épreuves

Procédure pour H1

Afin de vérifier l'hypothèse H1, les sujets ont effectué l'exposition prismatique en condition réelle et en condition virtuelle dans un ordre aléatoire. Entre ces 2 séances d'exposition prismatique, les sujets devaient réaliser une séance de recalibration et observer une période de 15 minutes de repos.

Installation

L'installation globale était la même que l'exposition ait lieu en condition réelle ou virtuelle. Le sujet était assis sur une chaise fixe et posait son menton sur le support dédié, en adaptant la hauteur de la chaise afin de masquer la course proximale de la main lors du pointage. L'axe sagittal du sujet était aligné avec l'axe médian du support (figure 18).



Figure 18 : dispositif où les sujets ont effectué les tâches de pointage.

Sur la photo, on peut voir le système MoCap ZEBRIS situé en hauteur, en forme de T. Les deux bases infra-rouges positionnées en hauteur de part et d'autre de la table ne sont pas visibles sur cette photo.

Procédure d'exposition aux prismes réels

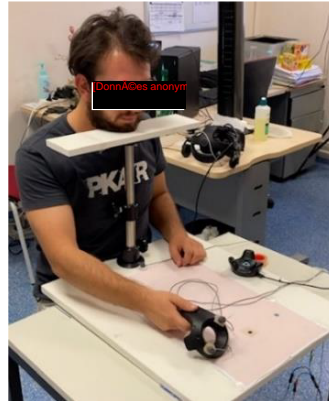


Figure 19: exposition aux prismes réels.

Le sujet posait son menton sur le support fixe. Il portait les lunettes prismatiques. Il tenait avec la main droite le contrôleur et réalisait 80 mouvements de pointages rapides en direction d'une cible localisée à 10° de déviation vers la droite ou vers la gauche, de façon aléatoire, sur consigne orale (un enregistrement vocal permettait de donner les mêmes consignes à l'ensemble des participants ; 40 pointages à droite et 40 pointages à gauche dans un ordre aléatoire). La durée d'exposition était d'environ 6 minutes (figure 19).

Procédure d'exposition aux prismes virtuels



Figure 20 : exposition prismatique en condition virtuelle.

Le sujet posait son menton sur le support fixe. Il portait le casque de réalité virtuelle déviant les images de 10 degrés vers la droite. Il tenait avec la main droite le contrôleur et réalisait 80 mouvements de pointages rapides en direction d'une cible localisée à 10° de déviation vers la droite ou vers la gauche, de façon aléatoire, sur consigne orale diffusée dans le casque. Lors des mouvements de pointage la course proximale du membre supérieur était masquée informatiquement et n'apparaissait pas dans le casque de réalité virtuelle. La durée d'exposition était d'environ 6 minutes (figure 20).

Procédure de recalibration

La procédure de recalibration était effectuée après la mesure de l'effet consécutif. Afin de faire disparaître l'effet consécutif lié à l'exposition aux prismes, une recalibration était effectuée. Le sujet devait alors réaliser 100 pointages en direction des cibles de droite ou de gauche de façon aléatoire sans prismes. La procédure de calibration était effectuée à l'issue de chaque exposition.

Critères de jugement pour H1

Le critère de jugement principal était le SSAm mesuré avec le Zebris. En effet, il s'agit du test pour lequel l'effet des prismes est le plus important et qui présente la plus grande corrélation avec l'amélioration des patients. Le critère de jugement secondaire était le VOL mesuré avec le Zebris.

Afin d'évaluer la déviation initiale ainsi que l'effet consécutif, les mesures ont été effectuées avant et juste après l'exposition aux prismes.

Le « Droit devant manuel », SSAm

L'installation était la même que pour l'exposition aux prismes. Le sujet plaçait la main droite contre le sternum. Il tenait le contrôleur dans la main droite. Avec les yeux fermés, il effectuait 10 mouvements de pointage en direction de son droit devant (figure 21). Entre chaque pointage il revenait à la position de départ (au niveau du sternum). La variable relevée était la différence angulaire entre l'axe médian et la position du contrôleur mesurée par le Zebris, dans le plan de la table, au moment où le contrôleur venait toucher la table. Par convention, une déviation droite est positive et une déviation gauche négative. En moyenne, la déviation initiale attendue était de 0° (pas de déviation) et la déviation finale attendue était de 4° (environ 40% de l'intensité de l'exposition prismatique).



Figure 21 : mesure du SSAm pré-exposition à gauche et du SSAm post-exposition à droite en condition réelle.

Pointage sans rétroaction visuelle en boucle ouverte, VOL

Le sujet plaçait la main droite contre le sternum. Il tenait le contrôleur dans sa main droite. Une cible était positionnée sur une ligne séparant le corps du sujet en deux moitiés. Le patient visualisait cette cible puis fermait les yeux et pointait en direction de cette cible avec le plus de précision possible. Le sujet effectuait 10 mouvements de pointage. Entre chaque pointage il revenait à la position de départ et rouvrait les yeux pour fixer à nouveau la cible. La variable relevée était la différence angulaire entre l'axe de la cible et l'axe de la position finale du contrôleur (en degrés), dans le plan de la table.

Méthode de mesure

Pendant chaque pointage (SSAm et VOL), le mouvement était enregistré à l'aide de l'outil de capture du mouvement à ultrasons CMS20s (Zebris Medical GmbH, Isny, Germany). Deux marqueurs du Zebris étaient placés sur le contrôleur et un marqueur était positionné sur la table au niveau du point d'origine, en position médiane.

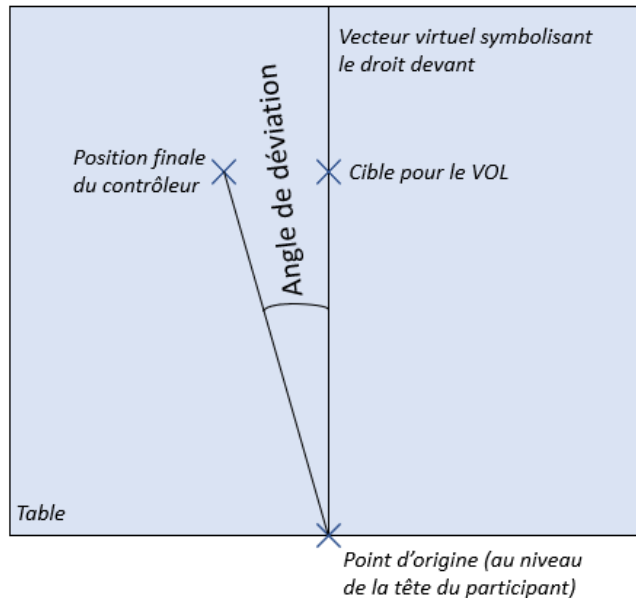


Figure 22 : méthode de calcul de l'angle de déviation.

Angle mesuré avec le Zebris : le Zebris enregistrerait les mouvements du contrôleur en 3D (X, Y et Z en fonction du temps) dans un fichier .txt. Le plan de la table a été récupéré dans un fichier Zebris de calibration. A partir du fichier Zebris de mouvement, la fin de chaque mouvement de pointage était définie comme le moment où la position du contrôleur était la plus proche d'un point virtuel situé au bout de la table, en face du sujet. L'angle de déviation a ensuite été calculé comme la différence angulaire entre l'axe du droit devant et la position finale de la main (figure 22). L'angle moyen de 10 pointages a été retenu pour les comparaisons.

Procédure et critère d'évaluation pour vérifier l'hypothèse H2

Afin de vérifier l'hypothèse H2, les angles de déviation durant les pointages en SSAm ont été enregistrés dans le même temps par le système de réalité virtuelle HTC vive et le système de MoCap Zebris lors de la deuxième exposition. Une comparaison des angles de déviation mesurés par ces deux systèmes a été effectuée.

SSAm en condition virtuelle avec le système HTC-vive

Le sujet plaçait la main droite contre le sternum. Il observait un écran noir dans le casque. Une consigne vocale préenregistrée indiquait au sujet la consigne de pointage. Il effectuait alors dix pointages à l'aide du contrôleur. Entre chaque pointage, le sujet repositionnait sa main en position initiale, au niveau du sternum.



Figure 23 : mesure du SSAm pré-exposition à gauche et post-exposition à droite en condition virtuelle.

Méthode de mesure

Pendant chaque pointage en SSAm, le mouvement était enregistré dans le même temps à l'aide du dispositif de réalité virtuelle, HTC vive et le Zebris. Deux marqueurs du Zebris étaient placés sur le contrôleur et un marqueur était positionné sur la table au niveau de la tête du participant, afin d'enregistrer l'endroit du pointage. Le plan virtuel de la table était calibré en fonction du plan réel de la table en amont du passage du participant. L'angle de déviation « gold standard » donné par le système de MoCap ZEBRIS était extrait des données de mouvement et a été comparé avec l'angle de déviation donné par le logiciel ProtoPointage (VIRTUALIS 2019) qui se servait des informations de mouvement données par le système de réalité virtuel HTC vive.

Angle mesuré avec le Zebris : il était mesuré de la même façon que pour l'hypothèse H1.

Angle mesuré avec le HTC vive : l'angle était calculé de la même façon qu'avec le Zebris et était donné directement dans un fichier .csv exporté par le logiciel. L'angle moyen de 10 pointages a été retenu pour les comparaisons.

Afin de comparer l'amplitude de la déviation post-exposition obtenue avec les prismes réels et les prismes virtuels ainsi que les mesures de l'HTC vive à celle du ZEBRIS, deux séries de tests ont été effectuées : La série A (contenant le bloc A1 et le bloc A2) et la série B (contenant le bloc B1 et le bloc B2). Les participants ont réalisé le bloc A (A1 + A2) ou B (B1+ B2).

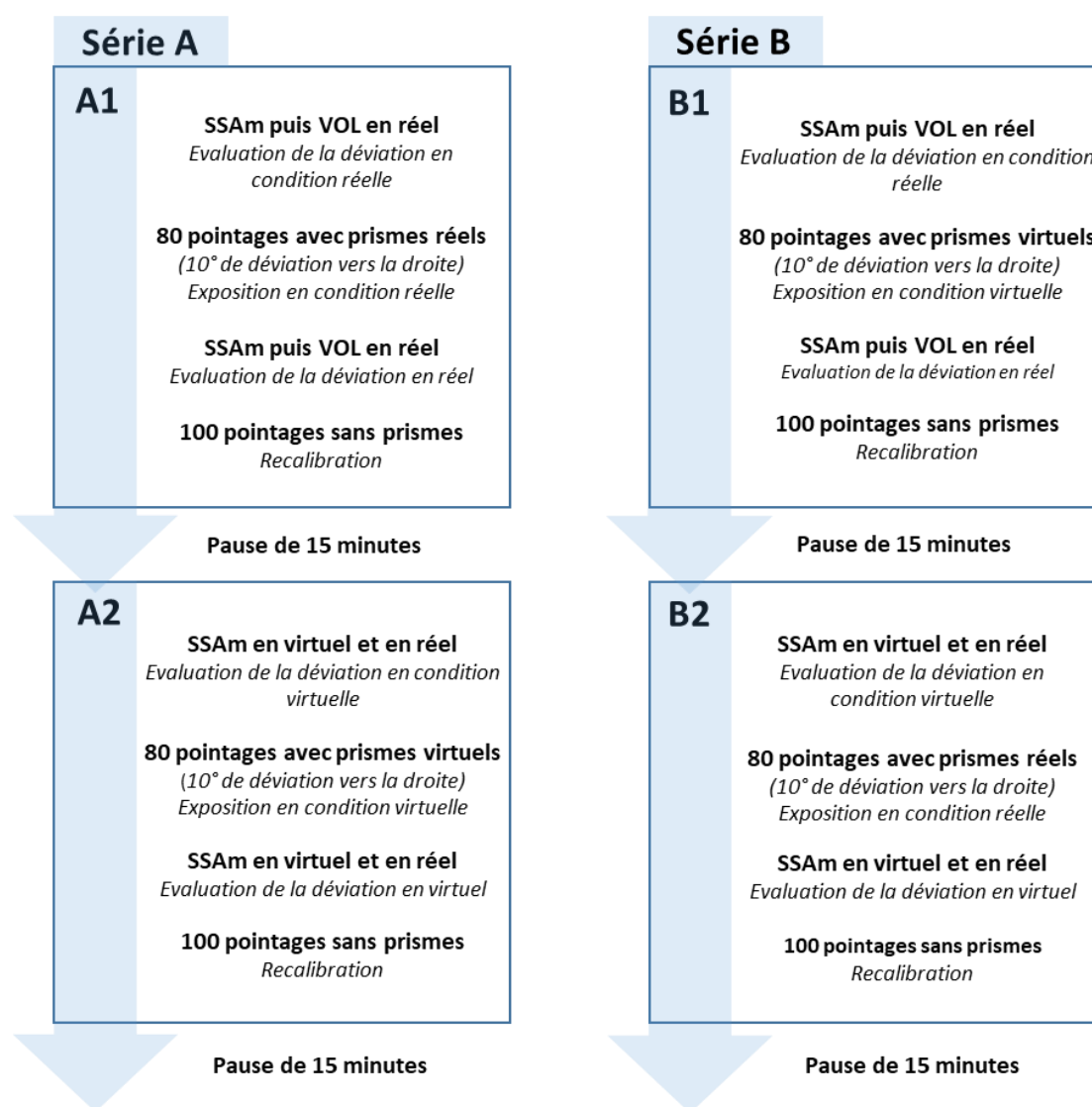


Figure 24: séries de tests effectuées dans notre protocole.

Analyse statistique

Du fait de l'absence d'études préliminaires, nous n'avons pas pu faire de calcul de nombre de sujets nécessaires. Nous avons inclus 17 sujets dans notre étude. Dans chaque série, le sujet était exposé aux prismes réels puis aux prismes virtuels ou inversement. Lorsque le SSAm était mesuré en condition virtuelle, il était également mesuré en condition réelle dans le même temps, ce qui permettait au sujet d'être son propre témoin.

Pour valider l'hypothèse H1, un test paramétrique d'équivalence des traitements a été réalisé. Les valeurs des SSAm et VOL post-exposition ont été comparées. Le seuil de confiance retenu était de 95%.

Afin de valider l'hypothèse H2, nous avons comparé les déviations d'angle données par le Zebris ainsi que celle données par le système HTC-vive. Nous avons utilisé un test paramétrique r^2 ainsi qu'un test ICC (intra-class correlation coefficient). Le seuil de confiance retenu était de 95%. Nous avons également utilisé un test de Bland et Altman.

Un script Scilab 6.1.0 a été mis au point afin de récupérer l'angle final de façon automatisée. Nous avons réalisé les graphiques et les statistiques depuis les angles obtenus à l'aide du logiciel R 3.6.1.

Résultats

H1 : La différence d'angle (la déviation due à l'exposition) est-elle au moins aussi grande avec l'exposition virtuelle qu'avec l'exposition réelle ?

SSAm post exposition aux prismes réels ou virtuels

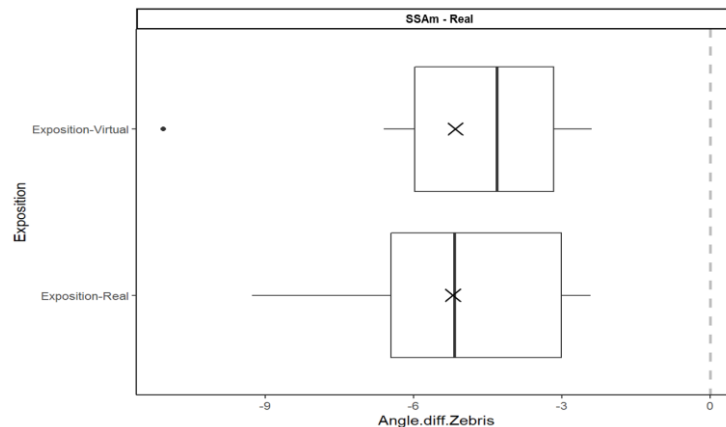


Figure 25 : comparaison des SSAm après exposition en condition réelle ou virtuelle. Les croix correspondent aux moyennes, les barres verticales aux médianes. Les boîtes s'étendent du 25^{ème} au 75^{ème} percentiles.

La déviation moyenne avec les prismes virtuels est de $-5,15^\circ$ avec un écart-type de $2,98^\circ$ et la déviation moyenne avec les prismes réels est de $-5,20^\circ$ avec un écart type de $2,67^\circ$, avec une p-value à $0,018 (<0.05)$.

VOL post-exposition aux prismes réels ou virtuels

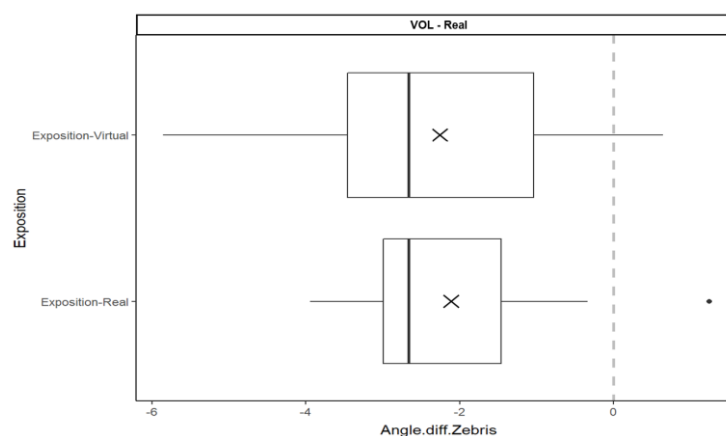


Figure 26 : comparaison des VOL après exposition en condition réelle ou virtuelle. Les croix correspondent aux moyennes, les barres verticales aux médianes. Les boîtes s'étendent du 25^{ème} au 75^{ème} percentiles.

La déviation moyenne avec les prismes virtuels est de $-2,25^\circ$ avec un écart-type de $1,67^\circ$. Elle est de $-2,11^\circ$ avec un écart-type de $1,55^\circ$ avec les prismes réels avec une p-value à $0,08 (>0.05)$.

H2: l'angle donné par le systèmes HTC vive est-il le même que celui donné par le ZEBRIS ?

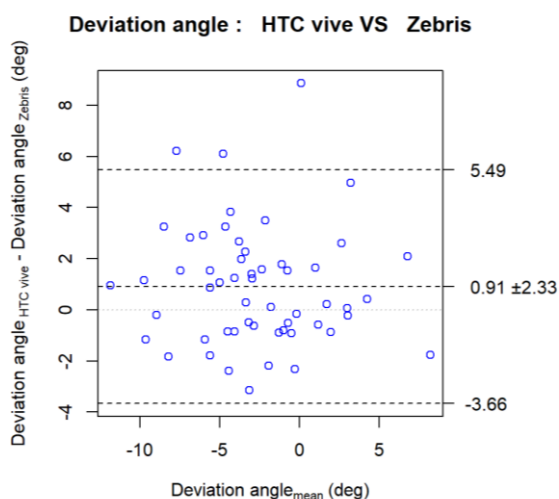


Figure 27 : graphique de Bland et Altman.

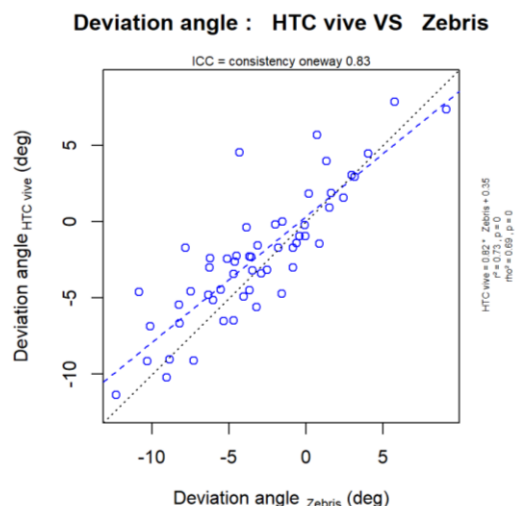


Figure 28 : graphique de corrélation.

Sur le graphique de Bland et Altman (figure 27) : en abscisse, la moyenne des déviations d'angle obtenue avec les deux techniques (angle HTC + angle Zebris)/2. En ordonnée, la différence de déviation d'angle entre l'HTC-Vive et le Zebris (angle HTC – angle Zebris).

La différence moyenne entre les deux outils est de 0,91. L'angle mesuré par le HTC est plus grand de 0,91° que celui mesuré par le Zebris. L'écart-type est de 2,33°.

Ainsi, pour 95% des participants, la différence entre la valeur donnée par le HTC et celle donnée par le Zebris est comprise entre -3,66° et 5,49°.

Pour ce qui est du calcul de corrélation, en abscisse, la déviation d'angle mesurée avec le Zebris et en ordonnée, la déviation d'angle mesurée avec l'HTC-Vive. Le r^2 calculé est de 0,73 avec un ICC (intra-class correlation coefficient) à 0,83. La corrélation est donc bonne. En effet, l'ICC est considéré comme bon pour une valeur comprise entre 0,75 et 0,9 (figure 28).

Discussion

Pour l'hypothèse H1

Notre étude montre que les prismes virtuels sont au moins aussi efficaces que les prismes réels lorsque le post-effet est évalué avec le SSAm. Cela ne se vérifie pas lorsque le post-effet est mesuré avec le VOL du fait sans doute d'une grande variabilité du post-effet lors de l'exposition aux prismes virtuels.

Validité interne

Les conditions de mesure du post-effet avec le droit devant sont capitales. Dans le protocole de mesure de l'effet consécutif décrit par Rossetti (7), les sujets étaient mis dans l'obscurité pour mesurer le post-effet. Il n'était pas précisé s'ils ouvraient transitoirement les yeux ou pas après l'exposition prismatique. Lors de nos pré-tests, nous avons demandé aux sujets de garder les yeux fermés à l'issue de l'exposition avant de réaliser les pointages de droit-devant. Or nous avons constaté lors de cette session que les sujets exposés aux prismes réels ne présentaient pas de déviation post-exposition alors qu'elle était franche en condition virtuelle chez ces mêmes sujets.

L'absence de post-effet mesuré avec les yeux fermés était probablement lié au fait que la recalibration perceptivo-motrice ne puisse pas se faire (40). En effet, lorsque les yeux restent fermés, le sujet se basera uniquement sur sa proprioception pour pointer droit devant. En ouvrant les yeux, se crée un conflit entre vision et proprioception, qui permet d'observer un décalage au pointage.

Ainsi, lors de notre étude, nous avons demandé aux sujets d'ouvrir les yeux après l'exposition pendant quelques secondes et de les refermer avant de réaliser les mouvements de pointage en SSAm ou VOL. Dans cette situation, nous retrouvons une déviation de 4 à 5 degrés en condition réelle et virtuelle.

Lors des pré-tests, nous avons constaté que la bonne installation des patients était primordiale. En effet, ils devaient être bien positionnés au milieu du support de tête afin d'éviter toute déviation initiale non liée à une déviation du droit devant.

Validité externe

Dans la littérature, il n'existe, qu'une seule étude comparant l'efficacité des lunettes prismatiques aux prismes virtuels chez les sujets sains (70). Cependant, le « droit-devant manuel », qui correspond pourtant au test pour lequel l'effet des prismes est le plus important et qui présente la plus grande corrélation avec l'amélioration des patients (47) n'a pas été évalué. D'autre part, l'intensité de la déviation virtuelle était plus importante que la déviation réelle. Or l'ampleur de l'effet consécutif est fortement corrélée au degrés d'adaptation prismatique (43).

Perspectives

Le système de rééducation en réalité virtuelle immersive présente de nombreux avantages par rapport au protocole classiquement décrit ;

- Le masquage de la course proximale du membre supérieur qui joue un rôle essentiel dans la recalibration perceptivo-motrice peut se faire facilement avec un réglage informatique, à l'inverse de la méthode classique qui utilise un support pour poser le menton.
- Pas de nécessité de supervision humaine pendant toute la phase d'exposition prismatique ; les consignes vocales sont pré-enregistrées dans le casque et l'apparition des cibles se fait de manière automatique.
- Possibilité de proposer un programme de rééducation personnalisé en adaptant le degré de déviation prismatique.

Une étude sur des sujets sains sera à faire pour compléter notre étude, avec notamment la mesure de l'effet consécutif et de la rétention ; en effet, l'étude de Rossetti (7) met en évidence un effet consécutif pouvant être prolongé jusqu'à deux heures après l'exposition. Dans cette étude, les participants pourraient être exposés aux prismes un jour puis au casque de réalité virtuelle (ou inversement) lors d'une autre session au minimum trois jours plus tard afin d'être leurs propres témoins. Les mesures du post-effets seraient à faire en droit devant manuel et en VOL.

Des études sur des patients héminégligents seront à faire dans le futur afin d'évaluer l'efficacité des prismes virtuels sur la mesure du droit devant manuel ; les patients pourraient être exposés à la même déviation prismatique ou à des déviations différentes afin d'évaluer le degré de déviation optimal dans la rééducation.

Une étude sur l'amélioration de la qualité de vie serait également à faire si les prismes virtuels sont efficaces sur les tests. En effet, la revue Cochrane de 2021 (72), dont l'objectif était de déterminer les effets des méthodes de rééducation chez les patients héminégligents dont l'AP montre que l'efficacité des méthodes étudiés sur l'amélioration des activités de la vie quotidienne n'est pas démontrée.

Pour l'hypothèse H2

L'angle de mesure donné par le système HTC-vive est proche de celui mesuré avec le ZEBRIS, avec une bonne corrélation, ce qui permet de valider l'hypothèse H2.

Validité interne

Lors de nos pré-tests, nous voulions initialement comparer le système HTC-vive au système VICON afin de valider les qualités métrologiques du système de réalité virtuelle. Les deux systèmes fonctionnant avec des infra-rouges, il y avait trop d'interférences et le système HTC-vive ne fonctionnait plus. C'est alors que nous nous sommes orientés vers le ZEBRIS qui fonctionne avec des ultrasons.

Afin de comparer les mesures du ZEBRIS à celle de l'HTC-vive, il était nécessaire de faire correspondre le plan de la table réelle au plan de la table virtuelle. Pour cela, nous avons calibré le plan de la table avec les deux systèmes.

Lors de nos pré-tests, nous avons remarqué que le traqueur permettait de calibrer la hauteur et l'éloignement de la table virtuelle ainsi que la position des cibles et du droit devant. Pour que le droit devant soit bien localisé au milieu, il fallait positionner le traqueur au moment de la calibration au niveau de la table, sous la position de la tête, au centre.

De plus, la déviation mesurée était la déviation entre l'axe du contrôleur lorsqu'il touchait le plan de la table et l'axe du casque de réalité virtuelle.

Or, nous avons remarqué lors des pré-tests, en faisant des épreuves de droit devant manuel, en orientant le contrôleur bien au milieu du plan de la table que la déviation était de 10° de base. Lorsque nous avons dévié l'axe du casque d'environ 10°, nous trouvions alors, lors des pointages en droit devant un angle de 0°. Nous avons donc conclu que le casque que nous avions à notre disposition présentait une déviation de base de 10°.

Nous avons alors effectué d'autres pré-tests avec un autre casque de réalité virtuelle, avec lequel, nous étions bien à 0° de déviation lors des pointages en droit devant avec l'axe du casque bien droit.

Pour faire la calibration avec le Zebris, nous avons disposé les trois capteurs sur des points définis au niveau de la table dont deux points sur le plan du droit devant et le troisième latéralement afin de former un triangle.

Une fois la calibration réalisée, le plan de la table ne devait pas bouger. En effet les mesures réalisées étaient faites en fonction de la calibration. Nous avons délimité l'ensemble des pourtours de la table afin de bien vérifier qu'elle n'ait pas bougé lors des mesures. Afin de limiter au maximum le risque d'erreurs, nous avons refait une calibration toutes les deux sessions.

Validité externe

Aucune étude n'a à notre connaissance comparé les outils de mesures en réalité virtuelle aux outils de mesures classiques. Notre étude est encourageante quant-aux qualités métrologiques du système de réalité virtuelle. D'autres études seraient à faire afin de conforter notre hypothèse.

Perspective

La procédure de mesure du post effet est beaucoup plus simple en condition virtuelle. Cela permettrait d'y avoir recours au quotidien lors de la prise en charge rééducative des patients. Un suivi du SSA serait ainsi facilement réalisable.

CONCLUSION

La prévalence de la NSU est importante après un AVC. Celle-ci aggrave le pronostic fonctionnel des patients et a un impact important sur les activités de la vie quotidienne ce qui en fait un enjeu majeur en rééducation.

Le polymorphisme clinique de ce syndrome et les diverses origines physiopathologiques évoquées complexifient sa prise en charge rééducative.

Le protocole de rééducation par adaptation prismatique classiquement décrit est peu utilisé en pratique quotidienne du fait de sa complexité. Notre étude sur l'utilisation des prismes en réalité virtuelle est encourageante quant à l'efficacité de ces prismes et aux qualités métrologiques de ce système.

BIBLIOGRAPHIE

1. Halligan PW, Marshall JC, Wade DT. Visuospatial neglect: underlying factors and test sensitivity. *Lancet Lond Engl.* 14 oct 1989;2(8668):908-11.
2. Heilman KM, Valenstein E. Mechanisms underlying hemispatial neglect. *Ann Neurol.* févr 1979;5(2):166-70.
3. Bowen A, McKenna K, Tallis RC. Reasons for variability in the reported rate of occurrence of unilateral spatial neglect after stroke. *Stroke.* juin 1999;30(6):1196-202.
4. Katz N, Hartman-Maeir A, Ring H, Soroker N. Functional disability and rehabilitation outcome in right hemisphere damaged patients with and without unilateral spatial neglect. *Arch Phys Med Rehabil.* avr 1999;80(4):379-84.
5. Sarwar A, Emmady PD. Spatial Neglect. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021 [cité 21 juill 2021]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562184/>
6. Baumeler D, Born S, Burra N, Ptak R. When Left Is One and Right Is Double: An Experimental Investigation of Visual Alliesthesia after Right Parietal Damage. *Vision.* 1 mars 2020;4(1):16.
7. Rossetti Y, Rode G, Pisella L, Farné A, Li L, Boisson D, et al. Prism adaptation to a rightward optical deviation rehabilitates left hemispatial neglect. *Nature.* 10 sept 1998;395(6698):166-9.
8. Honoré J, Saj A, Bernati T, Rousseaux M. The pusher syndrome reverses the orienting bias caused by spatial neglect. *Neuropsychologia.* févr 2009;47(3):634-8.
9. Hedna VS, Bodhit AN, Ansari S, Falchook AD, Stead L, Heilman KM, et al. Hemispheric differences in ischemic stroke: is left-hemisphere stroke more common? *J Clin Neurol Seoul Korea.* avr 2013;9(2):97-102.
10. Fazilleau S, Froger J, Université de Montpellier Faculté de médecine. Développement d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive. Montpellier: Université de Montpellier diffusion/distribution; 2019. 132 p.
11. Beis J-M, Keller C, Morin N, Bartolomeo P, Bernati T, Chokron S, et al. Right spatial neglect after left hemisphere stroke: qualitative and quantitative study. *Neurology.* 9 nov 2004;63(9):1600-5.
12. Rousseaux M, Allart E, Bernati T, Saj A. Anatomical and psychometric relationships of behavioral neglect in daily living. *Neuropsychologia.* 1 avr 2015;70:64-70.
13. Heilman KM, Van Den Abell T. Right hemisphere dominance for attention: the mechanism underlying hemispheric asymmetries of inattention (neglect). *Neurology.* mars 1980;30(3):327-30.
14. Posner MI, Cohen Y, Rafal RD. Neural systems control of spatial orienting. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 25 juin 1982;298(1089):187-98.

15. SCDMED_T_2002_RAGOT_SYLVIE.pdf [Internet]. [cité 22 juill 2021]. Disponible sur: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCDMED_T_2002_RAGOT_SYLVIE.pdf
16. Kinsbourne M. Mechanisms of Unilateral Neglect. In: Jeannerod M, éditeur. *Advances in Psychology* [Internet]. North-Holland; 1987 [cité 22 juill 2021]. p. 69-86. (Neurophysiological and Neuropsychological Aspects of Spatial Neglect; vol. 45). Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508617094>
17. Mesulam MM. A cortical network for directed attention and unilateral neglect. *Ann Neurol*. oct 1981;10(4):309-25.
18. Bisiach E, Luzzatti C. Unilateral neglect of representational space. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav*. mars 1978;14(1):129-33.
19. Jeannerod M, Biguer B. [Egocentric reference and represented space]. *Rev Neurol (Paris)*. 1989;145(8-9):635-9.
20. Richard C, Rousseaux M, Saj A, Honoré J. Straight ahead in spatial neglect: evidence that space is shifted, not rotated. *Neurology*. 14 déc 2004;63(11):2136-8.
21. Caplan B. Assessment of unilateral neglect: a new reading test. *J Clin Exp Neuropsychol*. août 1987;9(4):359-64.
22. Albert ML. A simple test of visual neglect. *Neurology*. juin 1973;23(6):658-64.
23. Gauthier L. The Bells Test: A Quantitative and Qualitative Test For Visual Neglect. :6.
24. Test d'Albert – Strokengine [Internet]. [cité 2 août 2021]. Disponible sur: <https://strokengine.ca/fr/assessments/test-dalbert/>
25. Test des cloches – Strokengine [Internet]. [cité 2 août 2021]. Disponible sur: <https://strokengine.ca/fr/assessments/test-des-cloches/>
26. Schenkenberg T, Bradford DC, Ajax ET. Line bisection and unilateral visual neglect in patients with neurologic impairment. *Neurology*. mai 1980;30(5):509-17.
27. Halligan PW, Cockburn J, Wilson BA. The behavioural assessment of visual neglect. *Neuropsychol Rehabil*. 1 janv 1991;1(1):5-32.
28. Azouvi P, Samuel C, Louis-Dreyfus A, Bernati T, Bartolomeo P, Beis J-M, et al. Sensitivity of clinical and behavioural tests of spatial neglect after right hemisphere stroke. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1 août 2002;73(2):160-6.
29. Weinberg J, Diller L, Gordon WA, Gerstman LJ, Lieberman A, Lakin P, et al. Visual scanning training effect on reading-related tasks in acquired right brain damage. *Arch Phys Med Rehabil*. 1 nov 1977;58(11):479-86.
30. Jacquin-Courtois S, Rode G, Luauté J, Pisella L, Farne A, O'Shea J, et al. Syndrome de négligence spatiale unilatérale : d'un polymorphisme clinique vers un polymorphisme thérapeutique. *Rev Neuropsychol*. 2009;Volume 1(4):332-6.
31. Tsang MHM, Sze KH, Fong KNK. Occupational therapy treatment with right half-field eye-patching for patients with subacute stroke and unilateral neglect: A randomised controlled trial. *Disabil Rehabil*. 1 janv 2009;31(8):630-7.
32. Frassinetti F, Angeli V, Meneghello F, Avanzi S, Làdavas E. Long-lasting amelioration of visuospatial neglect by prism adaptation. *Brain*. 1 mars 2002;125(3):608-23.

33. Wiart L, Côme ABS, Debelleix X, Petit H, Joseph PA, Mazaux JM, et al. Unilateral neglect syndrome rehabilitation by trunk rotation and scanning training. *Arch Phys Med Rehabil.* 1 avr 1997;78(4):424-9.
34. Neck muscle vibration induces lasting recovery in spatial neglect | *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* [Internet]. [cité 22 juill 2021]. Disponible sur: <https://jnnp.bmj.com/content/73/4/412.short>
35. Malhotra PA, Parton AD, Greenwood R, Husain M. Noradrenergic modulation of space exploration in visual neglect. *Ann Neurol.* 2006;59(1):186-90.
36. Gorgoraptis N, Mah Y-H, Machner B, Singh-Curry V, Malhotra P, Hadji-Michael M, et al. The effects of the dopamine agonist rotigotine on hemispatial neglect following stroke. *Brain J Neurol.* août 2012;135(Pt 8):2478-91.
37. Nyffeler T, Cazzoli D, Hess CW, Müri RM. One session of repeated parietal theta burst stimulation trains induces long-lasting improvement of visual neglect. *Stroke.* août 2009;40(8):2791-6.
38. Sparing R, Thimm M, Hesse MD, Küst J, Karbe H, Fink GR. Bidirectional alterations of interhemispheric parietal balance by non-invasive cortical stimulation. *Brain J Neurol.* nov 2009;132(Pt 11):3011-20.
39. Yang NYH, Zhou D, Chung RCK, Li CWP, Fong KNK. Rehabilitation Interventions for Unilateral Neglect after Stroke: A Systematic Review from 1997 through 2012. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 2013 [cité 22 juill 2021];0. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2013.00187/full>
40. Adaptive spatial alignment and strategic perceptual-motor control. - *PsycNET* [Internet]. [cité 23 juill 2021]. Disponible sur: <https://content.apa.org/record/1996-03036-009>
41. Rossetti Y, Koga K, Mano T. Prismatic displacement of vision induces transient changes in the timing of eye-hand coordination. *Percept Psychophys.* sept 1993;54(3):355-64.
42. Bingham G, Romack JL. The rate of adaptation to displacement prisms remains constant despite acquisition of rapid calibration. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 1999;25(5):1331-46.
43. Fernández-Ruiz J, Díaz R. Prism adaptation and aftereffect: specifying the properties of a procedural memory system. *Learn Mem Cold Spring Harb N.* févr 1999;6(1):47-53.
44. Redding GM, Rossetti Y, Wallace B. Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neurosci Biobehav Rev.* mai 2005;29(3):431-44.
45. Jakobson LS, Goodale MA. Trajectories of reaches to prismatically-displaced targets: evidence for « automatic » visuomotor recalibration. *Exp Brain Res.* 1989;78(3):575-87.
46. Rode G, Lacour S, Jacquin-Courtois S, Pisella L, Michel C, Revol P, et al. Long-term sensorimotor and therapeutical effects of a mild regime of prism adaptation in spatial neglect. A double-blind RCT essay. *Ann Phys Rehabil Med.* avr 2015;58(2):40-53.
47. Sarri M, Greenwood R, Kalra L, Papps B, Husain M, Driver J. Prism adaptation aftereffects in stroke patients with spatial neglect: pathological effects on subjective straight ahead but not visual open-loop pointing. *Neuropsychologia.* 7 mars 2008;46(4):1069-80.

48. Rode G, Lacour S, Jacquin-Courtois S, Pisella L, Michel C, Revol P, et al. Effets sensori-moteurs et fonctionnels à long terme d'un traitement hebdomadaire par adaptation prismatique dans la négligence : un essai randomisé et contrôlé en double insu. *Ann Phys Rehabil Med.* 1 avr 2015;58(2):e1-15.
49. Redding GM, Wallace B. Components of prism adaptation in terminal and concurrent exposure: organization of the eye-hand coordination loop. *Percept Psychophys.* juill 1988;44(1):59-68.
50. Redding GM, Wallace B. Effects of Pointing Rate and Availability of Visual Feedback on Visual and Proprioceptive Components of Prism Adaptation. *J Mot Behav.* sept 1992;24(3):226-37.
51. Redding GM, Wallace B. Calibration and alignment are separable: evidence from prism adaptation. *J Mot Behav.* déc 2001;33(4):401-12.
52. Proteau L. Chapter 4 On The Specificity of Learning and the Role of Visual Information for Movement Control. In: Proteau L, Elliott D, éditeurs. *Advances in Psychology [Internet].* North-Holland; 1992 [cité 23 juill 2021]. p. 67-103. (Vision and Motor Control; vol. 85). Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508620117>
53. Redding GM, Wallace B. Adaptive coordination and alignment of eye and hand. *J Mot Behav.* juin 1993;25(2):75-88.
54. Field DP, Shipley TF, Cunningham DW. Prism adaptation to dynamic events. *Percept Psychophys.* janv 1999;61(1):161-76.
55. Prablanc C, Panico F, Fleury L, Pisella L, Nijboer T, Kitazawa S, et al. Adapting terminology: clarifying prism adaptation vocabulary, concepts, and methods. *Neurosci Res.* avr 2020;153:8-21.
56. Bedford FL. Perceptual and cognitive spatial learning. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* juin 1993;19(3):517-30.
57. Alexander MS, Flodin BWG, Marigold DS. Prism adaptation and generalization during visually guided locomotor tasks. *J Neurophysiol.* août 2011;106(2):860-71.
58. Cohen MM. Continuous versus terminal visual feedback in prism aftereffects. *Percept Mot Skills.* juin 1967;24(3):1295-302.
59. Wallace B, Fisher LE. Proprioception and the production of adaptation and intermanual transfer to prismatic displacement. *Percept Psychophys.* 1979;26(2):113-7.
60. Fleury L, Pastor D, Revol P, Delporte L, Rossetti Y. Inter-task transfer of prism adaptation depends on exposed task mastery. *Sci Rep.* 30 mars 2020;10:5687.
61. Rode G, Pisella L, Rossetti Y, Farnè A, Boisson D. Bottom-up transfer of sensory-motor plasticity to recovery of spatial cognition: visuomotor adaptation and spatial neglect. *Prog Brain Res.* 2003;142:273-87.
62. Luauté J, Michel C, Rode G, Pisella L, Jacquin-Courtois S, Costes N, et al. Functional anatomy of the therapeutic effects of prism adaptation on left neglect. *Neurology.* 27 juin 2006;66(12):1859-67.
63. Pisella L, Rode G, Farnè A, Tilikete C, Rossetti Y. Prism adaptation in the rehabilitation of patients with visuo-spatial cognitive disorders. *Curr Opin Neurol.* déc 2006;19(6):534-42.

64. Tilikete C, Rode G, Rossetti Y, Pichon J, Li L, Boisson D. Prism adaptation to rightward optical deviation improves postural imbalance in left-hemiparetic patients. *Curr Biol CB*. 3 avr 2001;11(7):524-8.
65. Rode G, Rossetti Y, Boisson D. Prism adaptation improves representational neglect. *Neuropsychologia*. 2001;39(11):1250-4.
66. Rode G, Klos T, Courtois-Jacquin S, Rossetti Y, Pisella L. Neglect and prism adaptation: a new therapeutic tool for spatial cognition disorders. *Restor Neurol Neurosci*. 2006;24(4-6):347-56.
67. Jacquin-Courtois S, O'Shea J, Luauté J, Pisella L, Revol P, Mizuno K, et al. Rehabilitation of spatial neglect by prism adaptation: a peculiar expansion of sensorimotor after-effects to spatial cognition. *Neurosci Biobehav Rev*. mai 2013;37(4):594-609.
68. Fortis P, Maravita A, Gallucci M, Ronchi R, Grassi E, Senna I, et al. Rehabilitating patients with left spatial neglect by prism exposure during a visuomotor activity. *Neuropsychology*. nov 2010;24(6):681-97.
69. Michel C. Beyond the Sensorimotor Plasticity: Cognitive Expansion of Prism Adaptation in Healthy Individuals. *Front Psychol*. 2015;6:1979.
70. Ramos AA, Hørning EC, Wilms IL. Simulated prism exposure in immersed virtual reality produces larger prismatic after-effects than standard prism exposure in healthy subjects. *PLOS ONE*. 24 mai 2019;14(5):e0217074.
71. Li J, Li L, Yang Y, Chen S. Effects of Prism Adaptation for Unilateral Spatial Neglect After Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Am J Phys Med Rehabil*. 1 juin 2021;100(6):584-91.
72. Longley V, Hazelton C, Heal C, Pollock A, Woodward-Nutt K, Mitchell C, et al. Non-pharmacological interventions for spatial neglect or inattention following stroke and other non-progressive brain injury. *Cochrane Database Syst Rev* [Internet]. 2021 [cité 2 août 2021];(7). Disponible sur: <https://www-cochranelibrary-com.ezpum.biu-montpellier.fr/cdsr/doi/10.1002/14651858.CD003586.pub4/full?highlightAbstract=rehabilitation%7Cspatial%7Cneglect>

ANNEXES

ANNEXE 1

Edinburgh Handedness Inventory		
Surname _____ Given Name _____		
Date of Birth _____ Sex _____		
<p>Please indicate your preferences in the use of hands in the following activities by <i>putting + in the appropriate column</i>. Where the preference is so strong that you would never try to use the other hand unless absolutely forced to, <i>put ++</i>. In any case you are really indifferent put + in both columns.</p> <p>Some of the activities require both hands. In these cases the part of the task, or object, for which hand preference is wanted is indicated in brackets.</p> <p>Please try to answer all the questions, and only leave a blank if you have no experience at all of the object or task.</p>		
	Left	Right
1. Writing		
2. Drawing		
3. Throwing		
4. Scissors		
5. Toothbrush		
6. Knife (without fork)		
7. Spoon		
8. Broom (upper hand)		
9. Striking Match (match)		
10. Opening box (lid)		
i. Which foot do you prefer to kick with?		
ii. Which eye do you use when using only one?		
L.Q.	Leave the spaces blank	DECLÉ

ANNEXE 2

Cahier d'observation chez les sujets sains série A

Date de passation :

Nom : Prénom : Date de naissance : Age :

Latéralité (Selon l'Edinburgh Handedness Inventory) :

Vision nette des cibles : oui / non

Désorientation temporo-spatiale : oui / non

Présence d'antécédents neurologiques : oui/non

Troubles psychiatriques : oui / non

Déficit neuro-orthopédique : oui/ non

Test pré-exposition en condition réelle:

- Mesure du SSA-m
- Mesure du VOL

Exposition prismatique en condition réelle :

- Port de lunettes prismatiques
- 80 pointages avec contrôleur en direction d'une cible localisée à 10° de déviation vers la droite ou vers la gauche, de façon aléatoire.

Test post-exposition en condition réelle :

- Mesure du SSA-m
- Mesure du VOL

Recalibrage :

- 100 pointages en mode aléatoire à 0° de déviation.
- Puis 15 minutes de repos.

Test pré-exposition en condition virtuelle et réelle:

- Mesure du SSA-mV et du SSA-m

Exposition prismatique en condition virtuelle :

- Port du casque de type HTC Vive
- 80 pointages avec le contrôleur en direction d'une cible localisée 10° à droite ou à gauche, de façon aléatoire.

Test post exposition en condition virtuelle et réelle:

- Mesure du SSA-mV et du SSA-m

Recalibrage :

- 100 pointages en mode aléatoire à 0 degrés de déviation.
- Puis 15 minutes de repos.

ANNEXE 3

Cahier d'observation chez les sujets sains série B

Date de passation :

Nom :

Prénom :

Date de naissance :

Age :

Latéralité (Selon l'Edinburgh Handedness Inventory) :

Vision nette des cibles : oui / non

Désorientation temporo-spatiale : oui / non

Présence d'antécédents neurologiques : oui/non

Troubles psychiatriques : oui / non

Déficit neuro-orthopédique : oui/ non

Test pré-exposition en condition réelle:

- Mesure du SSA-m

- Mesure du VOL

Exposition prismatique en condition virtuelle :

- Port du casque de type HTC Vive

- 80 pointages avec le contrôleur en direction d'une cible localisée 10° à droite ou à gauche, de façon aléatoire.

Test post-exposition en condition réelle :

- Mesure du SSA-m

- Mesure du VOL

Recalibrage :

- 100 pointages en mode aléatoire à 0° de déviation.

- Puis 15 minutes de repos.

Test pré-exposition en condition virtuelle et réelle:

- Mesure du SSA-mV et du SSA-m

Exposition prismatique en condition réelle :

- Port de lunettes prismatiques

- 80 pointages avec le contrôleur en direction d'une cible localisée à 10° de déviation vers la droite ou vers la gauche, de façon aléatoire.

Test post exposition en condition virtuelle et réelle:

- Mesure du SSA-mV et du SSA-m

Recalibrage :

- 100 pointages en mode aléatoire à 0 degrés de déviation.

- Puis 15 minutes de repos.

SERMENT

- *En présence des Maîtres de cette école, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure, au nom de l'Être suprême, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine.*
- *Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.*
- *Admis (e) dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.*
- *Respectueux (se) et reconnaissant (e) envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.*
- *Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert (e) d'opprobre et méprisé (e) de mes confrères si j'y manque.*

RESUME

La négligence spatiale unilatérale est un trouble du comportement sensori-moteur fréquent après un accident vasculaire cérébral (AVC). Elle est caractérisée par des difficultés à signaler, répondre ou à orienter son attention vers des stimuli présents du côté opposé à la lésion cérébrale. Ce syndrome a un impact important sur les activités de la vie quotidienne et il constitue un facteur de mauvais pronostic de récupération après un AVC. L'enjeu en rééducation est donc majeur.

Parmi les protocoles de rééducation proposés, l'adaptation prismatique semble être une des méthodes les plus prometteuses. Cependant, cette technique nécessite un matériel spécifique et un protocole d'exposition contraignant limitant son recours en centre de rééducation. Après exposition aux prismes l'effet est mesuré par des tâches de pointages qui là encore nécessitent un matériel qui n'est que rarement disponible dans les centres de rééducation. La rééducation et l'évaluation en réalité virtuelle immersive pourrait permettre de s'affranchir de ces obstacles.

Un logiciel de quantification et de rééducation de l'héminégligence en réalité virtuelle immersive a été développé en 2019. Le but principal de notre étude est donc de comparer les effets des prismes réels et des prismes virtuels chez des sujets sains en utilisant comme outils de mesure les outils classiques. Le second objectif est de valider les outils numériques comme outil de mesure de l'effet des prismes, en les comparant à leur équivalent en réel (gold standard).

Nous avons mené une étude sur 17 sujets sains comparant les effets des prismes virtuels et des prismes réels sur la tâche de « droit devant manuel » (SSAM-m). D'autre part, nous avons comparé les outils de mesure en condition réelle et virtuelle. Les résultats ne montrent pas de différence entre l'effet des prismes réels ou virtuels et de bonnes qualités métrologiques des mesures effectuées en virtuel.

Une étude sur patients héminégligents sera à réaliser afin de valider l'outil de rééducation en réalité virtuelle immersive.

Mots clés : Adaptation prismatique, étude de validation, négligence spatiale unilatérale, réalité virtuelle immersive.