



HAL
open science

Développement d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive

Sylvain Fazilleau

► To cite this version:

Sylvain Fazilleau. Développement d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive. Médecine humaine et pathologie. 2019. dumas-02879851

HAL Id: dumas-02879851

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02879851>

Submitted on 12 Oct 2020

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

Sylvain FAZILLEAU

le 11.10.2019

TITRE

***Développement 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
Asseseurs : Pr Christian HERISSON
Pr Arnaud DUPEYRON
Dr Jérôme FROGER

UNIVERSITE DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement par

Sylvain FAZILLEAU

le 11.10.2019

TITRE

***Développement 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 : Pr Christian HERISSON
Pr Arnaud DUPEYRON
Dr Jérôme FROGER

ANNEE UNIVERSITAIRE 2018 - 2019

PERSONNEL ENSEIGNANT

Professeurs Honoraires

ALLIEU Yves	DUBOIS Jean Bernard	MION Charles
ALRIC Robert	DUMAS Robert	MION Henri
ARNAUD Bernard	DUMAZER Romain	MIRO Luis
ASTRUC Jacques	ECHENNE Bernard	NAVARRO Maurice
AUSSILLOUX Charles	FABRE Serge	NAVRATIL Henri
AVEROUS Michel	FREREBEAU Philippe	OTHONIEL Jacques
AYRAL Guy	GALIFER René Benoît	PAGES Michel
BAILLAT Xavier	GODLEWSKI Guilhem	PEGURET Claude
BALDET Pierre	GRASSET Daniel	PELISSIER Jacques
BALDY-MOULINIER Michel	GROLLEAU-RAOUX Robert	POUGET Régis
BALMES Jean-Louis	GUILHOU Jean-Jacques	PUECH Paul
BALMES Pierre	HERTAULT Jean	PUJOL Henri
BANSARD Nicole	HUMEAU Claude	PUJOL Rémy
BAYLET René	JAFFIOL Claude	RABISCHONG Pierre
BILLIARD Michel	JANBON Charles	RAMUZ Michel
BLARD Jean-Marie	JANBON François	RIEU Daniel
BLAYAC Jean Pierre	JARRY Daniel	RIOUX Jean-Antoine
BLOTMAN Francis	JOYEUX Henri	ROCHFORT Henri
BONNEL François	LAFFARGUE François	ROSSI Michel
BOUDET Charles	LALLEMANT Jean Gabriel	ROUANET DE VIGNE
BOURGEOIS Jean-Marie	LAMARQUE Jean-Louis	LAVIT Jean Pierre
BRUEL Jean Michel	LAPEYRIE Henri	SAINT AUBERT Bernard
BUREAU Jean-Paul	LESBROS Daniel	SANCHO-GARNIER Héléne
BRUNEL Michel	LOPEZ François Michel	SANY Jacques
CALLIS Albert	LORiot Jean	SEGNARBIEUX François
CANAUD Bernard	LOUBATIERES Marie	SENAC Jean-Paul
CASTELNAU Didier	Madeleine	SERRE Arlette
CHAPTAL Paul-André	MAGNAN DE BORNIER	SIMON Lucien
CIURANA Albert-Jean	Bernard	SOLASSOL Claude
CLOT Jacques	MARY Henri	THEVENET André
D'ATHIS Françoise	MATHIEU-DAUDE Pierre	VIDAL Jacques
DEMAILLE Jacques	MEYNADIER Jean	VISIER Jean Pierre
DESCOMPS Bernard	MICHEL François-Bernard	
DIMEGLIO Alain	MICHEL Henri	

Professeurs Emérites

ARTUS Jean-Claude	ELEDJAM Jean-Jacques	MONNIER Louis
BLANC François	GUERRIER Bernard	PREFAUT Christian
BOULENGER Jean-Philippe	JOURDAN Jacques	PUJOL Rémy
BOURREL Gérard		SULTAN Charles
BRINGER Jacques		TOUCHON Jacques
CLAUSTRES Mireille	MARES Pierre	VOISIN Michel
DAURES Jean-Pierre	MAURY Michèle	ZANCA Michel
DAUZAT Michel	MILLAT Bertrand	
DEDET Jean-Pierre	MAUDELONDE Thierry	

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

PU-PH de classe exceptionnelle

ALBAT Bernard - Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
ALRIC Pierre - Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option chirurgie vasculaire)
BACCINO Eric - Médecine légale et droit de la santé
BASTIEN Patrick - Parasitologie et mycologie
BONAFE Alain - Radiologie et imagerie médicale
CAPDEVILA Xavier - Anesthésiologie-réanimation
COLSON Pascal – Anesthésiologie-réanimation
COMBE Bernard - Rhumatologie
COSTA Pierre - Urologie
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
DAVY Jean Marc - Cardiologie
DE LA COUSSAYE Jean Emmanuel - Anesthésiologie-réanimation
DELAPORTE Eric - Maladies infectieuses ; maladies tropicales
DEMOLY Pascal – Pneumologie, addictologie
DE WAZIERES Benoît - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
DOMERGUE Jacques - Chirurgie générale
DUFFAU Hugues - Neurochirurgie
DUJOLS Pierre - Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
ELIAOU Jean François - Immunologie
FABRE Jean Michel - Chirurgie générale
FRAPIER Jean-Marc – Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
GUILLOT Bernard - Dermato-vénéréologie
HAMAMAH Samir-Biologie et Médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
HEDON Bernard-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
HERISSON Christian-Médecine physique et de réadaptation
JABER Samir-Anesthésiologie-réanimation
JEANDEL Claude-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
JONQUET Olivier-Réanimation ; médecine d'urgence
JORGENSEN Christian-Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie
KOTZKI Pierre Olivier-Biophysique et médecine nucléaire
LANDAIS Paul-Epidémiologie, Economie de la santé et Prévention
LARREY Dominique-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
LEFRANT Jean-Yves-Anesthésiologie-réanimation
LE QUELLEC Alain-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
MARTY-ANE Charles - Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MERCIER Jacques - Physiologie
MESSNER Patrick – Cardiologie
MONDAIN Michel – Oto-rhino-laryngologie
PELLISSIER Jacques-Médecine physique et de réadaptation
RENARD Eric-Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale
REYNES Jacques-Maladies infectieuses, maladies tropicales
RIBSTEIN Jean-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
RIPART Jacques-Anesthésiologie-réanimation
ROUANET Philippe-Cancérologie ; radiothérapie
SCHVED Jean François-Hématologie; Transfusion
TAOUREL Patrice-Radiologie et imagerie médicale
UZIEL Alain -Oto-rhino-laryngologie
VANDE PERRE Philippe-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
YCHOU Marc-Cancérologie ; radiothérapie

PU-PH de 1^{re} classe

AGUILAR MARTINEZ Patricia-Hématologie ; transfusion
AVIGNON Antoine-Nutrition
AZRIA David -Cancérologie ; radiothérapie
BAGHDADLI Amaria-Pédopsychiatrie ; addictologie
BEREGI Jean-Paul-Radiologie et imagerie médicale
BLAIN Hubert-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
BLANC Pierre-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BORIE Frédéric-Chirurgie digestive
BOULOT Pierre-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
CAMBONIE Gilles -Pédiatrie
CAMU William-Neurologie
CANOVAS François-Anatomie
CARTRON Guillaume-Hématologie ; transfusion
CHAMMAS Michel-Chirurgie orthopédique et traumatologique
CHANQUES Gérald – Anesthésie-réanimation
CORBEAU Pierre-Immunologie
COSTES Valérie-Anatomie et cytologie pathologiques
CYTEVAL Catherine-Radiologie et imagerie médicale
DADURE Christophe-Anesthésiologie-réanimation
DAUVILLIERS Yves-Physiologie
DE TAYRAC Renaud-Gynécologie-obstétrique, gynécologie médicale
DEMARIA Roland-Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
DEREURE Olivier-Dermatologie – vénéréologie
DE VOS John – Cytologie et histologie
DROUPY Stéphane -Urologie
DUCROS Anne-Neurologie
GARREL Renaud – Oto-rhino-laryngologie
HAYOT Maurice - Physiologie
KLOUCHE Kada-Réanimation ; médecine d'urgence
KOENIG Michel-Génétique moléculaire
LABAUGE Pierre- Neurologie
LAFFONT Isabelle-Médecine physique et de réadaptation
LAVABRE-BERTRAND Thierry-Cytologie et histologie
LAVIGNE Jean-Philippe – Bactériologie – virologie, hygiène hospitalière
LECLERCQ Florence-Cardiologie
LEHMANN Sylvain-Biochimie et biologie moléculaire
LE MOING Vincent – Maladies infectieuses, maladies tropicales
LUMBROSO Serge-Biochimie et Biologie moléculaire
MARIANO-GOULART Denis-Biophysique et médecine nucléaire
MATECKI Stéfan -Physiologie
MEUNIER Laurent-Dermato-vénéréologie
MOREL Jacques - Rhumatologie
MORIN Denis-Pédiatrie
NAVARRO Francis-Chirurgie générale
PETIT Pierre-Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PERNEY Pascal-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
PRUDHOMME Michel - Anatomie
PUJOL Jean Louis-Pneumologie ; addictologie
PUJOL Pascal-Biologie cellulaire
PURPER-OUAKIL Diane-Pédopsychiatrie ; addictologie
QUERE Isabelle-Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option médecine vasculaire)
SOTTO Albert-Maladies infectieuses ; maladies tropicales
TOUITOU Isabelle-Génétique
TRAN Tu-Anh-Pédiatrie
VERNHET Héléne-Radiologie et imagerie médicale

PU-PH de 2^{ème} classe

ASSENAT Éric-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BERTHET Jean-Philippe-Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BOURDIN Arnaud-Pneumologie ; addictologie
CANAUD Ludovic-Chirurgie vasculaire ; Médecine Vasculaire
CAPDEVIELLE Delphine-Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
CAPTIER Guillaume-Anatomie
CAYLA Guillaume-Cardiologie
COLOMBO Pierre-Emmanuel-Cancérologie ; radiothérapie
COSTALAT Vincent-Radiologie et imagerie médicale
COULET Bertrand-Chirurgie orthopédique et traumatologique
CUVILLON Philippe-Anesthésiologie-réanimation
DAIEN Vincent-Ophtalmologie

DORANDEU Anne-Médecine légale -
 DUPEYRON Arnaud-Médecine physique et de réadaptation
 FAILLIE Jean-Luc – Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique, addictologie
 FESLER Pierre-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
 GAUJOUX Viala Cécile-Rhumatologie
 GENEVIEVE David-Génétiq ue
 GODREUIL Sylvain-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
 GUILLAUME Sébastien-Urgences et Post urgences psychiatriques -
 GUILPAIN Philippe-Médecine Interne, gériatrie et biologie du vieillissement; addictologie
 GUIU Boris-Radiologie et imagerie médicale
 HERLIN Christian – Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique, brulologie
 HOUEDE Nadine-Cancérologie ; radiothérapie
 JACOT William-Cancérologie ; Radiothérapie
 JUNG Boris-Réanimation ; médecine d'urgence
 KALFA Nicolas-Chirurgie infantile
 KOUYOUMDJIAN Pascal-Chirurgie orthopédique et traumatologique
 LACHAUD Laurence-Parasitologie et mycologie
 LALLEMANT Benjamin-Oto-rhino-laryngologie
 LE QUINTREC Moglie - Néphrologie
 LETOUZEY Vincent-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
 LONJON Nicolas - Neurologie
 LOPEZ CASTROMAN Jorge-Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
 LUKAS Cédric-Rhumatologie
 MAURY Philippe-Chirurgie orthopédique et traumatologique
 MILLET Ingrid-Radiologie et imagerie médicale
 MORANNE Olivier-Néphrologie
 NAGOT Nicolas-Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
 NOCCA David-Chirurgie digestive
 PANARO Fabrizio-Chirurgie générale
 PARIS Françoise-Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
 PASQUIE Jean-Luc-Cardiologie
 PEREZ MARTIN Antonia-Physiologie
 POUDEROUX Philippe-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
 RIGAU Valérie-Anatomie et cytologie pathologiques
 RIVIER François-Pédiatrie
 ROGER Pascal-Anatomie et cytologie pathologiques
 ROSSI Jean François-Hématologie ; transfusion
 ROUBILLE François-Cardiologie
 SEBBANE Mustapha-Anesthésiologie-réanimation
 SIRVENT Nicolas-Pédiatrie
 SOLASSOL Jérôme-Biologie cellulaire
 STOEBNER Pierre – Dermato-vénéréologie
 SULTAN Ariane-Nutrition
 THOUVENOT Éric-Neurologie
 THURET Rodolphe-Urologie
 VENAIL Frédéric-Oto-rhino-laryngologie
 VILLAIN Max-Ophthalmologie
 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

2^{ème} classe :

LAOU DJ CHENIVESSE Dalila - Biochimie et biologie moléculaire

VISIER Laurent - Sociologie, démographie

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - Médecine générale

1^{re} classe :

LAMBERT Philippe

2^{ème} classe :

AMOUYAL Michel

PROFESSEURS ASSOCIES - Médecine Générale

CLARY Bernard
DAVID Michel

PROFESSEUR ASSOCIE - Médecine

BESSIS Didier - Dermato-vénéréologie
MEUNIER Isabelle – Ophtalmologie
MULLER Laurent – Anesthésiologie-réanimation
PERRIGAULT Pierre-François - Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
ROUBERTIE Agathe – Pédiatrie

Maîtres de Conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers

MCU-PH Hors classe

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
HILLAIRE-BUYS Dominique-Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
GIANSILY-BLAIZOT Muriel – Hématologie, transfusion
PELLESTOR Franck-Cytologie et histologie
PUJOL Joseph-Anatomie
RICHARD Bruno-Thérapeutique ; addictologie
RISPAIL Philippe-Parasitologie et mycologie
SEGONDY Michel-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

MCU-PH de 1^{re} classe

BADIOU Stéphanie-Biochimie et biologie moléculaire
BOUDOUSQ Vincent-Biophysique et médecine nucléaire
BOURGIER Céline-Cancérologie ; Radiothérapie
BRET Caroline -Hématologie biologique
COSSEE Mireille-Génétique Moléculaire
GABELLE DELOUSTAL Audrey-Neurologie
GIRARDET-BESSIS Anne-Biochimie et biologie moléculaire
LAVIGNE Géraldine-Hématologie ; transfusion
LESAGE François-Xavier – Médecine et santé au travail
MATHIEU Olivier-Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MENJOT de CHAMPFLEUR Nicolas-Neuroradiologie
MOUZAT Kévin-Biochimie et biologie moléculaire
PANABIERES Catherine-Biologie cellulaire
PHILIBERT Pascal-Biologie et médecine du développement et de la reproduction
RAVEL Christophe - Parasitologie et mycologie
SCHUSTER-BECK Iris-Physiologie
STERKERS Yvon-Parasitologie et mycologie
TUAILLON Edouard-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
YACHOUH Jacques-Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie

MCU-PH de 2^{ème} classe

BERTRAND Martin-Anatomie
DE JONG Audrey – Anesthésie-réanimation
DU THANH Aurélie-Dermato-vénéréologie
GALANAUD Jean Philippe-Médecine Vasculaire
GOUZI Farès-Physiologie
HERRERO Astrid – Chirurgie générale
JEZIORSKI Éric-Pédiatrie
KUSTER Nils-Biochimie et biologie moléculaire
MAKINSON Alain-Maladies infectieuses, Maladies tropicales
MURA Thibault-Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
OLIE Emilie-Psychiatrie d'adultes ; addictologie
PANTEL Alix – Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
PERS Yves-Marie – Thérapeutique, addictologie
SABLEWSKI Vanessa – Anatomie et cytologie pathologiques
THEVENIN-RENE Céline-Immunologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - Médecine Générale

Maîtres de conférence de 1^{ère} classe

COSTA David

Maîtres de conférence de 2^{ème} classe

FOLCO-LOGNOS Béatrice

OUDE-ENGBERINK Agnès

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES - Médecine Générale

GARCIA Marc

MILLION Elodie

PAVAGEAU Sylvain

REBOUL Marie-Catherine

SERAYET Philippe

REMERCIEMENTS

A mes maîtres,

Pr Isabelle Laffont, merci pour votre implication pour chacun des internes de la famille MPR. Vos connaissances sont précieuses pour nous, et c'est un réel plaisir que d'apprendre à vos côtés car les notions complexes deviennent beaucoup plus simples avec vous. Un grand merci pour votre soutien, votre écoute et votre confiance. Tout le monde connaît votre engouement (justifié !) pour les technologies innovantes de rééducation et j'espère grandement ne pas vous décevoir. Merci d'avoir accepté d'être membre de mon jury.

Pr Arnaud Dupeyron, le principal regret lors de ma formation, c'est de ne pas avoir eu l'opportunité de me former dans votre unité Nîmoise. Merci pour votre grande accessibilité qui ne peut que faciliter notre formation, et notre bien être dans notre spécialité qui n'a rien à envier aux autres. Merci d'avoir accepté d'être membre de mon jury et de m'avoir aidé pour les biostatistiques de la thèse.

Pr Christian Hérisson, merci pour le dévouement de votre carrière à notre spécialité et à notre région. Vous êtes un des piliers qui ont marqué la Médecine Physique et Réadaptation et nous vous en serons toujours reconnaissant. Merci d'avoir accepté d'être membre de mon jury.

Dr Jérôme Froger, tout d'abord, merci pour ton enseignement en rééducation neurologique, tu m'as donné le goût pour cette branche de notre belle spécialité, et je te respecte beaucoup pour cela. Ton sang-froid remarquable a été très formateur et m'a appris à ne pas céder à la panique ! Merci de m'avoir proposé ta supervision sur ce projet. Merci d'avoir laissé une chance à une nouvelle technologie qui modifiera probablement nos pratiques. J'ai eu de la chance de pouvoir travailler de manière combinée sur ce très fascinant syndrome (dont tu es l'expert régional), et sur les nouvelles technologies (dont tu connais ma passion). J'espère que ce travail ne sera que le commencement.

A mes mentors,

Laurent S., Karine P., Laurence B., merci pour m'avoir fait découvrir votre petite famille Palavasiennne. J'ai pu commencer mon internat en douceur grâce à vous !

Merci aux Graulens **Jérôme F., Huei-Yune B., Marine S., Sylvie P.**

(Merci à notre spécialité, d'implanter nos SSR en bord de plage...)

Merci à **Claire J. et Véronique C.**, vos sympathies respectives sont difficiles à départager.

Merci aux **neurologues, rhumatologues** et aux **pédiatres** qui m'ont accueilli et qui m'ont montré qu'on est beaucoup mieux en MPR !

A mes co-internes,

D'abord **les goélands**,
puis **Perrine** (aka Dudu), **Melissa**,
puis rien,
puis **Florian, Charlotte**,
puis **Paulina** (le chat qui force), **Hind, Charlotte**,
puis **Mainini** (faudra faire un caryotype quand même), **Vinc'** dit « la Moiz' », **Stella** (au Mojo très puissant), **Carole**,
puis rien,
puis **Pauline** (seulement co-interne ?)

Vous m'avez tous (sauf les goélands) accompagné dans la galère, et dans la joie ! Notre entraide m'a formé tout simplement.

A mes collègues de PROPARA,

Hélène, Anthony, Claire, Cécile et **Christine**. C'est une année charnière pour moi, j'en apprend plus qu'en plusieurs années d'internat ! Vos savoirs faire respectifs valent de l'or, et je ne pouvais espérer mieux comme transition pour passer dans la cours des grands, grâce à votre précieux soutien ! Vos caractères sont si différents, vos manières de faire aussi, et je compte bien m'inspirer de chacun de vous pour devenir un meilleur médecin.

A toute mon équipe du premier étage, IDE, AS, kinés, ergos, et tous les autres !

Aux meilleures secrétaires que j'ai rencontrées (et je le pense vraiment) : **Christelle, Babeth, Yamina, Joce** merci pour le soutien, tout est beaucoup plus facile avec vous ! C'est un vrai plaisir de travailler avec vous.

Cette année a été très importante pour moi, j'ai découvert une ambiance de travail que je qualifie d'idéale à vos côtés. Vous m'avez tous formé par vos précieuses connaissances respectives. Ça va être très difficile de tous vous quitter...

A mes patients, abîmés par la vie

Tenter de vous réparer, moralement et physiquement, est l'expérience la plus gratifiante pour moi. Tous ces années de sacrifices sont oubliées, quand on redécouvre un sourire sur vos visages. Vous êtes tous uniques et mémorables et vous confirmez tous les jours, la beauté de mon métier.

A mes amis,

Ceux que je ne vois plus, mais qui étaient les premiers,

- Maxime, Jimmy,
- Aurélien, Jonathan, Pierre,
- Quentin,
- Alexandre, Romain, Bastien,
- Kévin, Maxime, Dimitri,

A mes co-externes du Poitou,

- A tous ceux qui roulent les « r » avec prognathisme, mangent de la terre, n'ont pas l'eau courante, mais se contentent de tourteaux fromagers, broyés du Poitou, cagouilles et autres farcis Poitevins. Certains ont trop abusé de l'épine, du cognac, et du pineau des Charentes mais s'en sont bien sortis. Vous êtes mes racines et j'en suis fier.
- **David Godcity** qui me suit à la trace depuis le lycée et qui aime beaucoup les enfants... Inquiétant !
- **Le Ptit Gars**, au surnom détesté mais qui reflète pourtant la vérité...
- **Gaby Piou Piou**, l'enfonceur de panneaux « STOP ».
- **Gui de Bellange**, le maître des bufflons.

A mes coloc's d'internat

- St Eloi : **Kévin, Nico, PPP, Miloui, Quentin, Sarah, Guillaume, Gaurélie, Bobo, Baba, Stan, Taki, Emilie, Mathilde, Amandine, Nathalie, Ludivine.**
- Caremeau : **Ariane, Célia, Dudu, Hélène, Titoune, Lucas, Garnaud, Marie, Kéké, Nico...**

A l'alcooloc' de Saint Jean de Las Vedas

- **Les SeaRotiques**
- **Simon** : L'gars d'ch'o canton qu'o vin d'ch'o Poitou non de dl'a ! O lé une bin bel' découvert' !
- **Nico** (« le narco ») : J'espère que tu ne t'endormiras pas en lisant ces lignes.

Aux inclassables,

- **Titoune, Gros Lucas**, jamais je n'ai entendu une phrase sérieuse sortir de vos bouches. Et ça me va bien !
- **Maitre Minh** : Notre maître Yoda plein de sagesse tu es.
- **Pampli**, (ainsi que **Kal** et **Isaac**), **Juliette, Clacla**, les ainés.
- **Sophie Cocorico** !
- **Olivier Debut** mon prof de kite efficace et pas cher !
- **La Moiz'** (c'bon vieux) et sa femme **Poupon** (cette bonne vieille) : Mikoluf et Numérobis vous êtes sérieux ? Heureusement qu'ils sont canons ça devrait compenser...
- **Aguilar**, dit « l'aigle Auvergnat » : Une rencontre sur le tard qui a du potentiel ! Dommage qu'il retourne en terre du milieu. Certains diraient même « au-delà du mur »...

A la team Sea Rose,

- **A Marie** : Je ne sais pas où te classer car tu es partout et pour toujours ! Tu es ma bigoudène la plus fidèle, boudiou !
- **A Kéké, « Tonton »** : La figure paternelle, tu m'as fait découvrir l'amitié fidèle, celle qui dure et résiste à la rouille.
- **A NyFa** : La figure maternelle, la capitaine, mais une patte de canard élevée à l'aligot avant tout.
- **A Adel** : L'arabe du futur ou le Gros bourrin au cœur tendre. Ça ferait un bon p'tit plat en tajine ça. Qu'en pense Gordon ?
- **A Anna** : Merci d'améliorer notre Adel au quotidien. On sait que c'est pas facile.
- **A Miloui** : OSEF la T.S.H., ta folie ne peut pas être qu'hormonale !
- **A Lina** : Ce qu'elle dit n'a aucun sens. C'est pour ça qu'elle est indispensable.
- **A Aurélie, Mika, et Arii** : Vos caractères sont tellement complémentaires, Arii va prendre le meilleur de chacun de vous et je sais que vous faites des parents formidables. Par contre vous nous avez assez spoilé, maintenant on voudrait le voir en vrai ! Māuruuru roa !

A mes Bonzanimaux-zamis, (ça va être difficile de s'en débarrasser)

- **Le Saumon** : Fidèle Saumon, ta rivière a bifurqué, mais en deux coups de nageoires nous nous retrouvâmes. (*Timothée Gustave*)
- **Ratus** (dit « Le Père », aka « Louca », alias « Nico », autrement « Le Dératicheur », sinon « Loucach », ou « l'Archi », aussi « Deduc'man ») Ils sont plusieurs à l'intérieur comme vous vous en doutez.
- **Le Dromadaire** : Tu feras un puissant mari à condition de sous-traiter le bricolage.
- **Le Pinson** : S'en est allé rejoindre les Choucas. Sa carte d'identité était un signe pourtant. Montagne ! Que ton futur pigeonier soit un vaste champ de ponte.
- **Le Grand Zu'** (dit « Le Champignon ») : Pas un zanimaux mais son champignon vaut le détour. La bêtise personnifiée, sous ses airs faussement sérieux.

→ Et leurs compagnes respectives **Marie Berbert, Bébou-Souriceau, PP, Mathou.**

C'est avec fierté que je vois mes deux fidèles groupes d'amis, parfois se réunir.

A mes bons animaux (de types animaliers pour de vrai), dont l'adoption égaye mes journées, (et les compliquent),

- **Loco** : Ta survie m'impressionne. Tes gênes de lâches défient toute les lois Darwiniennes. La puissance de ton corps musclé d'athlète n'a d'égal que la morbidité de ton insuffisance respiratoire.
Charles Baudelaire, Les Fleurs du Mal
- **Berlioz** : Tu veux redevenir fils unique ? Laisse faire la nature, ce n'est qu'une question de temps.

A ma famille,

A mes parents : Vous êtes les piliers fondateurs de ma personnalité et avez fait de moi ce que je suis. Votre gout de la nature, de la campagne, du voyage, du sport, des plaisirs simples de la vie, m'inspirent et m'inspireront toujours.

Maman, je regrette de ne pas avoir hérité de ton talent pour la cuisine.
Papa je regrette de ne pas avoir assez de temps libre pour bricoler et fabriquer comme tu le fais.
A vous deux, désolé de m'être éloigné et de ne pas donner de nouvelles plus souvent.

La simplicité et la complicité de votre couple sont des exemples pour moi que je m'efforcerais de reproduire.

Merci pour votre soutien, pour l'éducation que vous m'avez inculquée.
Je suis très fier de vous avoir comme parents.

Vous pensez sûrement que je suis loin des yeux, loin du cœur, pourtant, je vous assure que je vous aime.

A mon frère :

Grand frère, je suis très heureux de te voir évoluer vers le bonheur. Après pas mal d'hésitations, tu as fini par faire un métier qui te plaît et ça se voit. J'ai hâte de rencontrer ta nouvelle petite famille. Ma thèse tombe au mauvais moment !

A ma grand-mère, mon oncle, mes cousins : Une toute petite famille, c'est beaucoup plus d'amour chacun.

A ma belle belle-famille,

A Florence, Marc, Victor et Melissa, Charlotte et Yohann. Avec vous on ne s'ennuie jamais.

Merci de m'avoir accueilli dans votre famille comme vous l'avez fait.

Avec l'arrivée de **Sacha** le Petit Marseillais, plus belle est la vie.

A ma femme,

A PPP, la Lézarde, la chair de ma chair, la femme de ma vie,

Merci d'égayer mon quotidien, merci de partager mes amis et tes autres amis formidables, merci de voyager avec moi, merci de partager mes passions, merci pour ta simplicité complexe, merci pour ta patience, merci de me pousser à m'améliorer, merci de ton engagement, merci de ta confiance, merci pour ta joie de vivre, merci pour tes grimaces, merci pour ta beauté que je ne mérite pas, merci pour ton amour, merci d'exister tout simplement.

Je t'aime.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

A.V.C.	Accident Vasculaire Cérébral
C.H.U.	Centre Hospitalier Universitaire
H.A.S	Haute Autorité de Santé
HMD	Head Mounted Display (= <i>casque de réalité virtuelle</i>)
MIF	Mesure d'Indépendance Fonctionnelle
NSU	Négligence Spatiale Unilatérale
r-TMS	Stimulation magnétique transcrânienne répétitive
SSA-m et SSA-v	Subjective Straight Ahead (= <i>droit devant manuel / visuel</i>)
t-DCS	Stimulation transcrânienne à courant direct
VAP-S	Virtual Action Planning-Supermarket (<i>supermarché virtuel</i>)
VOL	Visual Open Loop (= <i>pointage sans rétroaction visuelle en boucle ouverte</i>)
VR ou RV	Réalité virtuelle

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	18
Chapitre I : La négligence spatiale unilatérale.....	19
Physiopathologie et généralités.....	19
<i>Définitions</i>	19
<i>Les différentes composantes de la négligence</i>	19
<i>Neuro-anatomie de la négligence</i>	20
<i>Epidémiologie</i>	21
<i>Les formes cliniques de négligence spatiale unilatérale</i>	21
<i>Retentissement sur les activités de vie quotidienne</i>	25
<i>Les hypothèses physiopathologiques</i>	25
Les outils d'évaluation de la négligence spatiale unilatérale.....	28
<i>Les tests « papier-crayon »</i>	28
<i>L'échelle Catherine Bergego (E.C.B.)</i>	32
<i>Les batteries standardisées d'évaluation</i>	32
<i>Qualités métrologiques des différents tests</i>	33
Les outils de rééducation de la négligence spatiale unilatérale.....	33
<i>Les différentes approches</i>	33
<i>L'efficacité</i>	37
<i>L'adaptation prismatique</i>	38
Synthèse.....	47
Chapitre II : Les jeux vidéo sérieux et la réalité virtuelle thérapeutique.....	48
Définitions.....	48
<i>La réalité virtuelle</i>	48
<i>La réalité augmentée</i>	49
<i>Les jeux vidéo</i>	50
<i>Les « Serious Games » ou « Jeux vidéo sérieux »</i>	50
<i>L'immersion, la présence et la localisation du soi en réalité virtuelle</i>	50
Les 3 composantes de la réalité virtuelle.....	51
<i>Les interfaces homme-machine (ou « effecteurs »)</i>	52
<i>Les logiciels</i>	53
<i>Le dispositif d'affichage</i>	54
La réalité virtuelle moderne par casques immersifs.....	57
<i>Une plus grande immersion</i>	57
<i>Les effets indésirables</i>	60
<i>Les contre-indications</i>	61
Les Serious Games en santé et en rééducation.....	61
<i>La rééducation des phobies</i>	63
<i>La rééducation vestibulaire</i>	63
<i>La rééducation posturale, de l'équilibre et de la marche</i>	64
<i>La lutte contre la douleur</i>	65
<i>La rééducation articulaire</i>	66
<i>La rééducation sensori-motrice</i>	66
<i>La rééducation cognitive</i>	69
Synthèse.....	70

Chapitre III : Développement d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique en réalité virtuelle immersive.....	72
Pourquoi un outil en réalité virtuelle immersive ?.....	72
<i>Les limites des prismes classiques</i>	72
<i>L'avantage du virtuel</i>	73
Le choix des techniques, du matériel, du partenaire industriel	73
La collaboration intersectorielle.....	75
Développement d'outils de quantification de la négligence	76
<i>Les outils existants dans la littérature scientifique</i>	76
<i>Le Droit Devant Manuel (SSA-m)</i>	81
<i>Le Droit Devant Visuel (SSA-v)</i>	82
<i>La précision du pointage sans rétroaction visuelle (VOL)</i>	83
<i>Le test des cloches virtuel</i>	84
Développement d'un outil de rééducation de la négligence.....	86
<i>Les outils existants dans la littérature scientifique</i>	86
<i>Développement de prototypes en réalité virtuelle non immersive</i>	92
<i>Développement d'un prototype en réalité virtuelle immersive</i>	94
 Chapitre IV : Etude pilote sur sujets sains et négligents	100
Introduction	100
Matériel et méthode	100
Faisabilité	104
Tolérance	104
Efficacité	105
 Chapitre V : Discussion	113
Discussion.....	113
Conclusion.....	118
 Bibliographie	119
Annexe 1	128
Annexe 2	129
Annexe 3	130

INTRODUCTION

La négligence spatiale unilatérale est un trouble neuropsychologique complexe à appréhender, mais également à rééduquer. De ce fait, de nombreux protocoles de rééducation ont été proposés mais ils ont la particularité de n'avoir que peu d'implication dans l'amélioration des activités de vie quotidienne du patient. La rééducation par adaptation prismatique semble être une des techniques les plus prometteuses mais elle est difficile à mettre en place et elle est très peu modulable.

Ces dernières années, nous avons assisté à un progrès croissant dans le domaine grand public des nouvelles technologies. Ces technologies peuvent également avoir une application directe en rééducation, notamment neurologique. C'est le cas de la réalité virtuelle dans sa forme immersive en 3D, qui permet une interaction sensorimotrice de l'utilisateur à travers un programme informatique de simulation du réel. Cette technologie spécifique, dans sa version moderne, n'a que très peu été étudiée en rééducation, malgré le grand nombre d'applications potentielles.

En ce qui concerne la rééducation de la négligence spatiale unilatérale, aucune équipe n'avait, à notre connaissance, tenté une transposition virtuelle de la technique par adaptation prismatique classique.

Le premier chapitre sera donc consacré à la description de la négligence spatiale unilatérale, son diagnostic, et ses traitements (dont la technique d'adaptation prismatique classique). Le deuxième chapitre a pour objectif d'établir un état de l'art concernant la réalité virtuelle, ses concepts généraux, et ses applications existantes ou à venir, en rééducation. Le troisième chapitre décrira le cheminement de l'élaboration d'un cahier des charges pour un outil virtuel et immersif d'adaptation prismatique et d'évaluation de la négligence spatiale unilatérale. Le quatrième chapitre concerne l'étude que nous avons menée sur sujets sains afin de juger de la faisabilité, de la sécurité, et d'apercevoir les bénéfices de notre outil.

Chapitre I : La négligence spatiale unilatérale

Physiopathologie et généralités

Définitions

La négligence spatiale unilatérale (NSU) (anciennement « héminégligence ») est une déficience neuropsychologique de la représentation spatiale faisant suite à une lésion cérébrale. Elle survient le plus souvent après une cérébro-lésion hémisphérique : accident vasculaire cérébral (AVC), tumeur cérébrale ou traumatisme crânien en général. Heilman, en 1979 (1), a été le premier à la définir : « Un patient héminégligent a des difficultés à signaler, à répondre ou à s'orienter vers des stimuli nouveaux lorsque ceux-ci sont présentés du côté opposé à une lésion cérébrale, cela ne pouvant pas être attribué à un déficit sensoriel ou moteur ». Le plus souvent il s'agit de l'hémi-espace gauche après une lésion de l'hémisphère droit (2).

La négligence est un trouble qui peut réduire la capacité d'une personne à regarder, à écouter ou à faire des mouvements vers la moitié de son environnement. Cela peut également affecter ses capacités à accomplir de nombreuses tâches quotidiennes, comme manger, lire et s'habiller (3).

C'est un trouble du comportement sensori-moteur, et non d'un déficit élémentaire (à la différence de l'hémianopsie latérale homonyme par exemple). Le fait que cela ne corresponde pas à un déficit perceptif pur, explique pourquoi il n'y a pas de compensation de la part du patient (dans le cas de l'hémianopsie latérale homonyme par exemple, le patient apprend rapidement à tourner la tête pour explorer l'espace qui l'entoure).

Les différentes composantes de la NSU

Il y a plusieurs composantes dont l'atteinte peut expliquer la NSU (perceptive, attentionnelle, représentationnelle, intentionnelle/motrice), et chacune d'elle peut être atteinte, soit de façon isolée, soit de façon associée (4). L'expression clinique de la négligence est par conséquent très polymorphe.

Composante perceptive :

La négligence peut résulter d'un trouble de l'intégration perceptive. Sans atteinte perceptive propre (par exemple, la vue est correcte), le problème vient alors de l'analyse des données perceptives, qui se fait de façon erronée. Elle peut toucher l'ensemble des modalités sensorielles même si la modalité visuelle est celle qui prédomine le plus souvent.

Composante attentionnelle :

Elle correspond à un trouble de l'orientation de l'attention, c'est à dire un trouble de l'attention spatiale sélective. Elle peut également résulter de l'association à des troubles de l'attention non latéralisés.

Composante représentationnelle :

Il peut s'agir d'une perte de la représentation spatiale : à titre d'exemple, nous sommes tous capables de nous remémorer la carte de la France ou un lieu connu. Un patient hémiparétique en oubliera la moitié lorsqu'il évoquera l'une de ces représentations spatiales.

Il peut aussi s'agir d'un trouble des référentiels : un cerveau sain possède un référentiel dit « égocentrique » centré sur l'axe longitudinal du corps. Selon certaines théories sur l'hémiparésie, cet axe égocentrique pourrait être déplacé vers la droite.

Composante motrice ou intentionnelle :

Il s'agirait d'un trouble de la programmation du mouvement. Sans avoir de déficit moteur, un patient hémiparétique peut se voir sous-utiliser un membre par défaut de programmation. Le cas le plus fréquent est une sous-utilisation du membre du fait de l'hémiparésie qui se surajoute au déficit moteur préexistant.

Neuro-Anatomie

Les lésions responsables d'hémiparésie sont le plus souvent latéralisées à droite, beaucoup plus rarement à gauche (5). Lors de l'atteinte hémisphérique droite, les symptômes de négligence seront latéralisés à gauche et inversement. Le plus souvent, ce sont des lésions vasculaires dans le territoire de l'artère cérébrale moyenne qui engendrent ce syndrome.

C'est le carrefour temporo-pariéto-occipital droit et le lobule pariétal inférieur droit (P2) qui sont le plus souvent touchés.

Cependant, d'autres sites ont été évoqués : gyrus cingulaire, cortex préfrontal, striatum, thalamus. Les lésions cérébrales profondes (= sous corticales) peuvent également être responsables de négligence, souvent par phénomène de diaschisis cortical (correspond à une inhibition fonctionnelle d'une zone corticale pourtant à distance d'une lésion cérébrale, par lien anatomique ou physiologique direct ou indirect.) De la même manière que pour l'aphasie sous corticale, il existe une meilleure récupération de la négligence en cas d'atteinte sous corticale par rapport à une atteinte corticale pure.

Des travaux récents suggèrent qu'une NSU gauche sévère peut être consécutive à une lésion d'un des faisceaux pariéto-frontaux. Cette dysconnexion entre le lobe pariétal et le lobe frontal pourrait jouer un rôle plus important dans la persistance d'une négligence qu'une lésion corticale isolée.

Epidémiologie

La fréquence de la NSU chez les victimes d'AVC varie de 8 % (6) à 90 % (7). Les chiffres dépendent de la définition que les auteurs utilisent, des critères de sélection des patients et de la méthode d'évaluation utilisée (8)(2)(9). L'incidence pourrait atteindre 85% après accident vasculaire sylvien droit, mais les signes régressent rapidement pour une partie des patients. Les estimations généralisent souvent la prévalence des séquelles de négligence à environ 1/3 des patients après AVC (10). En France, 140 000 nouveaux cas d'AVC surviennent chaque année. Cette pathologie représente un problème de santé publique majeur qui a des conséquences physiques mais aussi cognitives, comportementales, émotionnelles et sociales. On estime qu'il y a chaque année dans le monde, trois à cinq millions de nouveaux patients souffrants de négligence après AVC et environ un tiers des patients qui en souffriront de façon chronique (11).

Les formes cliniques de négligence spatiale unilatérale

L'observation clinique au lit du patient permet en premier lieu de mettre en évidence le syndrome. Le patient présente souvent une déviation conjuguée de la tête et des yeux en direction de la lésion cérébrale. L'intensité de la déviation est proportionnelle au degré d'atteinte. La poursuite visuelle est diminuée du côté négligé, et il existe un défaut d'exploration de l'environnement. Le patient peut ne pas répondre aux stimulations verbales ou visuelles qui proviennent de la gauche et lorsqu'on lui parle depuis la gauche, celui-ci tourne la tête vers la droite. Des situations comme l'oubli de la partie gauche d'une assiette ou de tous les éléments à gauche sur un plateau repas peuvent survenir. Les colonnes de gauche d'un journal ne sont pas lues par exemple, et aucune compensation visuelle n'est possible à la différence d'un trouble perceptif sensoriel. Le trouble peut même simuler une pseudo-hémianopsie ou une hémianesthésie.

Les symptômes cliniques sont classés en symptômes « productifs » ou « déficitaires » (classification du neurologue Hughlings Jackson 1835-1911) ; ou bien selon le type d'espace atteint : espace « personnel » ou espace « extra personnel » (12). Ces différentes parties de l'espace dépendent de réseaux neuronaux différents (13).

Négligence extra-personnelle (ou extra-corporelle)

L'espace extra-personnel est l'espace le plus fréquemment atteint, et plus précisément, l'espace proche (=espace de préhension). C'est cette partie de l'espace qui est la plus testée dans les tests

classiques d'évaluation. Mais le déficit peut également se situer dans les autres parties de l'espace comme l'espace extra-personnel éloigné ou l'espace imaginé. Une négligence dans l'espace éloigné peut s'objectiver par un test de barrage ou de bissection de lignes éloignées grâce à un pointeur laser, ou avec des épreuves de dénombrement visuelles. Dans cet espace extra-personnel, on peut observer des comportements différents selon le référentiel sur lequel le sujet se base :

- Référence égocentrique : centrée sur le corps, le sujet négligent omet ce qu'il y a à gauche de lui.
- Référence allocentrique : centrée sur l'objet, le sujet négligent omet la partie gauche des objets.



Figure 1 Tarte aux pommes faite par un patient héminégligent gauche : omission de la partie gauche mais aussi, mauvaise disposition des tranches sur la moitié droite.

Négligence personnelle (ou corporelle)

Un oubli de la partie gauche du visage lors du rasage, ou du maquillage, sont tous deux des exemples de négligence corporelle fréquemment retrouvés. Durant la déglutition, on peut retrouver une stase unilatérale des aliments dans la cavité buccale.

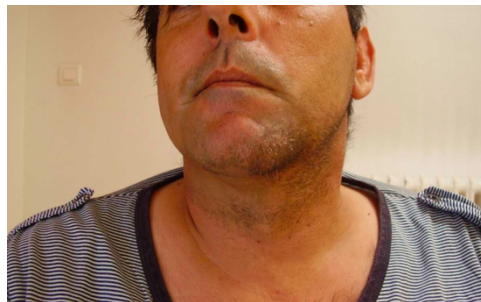


Figure 2 Patient négligent ayant omis de raser la partie gauche du visage.

L'hémicorps entier peut être négligé et dans ce cas, le patient peut oublier totalement son membre atteint (qui fréquemment est également plégique et anesthésié). On peut alors voir des situations où le patient est assis ou allongé sur son membre supérieur sans s'en rendre compte. Cette négligence s'évalue en demandant au patient de toucher les différentes parties de son hémicorps négligé avec sa main saine.

Les symptômes cliniques peuvent aussi être classés selon le versant perceptif ou moteur.

Négligence sensorielle

Les modalités visuelle, auditive, somesthésique et olfactive peuvent être atteintes, même si c'est la modalité visuelle qui est la plus souvent perturbée. Le phénomène d'extinction est une difficulté à détecter un stimulus controlatéral à la lésion, lorsque l'on stimule également le côté homolatéral, alors que les voies sensorielles sont intègres et que, émis isolément, le stimulus est bien détecté. Il peut toucher chacune des modalités sensorielles : visuelle, auditive, somesthésique et olfactive.

Négligence motrice

Elle peut correspondre à une pseudo hémiplégie par sous-utilisation de l'hémicorps opposé à la lésion, pourtant indemne de déficit. Mais le plus souvent, il y a également un tableau pyramidal avec simplement une majoration d'un déficit moteur préexistant du fait de la lésion cérébrale. Il y a alors une diminution des amplitudes de mouvement, une rareté des mouvements spontanés, et une simple consigne verbale du clinicien peut corriger, au moins en partie, ce phénomène. Le positionnement au lit ou assis peut être perturbé du fait de ce déficit. Il existe parfois aussi une diminution, voir abolition des réflexes d'évitement de stimuli nociceptifs.

On peut observer des dissociations :

- Négligence motrice sans négligence perceptive
- Négligence de l'espace extra-personnel et non personnel
- Négligence de l'espace péri-personnel (35cm) et non extra-personnel (150cm) (14).

Les symptômes associés

Le syndrome d'Anton-Babinski (autrement appelé « syndrome de l'hémisphère mineur ») associe, héminégligence, anosognosie avec anosodiaphorie et héli-asomatognosie

- L'anosognosie se traduit par une véritable méconnaissance par le patient de l'hémianesthésie, de l'hémiplégie et de l'hémianopsie dont il peut être atteint. Dans une moindre mesure, il peut s'agir d'une anosodiaphorie.
- L'héli-asomatognosie conduit le patient à ne plus reconnaître l'hémicorps opposé à la lésion comme lui appartenant.
- Le délire somato-paraphrénique peut se voir dans certains cas. Il représente le principal symptôme productif de cette pathologie et consiste en une conviction délirante à propos de l'hémicorps négligé. L'exemple le plus représentatif est le « syndrome de la main étrangère » dans lequel le patient ne reconnaît plus comme étant sienne sa main gauche, ou la perçoit comme étant celle d'un individu étranger. Plus simplement, il peut ressentir

une impression de membre surnuméraire. Un autre trouble somatognosique possible est l'allochirie (ou alloesthésie) qui fait ressentir une stimulation tactile appliquée sur un membre controlésionnel, du côté ipsilésionnel.

Troubles attentionnels non latéralisés

En association au syndrome de négligence spatiale unilatérale, peuvent exister des déficits non spatialement latéralisés comme :

- Un déficit de l'attention visuelle sélective non latéralisée (15) (16) : Appelé « attentional blink », il peut survenir lors d'atteinte de régions proches de celles atteintes dans le syndrome de négligence (lobe pariétal inférieur ou gyrus temporal supérieur). Ce déficit peut théoriquement s'observer indépendamment de toute négligence spatiale mais s'il se surajoute à celle-ci, il peut en augmenter la sévérité. Ce déficit d'attention visuelle sélective non latéralisée s'exprime par un défaut de détection d'objets visuels d'apparition successive, s'ils s'enchainent suffisamment rapidement (<400 ms).

- Un déficit d'attention soutenue : il correspond à un déficit de mobilisation durable des ressources attentionnelles. Il peut également survenir de manière indépendante au syndrome de négligence spatiale unilatérale mais quand il y est associé, il existe une corrélation entre l'intensité de la négligence et l'intensité du déficit de l'attention soutenue. Ce déficit est préférentiellement retrouvé après un AVC dans le territoire de l'artère sylvienne droite.

- Un déficit de la mémoire de travail visuo-spatiale (17). Souvent objectivé chez les patients négligents gauche, par atteinte hémisphérique droite, cela se manifeste par un trouble de la mémorisation des informations visuelles présentées dans l'hémi-espace gauche, mais également dans l'hémi-espace droit. Des lésions proches de celles de la négligence en sont responsables (sillon intra pariétal droit et gyrus frontal inférieur.)

Les troubles posturaux

Ils sont associés à l'atteinte du référentiel égocentrique (18) : à la latéralisation du référentiel égocentrique peut être associée une inclinaison du côté opposé à la lésion. Ainsi les patients se sentent droits lorsqu'ils sont inclinés vers la gauche, pouvant conduire à un syndrome pusher : les patients, inclinés sur la gauche, résistent dès lors que l'on essaye de les remettre droits.

Retentissement sur les activités de vie quotidienne

Ce syndrome est très fréquemment associé à une hémiplégie, à une hémianesthésie et à une héli-anopsie et majorant leur retentissement sur les activités de vie quotidienne. Il peut s'associer également à des troubles praxiques (ex : apraxie d'habillage, apraxie constructive) et des troubles de la mémoire topographique.

Toutes les activités de vie quotidienne peuvent être atteintes : toilette, rasage, maquillage, habillage, lecture et écriture, déplacements, l'alimentation et la recherche d'objets. C'est un facteur indépendant de sévérité du retentissement d'un accident vasculaire cérébral sur les activités de vie quotidienne (19) (20) (21) (22) (23) (24).

Il existe une récupération spontanée de la négligence spatiale au cours des trois premiers mois, mais cette récupération peut être incomplète avec persistance d'un biais attentionnel (25).

Held et al. en 1975 et Denes et al. en 1982 (21) montraient déjà que la reprise de la marche sans aide avait été possible à six mois d'évolution post-AVC chez 80% des hémiplegiques droit et seulement 67% des hémiplegiques gauche. Cette différence évolutive ne pouvait s'expliquer par la sévérité du déficit sensoriel et moteur qui étaient comparables dans les deux groupes. Seules les perturbations visuo-spatiales et les troubles de l'image corporelle qui y étaient associés pouvaient expliquer cette différence.

Compte tenu de ces implications fonctionnelles, il n'est pas surprenant que la réadaptation de la négligence soit un objectif important de la réadaptation post-AVC.

Les hypothèses physiopathologiques

Les mécanismes physiopathologiques évoqués comme pouvant être à l'origine de la NSU sont nombreux. Certains ont, à ce jour, été écartés et il n'existe actuellement aucun modèle unitaire qui permettrait d'expliquer le caractère polymorphe de ce trouble du comportement sensori-moteur. Les hypothèses principales évoquées pour expliquer ce trouble ont été :

L'hypothèse sensorielle

Elle correspondait à la première hypothèse évoquée (26). L'hypothèse sensorielle a désormais été écartée sur les arguments suivants :

- L'héminégligence ne se limite pas à une atteinte d'un sens.
- Il n'y a pas d'adaptation compensatoire de la part du patient.
- Concernant l'héminégligence visuelle, le trouble peut même survenir les yeux fermés, par exemple, à l'évocation d'une carte.

Les hypothèses attentionnelles

- Une des hypothèses attentionnelles a notamment été développée par Posner (27) qui évoque un défaut de désengagement de l'attention sélective spatiale. L'expérience que Posner a menée et qui permet d'en rendre compte est la suivante : des patients avec une lésion cérébrale doivent appuyer sur un bouton chaque fois qu'une cible s'allume devant eux, le temps de latence est alors mesuré. Chez les patients avec lésion cérébrale droite, et lorsque la cible est présentée du côté gauche, le temps de latence est supérieur au temps de latence droit. Si, avant de présenter la cible gauche, on attire le regard et l'attention du patient par un carré lumineux dans l'hémi-espace gauche, les temps de latence redeviennent normaux. Si, avant de présenter la cible gauche, on attire le regard et l'attention du patient par un carré lumineux dans l'hémi-espace droit, les temps de latence augmentent, et parfois même tellement, que le patient ne répond plus.
- L'hypothèse attentionnelle de Heilman (28) : l'interruption d'une boucle cortico-cingulo-réticulaire serait responsable de la négligence, car celle-ci assurerait au niveau des hémisphères cérébraux le contrôle attentionnel et intentionnel de l'hémi-espace controlatéral. Dans cette hypothèse, l'hémisphère droit aurait la particularité d'assurer la perception de l'espace controlatéral mais aussi ipsilatéral. Cela expliquerait alors la plus grande fréquence, la plus grande sévérité et la persistance du syndrome de négligence spatiale unilatérale par atteinte hémisphérique droite.
- Le modèle vectoriel de Kinsbourne (29) : chaque hémisphère contrôlerait l'attention dans l'hémi-espace controlatéral selon des vecteurs attentionnels opposés. L'un ou l'autre vecteur pourrait prédominer selon la balance inter-hémisphérique. La négligence serait liée à un déséquilibre entre ces deux vecteurs attentionnels.
Cependant, cette hypothèse semble être remise en question comme le montrent les travaux en imagerie cérébrale de l'équipe de Corbetta (30).

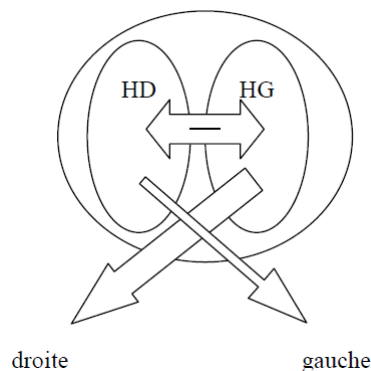


Figure 3 Illustration du modèle de Kinsbourne (1987).

- Le modèle pré-moteur de Rizzolatti ou « théorie pré motrice de l'attention » : elle postule que la négligence unilatérale pourrait être consécutive à l'interruption d'un réseau de neurones impliqués dans le traitement d'informations issues d'une partie de l'espace et utilisées pour l'action. Selon cette hypothèse, la négligence spatiale pourrait ainsi résulter d'une atteinte de ces systèmes pré-moteurs, nécessaires à l'action, à un haut niveau cognitif impliquant l'attention et l'intention.

Ces théories ne permettent cependant pas d'expliquer certaines manifestations cliniques du syndrome de négligence spatiale unilatérale, comme les symptômes productifs (ex : délire somato-paraphrénique). Par ailleurs, la non conscience que le sujet semble avoir d'une partie de son espace et l'existence de dissociations parmi les manifestations de la négligence spatiale unilatérale devraient plutôt être rattachées à une perturbation de mécanismes impliqués dans la représentation spatiale.

Les hypothèses des troubles de la représentation spatiale

- L'expérience de Bisiach (31) concernant la place du Dôme à Milan a permis de fonder cette hypothèse. Il demandait à des patients de se représenter mentalement la très célèbre place. Lorsqu'ils s'imaginaient regarder la place de face, les patients oubliaient la partie gauche, et lorsqu'ils s'imaginaient regarder la place de dos, ils oubliaient la partie droite. Cette nouvelle interprétation de la négligence spatiale unilatérale décrit une difficulté à concevoir une représentation interne de l'espace du côté opposé à la lésion. Selon Bisiach, ce modèle est le seul qui pourrait permettre une vision unitaire de ce syndrome et des troubles souvent associés que sont : l'anosognosie (le patient ne semble pas avoir conscience de son trouble) et certains symptômes pseudo-hallucinatoires comme l'allochirie (trouble de la sensibilité dans lequel le patient ressent un stimuli tactile latéralisé du côté opposé et symétrique du stimuli réel) et les propos confabulatoires concernant l'hémicorps négligé (délire somatoparaphrénique).



Figure 4 Piazza del Duomo (Milan), de face (photo du haut), et de dos (photo du bas). En rouge, la partie omise.

- L'hypothèse de la déviation du référentiel égocentrique. Il s'agit d'une autre hypothèse représentationnelle selon Heilman et Jeannerod (32), basée sur la perturbation du cadre de référence spatiale (appelé aussi « référentiel égocentrique »). Ce référentiel est utilisé pour l'orientation dans l'espace et pour la coordination visuo-motrice. Une méthode simple pour évaluer le référentiel égocentrique du sujet est de lui demander de pointer dans l'obscurité droit devant lui. Un sujet négligent gauche présentera par exemple un pointage manuel dans le noir, dévié en direction du biais comportemental, c'est à dire du même côté que la lésion cérébrale, donc à droite. La question s'est aussi posée de savoir s'il s'agissait d'une translation ou d'une rotation du référentiel égocentrique, les travaux de Rousseaux et al. (33) ont permis de retenir la translation.

Les outils d'évaluation de la négligence spatiale unilatérale

A la différence d'un déficit élémentaire, l'héminégligence ne se caractérise pas simplement en examinant physiquement le patient : il faut observer le comportement du sujet dans son environnement, lors de tâches plus ou moins complexes.

Les tests « papier-crayon »

Ils peuvent souvent être réalisés au lit du patient, mais leur limite réside dans le fait qu'ils n'évaluent que l'espace péri-personnel proche du patient.

Les tests visuo-perceptifs :

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

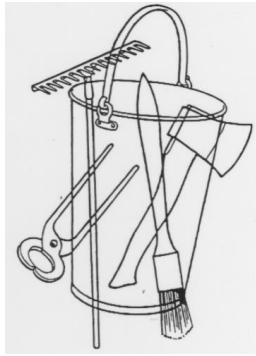


Figure 5 Figures enchevêtrées

- Le test de lecture peut mettre en évidence une alexie.

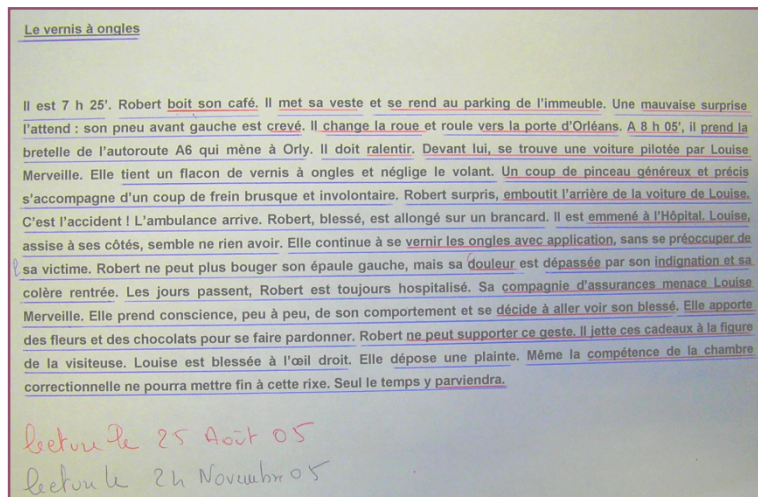


Figure 6 Les mots lus par le patient sont soulignés par l'examineur

Les tests visuo-graphiques :

- Le test de bissection de ligne (Axenfeld 1894) (34) est le premier à avoir été décrit. Une ligne horizontale est soumise au patient et il doit indiquer le milieu de celle-ci. Le patient négligent aura tendance à décaler le milieu en direction de la lésion cérébrale. Ce décalage est le résultat – soit d'un défaut de perception de la partie gauche de la ligne – soit d'un mouvement orienté vers la gauche – soit d'une association de ces phénomènes.

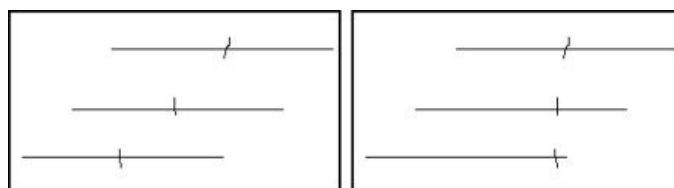


Figure 7 A gauche : bissection de ligne normale. A droite : bissection de ligne fortement altérée.

- *Les tests de barrage d'objets* : le test de barrage de lignes de Albert (35) et le test des cloches (36) sont les plus utilisés. Habituellement, les patients débutent l'exploration du côté droit et omettent les éléments à gauche. Le test des cloches a l'avantage d'intégrer des distracteurs visuels.

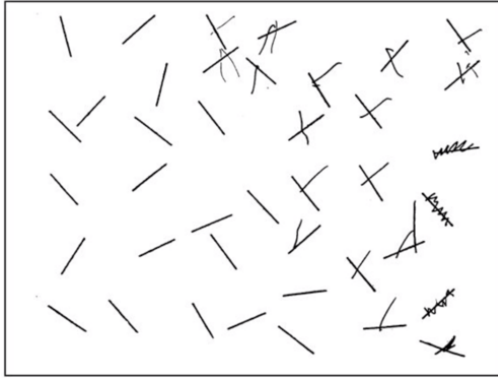


Figure 8 Test de barrage de lignes de Albert. Barrage seulement des lignes à droite, et parfois même plusieurs fois.

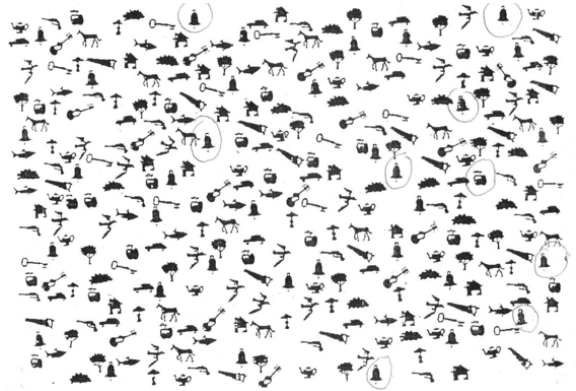


Figure 9 Test des cloches selon Gauthier et al., 1989

- *Les dessins sur copie, d'objets symétriques* : on demande au patient de copier un dessin représentant une marguerite par exemple. Le patient avec négligence oubliera de dessiner les parties gauches des objets.



Figure 10 Deux dessins, réalisés par un patient héminégligent gauche.



Figure 11 Dans certains cas sévères, on peut voir des persévérations sur la partie droite du dessin.

- *La copie de la frise de Gainotti (37)* : La frise est composée de 5 objets à recopier, et permet de distinguer la négligence centrée sur l'objet, de la négligence centrée sur l'espace, en fonction des éléments omis par le patient.

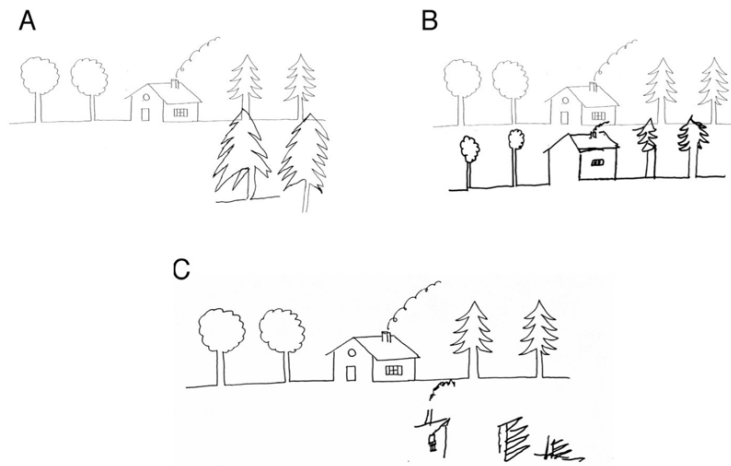


Figure 12 A = Négligence gauche centrée sur l'espace. B = Négligence gauche centrée sur l'objet.
C = Négligence gauche mixte.

- *Le test d'écriture* peut mettre en évidence une dysgraphie spatiale.

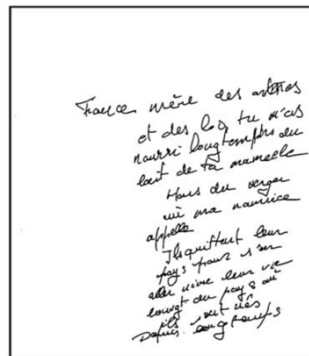


Figure 13 Dysgraphie spatiale lors de l'écriture d'un texte dicté.

Les tests représentationnels :

- *Les dessins de mémoire* : on demande au patient de dessiner de mémoire une horloge ou de placer des villes sur une carte de France par exemple.

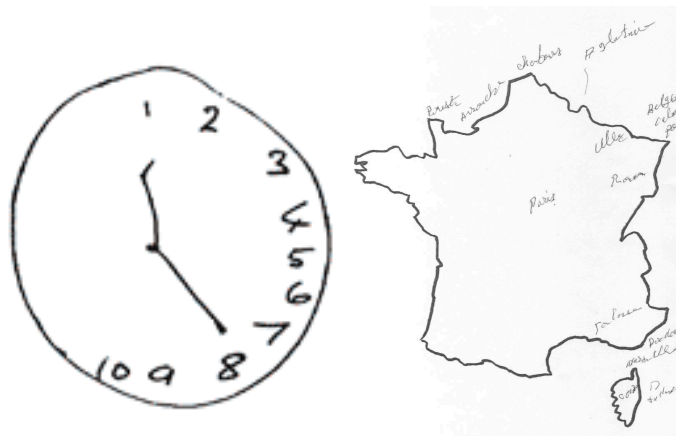


Figure 14 Omission des éléments gauche de dessins de mémoire.

L'échelle Catherine Bergego (E.C.B.)

L'échelle Catherine Bergego (38) est un test d'évaluation du retentissement de la NSU dans les actes de la vie quotidienne. C'est une échelle d'auto-évaluation par le patient grâce à un questionnaire de 10 items cotés graduellement de 0 à 3 selon l'intensité de la gêne. Certains items évaluent la part corporelle et d'autres la part extracorporelle de l'atteinte. Elle comporte également un questionnaire pour l'ergothérapeute. Ainsi, la différence de score entre ces deux questionnaires permet d'évaluer la part d'anosognosie, ce qui est un reflet de la gravité de la négligence. Cette échelle particulièrement simple à réaliser apporte des informations complémentaires aux tests papier-crayon standards et est particulièrement bien validée scientifiquement (39).

Les batteries standardisées d'évaluation

Deux batteries standardisées permettent une évaluation facilitée et complète, comprenant une mesure de la négligence spatiale unilatérale par tests conventionnels, mais aussi de l'incapacité qui en découle.

- *Le Behavioural Inattention Test (B.I.T.)*, (40) qui comporte une série de tests conventionnels d'évaluation de l'héminégligence ainsi que neuf tests comportementaux simulant des activités de la vie quotidienne comme manger un repas, composer un numéro de téléphone, lire un menu, lire l'heure, trier des pièces, copier une adresse et suivre une route sur une carte.
- *La Batterie d'Evaluation de la Négligence Unilatérale du GEREN (B.E.N.)* (41) intègre l'échelle de Catherine Bergego pour l'incapacité et 10 tests de déficience (visuo-perceptifs et visuo-graphiques avec test de barrage et bissection de ligne notamment). Elle est validée en langue française.

Qualités métrologiques des différents tests

Chacun de ces différents tests tente d'évaluer une composante différente de l'héminégligence, selon qu'ils se concentrent sur l'espace corporel, extra-corporel ou représentationnel. Les tests peuvent ainsi être regroupés dans plusieurs catégories (4) que sont :

- Les tests visuo-perceptifs
- Les tests visuo-graphiques
- Les tests représentationnels.

L'échelle comportementale Catherine Bergego se révèle être plus sensible que chacun des tests papier-crayon de manière isolée. Selon Halligan et Robertson (1992) (42), les tests de barrage seraient plus sensibles que les autres tests papier-crayon. Plus précisément, ce serait le test des cloches le plus sensible pour détecter la négligence légère à modérée (36), puis le test de lecture et ensuite le test de barrage de lignes d'Albert (38). Cela traduit un effet de complexité, le test des cloches n'étant pas organisé en ligne et présentant des objets visuels très différents avec introduction de distracteurs.

Cependant, tous ces tests ont une limite évidente car ils évaluent en majorité l'espace proche, et n'évaluent que mal l'espace lointain. Ils ont surtout pour but de quantifier la sévérité de l'atteinte, et suivre son évolution. Mais l'évaluation doit également être plus complète, pour notamment différencier les capacités non atteintes de celles atteintes, afin de mieux prendre en charge de façon adaptée, en trouvant des stratégies de compensation.

Les outils de rééducation de la négligence spatiale unilatérale

Les différentes approches

La rééducation de la négligence spatiale est un sujet complexe et particulièrement documenté depuis une quarantaine d'années dans la littérature scientifique, notamment pour certaines de ses techniques. Les deux objectifs de la rééducation de la négligence sont de diminuer le biais comportemental et diminuer le manque de conscience de l'espace controlatéral.

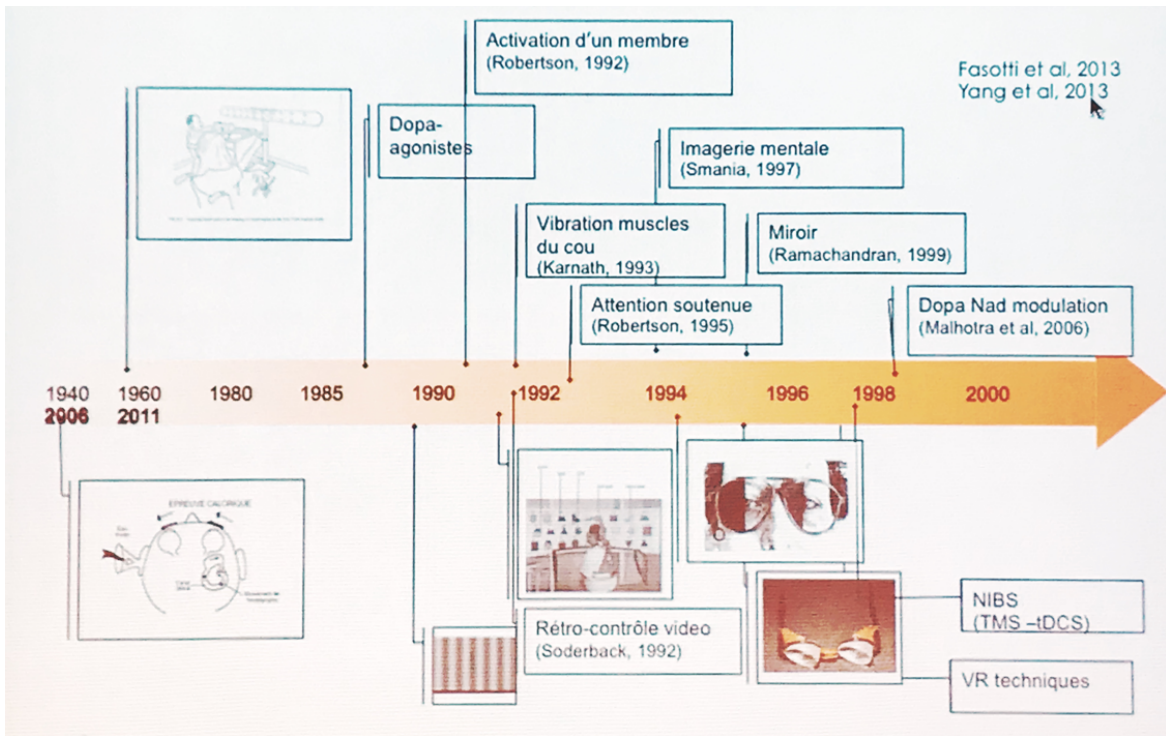


Figure 15 Panel de techniques rééducatives selon leurs dates de description, d'après Rossetti

Il existe plus d'une quinzaine de techniques différentes, et celles-ci peuvent (presque toutes) être classées en deux catégories principales (43) :

- L'approche de type « top-down », qui vise à faire porter l'attention du sujet vers l'espace négligé en stimulant les mécanismes d'exploration visuelle. Il s'agit là d'utiliser la conscience que le patient a de son déficit, impliquant une charge cognitive importante.

L'exploration visuelle (visual scanning), surtout décrite par Diller et Weinberg en 1977 (44) en est la principale méthode et on l'associe parfois à des techniques d'indilage (« cueing »). Elle est utilisée surtout en ergothérapie et est malheureusement peu généralisable dans les activités de la vie quotidienne. Il est alors possible de l'appliquer directement dans les activités de vie journalière en chambre. Par exemple, en stimulant le patient à explorer la totalité de son plateau repas, la totalité de son visage lorsqu'il se rase, etc.... Le but est de mettre en place une réorientation automatique du regard, par des exercices répétés d'exploration visuelle, afin de réduire la déviation ipsilésionnelle de l'attention.

Les techniques d'entraînement en imagerie mentale et d'attention soutenue en font également partie (45).

- L'approche de type « *bottom-up* », qui vise à améliorer la saillance et la représentation de l'hémi espace gauche grâce à des manipulations sensorielles. C'est un processus passif ne demandant aucun travail attentionnel actif du patient.

On peut par exemple réaliser des stimulations sensorielles (stimulations vestibulaires, hypokinétiques, caloriques et galvaniques (11), activation de membre, stimulation transcutanée électrique, stimulation haptique des muscles du thorax...) dont le but est de recentrer le référentiel égocentrique. Les effets bénéfiques sont souvent très nets, mais ne sont souvent malheureusement que transitoires pour ces différentes techniques.

L'adaptation prismatique est une technique qui a été proposée par l'équipe G. Rodes et Y. Rossetti (46) à la fin des années 1990 pour traiter la NSU (cf plus bas).

La technique des caches oculaires (« *eye patching* »), en occultant uniquement l'hémi-espace sain, ou l'indicage spatio-moteur, oblige le patient à s'intéresser aux stimuli de l'hémi-espace négligé (47)(48).

Une méthode simple et complémentaire en phase initiale d'un séjour rééducatif, est d'adapter l'environnement du patient dans sa chambre. On place alors les objets stimulants dans l'espace négligé du patient pour attirer son regard (ex : TV, radio, fenêtre, visiteurs...), tout en laissant les objets de sécurité dans l'espace sain et accessible (ex : sonnette d'appel, verre d'eau, etc.).

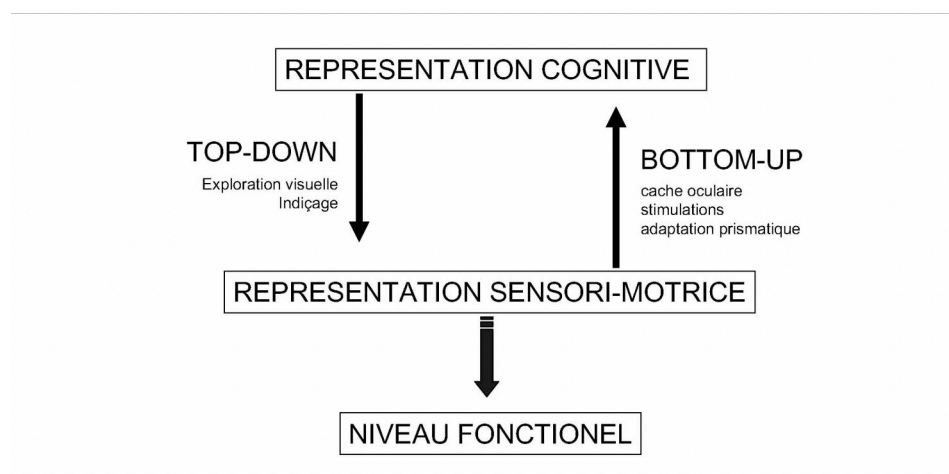


Figure 16 Les deux approches de la rééducation du syndrome d'héminégligence « *top-down* » et « *bottom up* ».

Certains auteurs ont cumulé les approches « *top-down* » et « *bottom-up* » comme Wiart et al. (1997) (49) qui ont montré l'efficacité d'une tâche d'exploration visuelle associée à la réorientation du tronc du côté gauche, par l'utilisation d'une orthèse pour réaliser les tâches de pointage. C'est ce que l'on appelle l'appareillage de Bon-Saint-Côme. Schindler et al. (2002) (50) ont associé vibrations des muscles postérieurs de la nuque avec exploration visuelle et ont eu des effets plus durables. Ces deux exemples suggèrent qu'une association des deux approches peut avoir un effet supérieur à l'utilisation d'une des techniques de manière isolée.



Figure 17 Orthèse de Bon-Saint-Côme, développée au centre de rééducation de la Tour de Gassie.

Les techniques médicamenteuses sont une catégorie à part. Certaines molécules comme la Guanfacine (alpha-2-agoniste noradrénergique utilisée dans le trouble d'hyperactivité avec déficit de l'attention) s'est révélée efficace transitoirement dans la négligence gauche sévère. Le Methylphenidate (Ritaline) améliore la plasticité cérébrale et les troubles attentionnels chez les patients traumatisés crâniens. Luauté et al. en 2018, (51) fournit la preuve que l'ajout de Methylphenidate en association à l'adaptation prismatique améliore le résultat fonctionnel des patients négligents. Le Ropinirol (agoniste dopaminergique utilisé dans la maladie de Parkinson) a été utilisé par Gorgoraptis en 2012 (52). Il suggère un rôle bénéfique de la modulation dopaminergique sur la recherche visuelle et l'attention sélective chez les patients souffrant de NSU après un AVC. La revue Cochrane de 2015 (53) portant sur le sujet, s'est intéressée à l'efficacité de la rivastigmine et de la nicotine transcutanée mais ne retrouvait pas suffisamment de preuves solides dans les différentes études sélectionnées. L'efficacité de ces molécules dans le syndrome de NSU peut s'expliquer par sa fréquente association avec des troubles attentionnels non latéralisés accessibles à ce type de traitement.

D'autres techniques non médicamenteuses ont été développées, notamment, des techniques dont le but est de moduler la neuroplasticité cérébrale. Leur objectif est de réduire l'hyperexcitabilité anormale du cortex pariétal de l'hémisphère gauche, permettant une amélioration transitoire de l'héminégligence. On peut citer la Stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS) (54) et la Stimulation transcrânienne à courant direct (tDCS) (55). Par exemple, O'shea et al. en 2017 (56) avait noté des effets plus rapides et plus durables (pouvant aller jusqu'à plusieurs mois) de l'adaptation prismatique, si elle était couplée à l'utilisation concomitante de la tDCS. L'amplitude de l'adaptation était alors plus grande et les patients se désadaptaient moins vite une fois les prismes retirés. D'autres études sont actuellement en cours sur ce sujet précis.

L'efficacité

Ces techniques ont, pour la plupart, montré une certaine efficacité sur les tests analytiques mais avec une interrogation sur la pérennité de l'effet et sur le transfert dans les activités de vie quotidienne. Il n'y a en général pas de généralisation des acquis. La prise en charge est donc largement multidisciplinaire (orthophoniste, orthoptiste, neuropsychologue, ergothérapeute, et en service de soins au quotidien).

Il n'existe pas de consensus mais l'intensité de la rééducation semble très importante. Cependant, les méta-analyses montrent un niveau de preuve faible sur l'incapacité :

- La revue Cochrane de 2013 « *Cognitive rehabilitation for spatial neglect following stroke* » (57) a sélectionné les études de très bonne qualité et conclut que la rééducation cognitive de manière générale est significativement meilleure que l'absence d'intervention sur les tests de négligence effectués immédiatement après traitement. Cependant, les effets persistants et les effets sur les activités de vie quotidienne semblent beaucoup moins clairs. Ils n'objectivent aucune différence significative entre les approches « top-down » et « bottom-up ». Concernant l'adaptation prismatique, ils ne sélectionnaient que quatre études (58) (59) (60) (61) et ne retrouvaient pas d'effet significatif à court et long terme sur les difficultés dans les activités de vie quotidienne. Les auteurs préconisent que les études futures soient conçues et présentées selon une méthodologie de haute qualité, afin d'analyser les effets à long terme du traitement.
- Yang et al. (62) ont effectué une méta-analyse en 2013, étudiant seulement des essais randomisés contrôlés, dans la rééducation de la NSU après AVC de l'hémisphère droit et utilisant le B.I.T. comme critère de jugement principal. Ils ont sélectionné douze articles entre 1997 et 2012 et ont mis en évidence que l'adaptation prismatique était l'intervention la plus couramment utilisée et apparaissait comme le traitement le plus efficace parmi les études analysées.

Il existe un besoin incontestable de techniques de réadaptation simples et efficaces qui peuvent être adaptées à différents contextes et utilisées avec des patients présentant des niveaux variables de NSU (63) (11).

L'adaptation prismatique

Avant de détailler le concept de l'adaptation prismatique, nous devons nous intéresser à la notion même, d'adaptation et d'apprentissage.

L'adaptation et l'apprentissage

Lors d'une action, un individu va émettre des prédictions sur les conséquences de cette action. Après l'exécution de cette action, il peut exister une discordance entre la prédiction et le résultat observé. Le sujet va alors tenter de compenser par processus de plasticité sensorimotrice. Celle-ci associe deux phénomènes : l'adaptation et l'apprentissage (64). *Ces deux phénomènes peuvent être imagés par l'exemple de Newport et Jackson du tir à la carabine (65) : Imaginons un tireur à la carabine muni d'un viseur. Il vise parfaitement en direction de sa cible mais la rate car le tir est trop dévié à droite. Il existe alors deux stratégies pour améliorer le second tir :*

- L'apprentissage correspond à l'acquisition de nouveaux comportements moteurs, adaptés à la situation (« visuomotor learning »). Il s'agit d'une composante hautement cognitive et stratégique. Cette compensation (souvent intentionnelle) est un recalibrage immédiat mais sans réel effet consécutif. Elle semble donc moins bénéfique en rééducation. *Dans l'exemple du tir à la carabine, le tireur pourra analyser les causes potentielles de l'erreur (ex : vent, facteurs extérieurs, facteurs intrinsèques à la carabine...) et tenter d'autres tirs qui essayeront de les compenser (il visera volontairement à gauche de la cible).*
- L'adaptation est la modification d'un comportement préexistant pour faire face à de nouvelles conditions. Elle va pouvoir générer des transferts des compensations vers de nouvelles situations. Cette composante d'adaptation « vraie » ou « réalignement sensorimoteur » est plus d'ordre physiologique que cognitive. Elle est plus lente à se développer mais aussi plus durable dans le temps. Ce processus sensorimoteur semble généralisable. C'est celle-ci qui produit des effets consécutifs et semblera donc plus intéressante en rééducation. *Dans l'exemple du tir à la carabine, le tireur pourra régler (re calibrer) son viseur de carabine afin que le tir soit de nouveau dans la cible.*

Le concept d'adaptation prismatique

La déviation prismatique consiste en une déviation du champ visuel du sujet par le port de lunettes spécifiques, équipées de deux prismes (un pour chaque œil), et permettant une déviation de 10° vers la droite, par phénomène de réfraction. La puissance correspondante des prismes est de 20 dioptries.



Figure 18 Modèle standard de lunettes prismatiques (Optique Peter)

Avec l'adaptation prismatique, on transforme l'image « réelle » en image « virtuelle » (décalée). Il y a un décalage homogène du champ visuel si les prismes sont de bonne qualité. On ne s'aperçoit pas de la déviation tant qu'on ne bouge pas et qu'on ne voit pas nos propres membres. Cependant, c'est la motricité dirigée qui a un rôle primordial sur l'adaptation ; en effet, si on reste inerte, il ne se passe aucun phénomène d'adaptation par absence de conflit visuo-proprioceptif (66).

Le sujet exposé aux prismes a donc deux représentations différentes de ses mains : la main « visuelle » ou « virtuelle » (main vue de manière déviée), et la main « proprioceptive » (c'est à dire la position réelle de la main). De la même manière, un objet présenté devant le sujet lui apparaîtra dévié de 10° vers la droite, par rapport à sa position réelle.

L'adaptation prismatique a été largement utilisée depuis la fin du XIXe siècle comme paradigme pour démontrer la plasticité visuo-motrice à court terme (67) mais le premier protocole de rééducation de l'héminégligence par adaptation prismatique a été décrit par l'équipe lyonnaise en 1998 et publié dans Nature (46). Celui-ci consistait en une série de pointages successifs, de deux cibles sur une table face au sujet, alors que celui-ci est exposé à une déviation prismatique de 10° vers la droite. Lors de la première exposition au prisme, la trajectoire du pointage de cible est largement décalée vers la droite. En effet, le sujet exposé vise avec son doigt la cible virtuelle décalée et non pas la cible réelle. Il voit alors en fin de pointage, à travers les prismes, une cible virtuelle déviée à droite de 10° , ainsi que son doigt lui aussi dévié de 10° par rapport à la cible virtuelle. Le sujet se rend alors compte de son erreur de pointage trop dévié à droite, et va tenter de corriger ce biais. Il existe plusieurs méthodes de compensation pour se rapprocher au maximum de la cible. Il va devoir :

- Soit modifier la direction dans laquelle il initie le mouvement (compensation motrice). C'est le seul phénomène responsable de l'adaptation vraie. *Fig 19.A*
- Soit utiliser le rétrocontrôle visuel en temps réel ou « contrôle proactif du mouvement » qui permet de corriger la trajectoire de pointage en temps réel grâce à la visualisation en directe du membre virtuel (cela ne peut se faire que si on ralentit fortement le mouvement de pointage). *Fig 19.B*
- Par contre, si le sujet se fie à son rétrocontrôle proprioceptif (c'est à dire comparer le position vue de la cible avec la position ressentie de la main), il va avoir tendance à augmenter les

erreurs de pointage car il existera une discordance visuo-proprioceptive lors de l'adaptation prismatique. En se basant uniquement sur sa proprioception, il aura tendance à être attiré vers la cible virtuelle (décalée vers la droite) et non la cible réelle. *Fig 19.C*

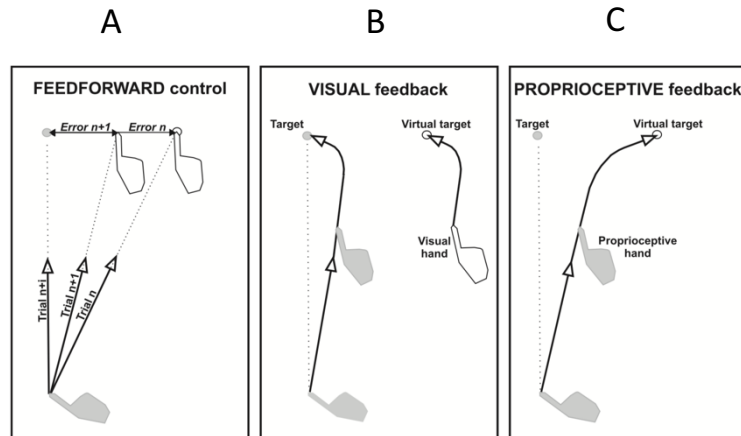


Figure 19 A = Compensation dans l'initiation motrice de trajectoire ou « contrôle proactif du mouvement »
 B = Compensation par rétrocontrôle visuel en temps réel
 C = Rétrocontrôle proprioceptif attirant le pointage vers la cible virtuelle, entraînant une erreur de pointage.

Pour que l'adaptation visuo-motrice opère, il faut empêcher au maximum le rétrocontrôle visuel en temps réel en masquant la main du sujet en début de mouvement (l'équipe lyonnaise utilise une petite plateforme rigide placée sous le menton du patient) Des mouvements de pointage rapides permettent d'empêcher le rétrocontrôle visuel en temps réel et proprioceptif (68).

Durant la séance, il faut en général 7 à 10 essais de pointage pour objectiver une nette progression dans la performance avec une réduction de l'erreur. Ensuite, l'amélioration est plus douce. Il faut habituellement 50 à 80 essais de pointage pour être parfaitement sur la cible et ce, sans effort de compensation de la part du sujet. Fortis et al. (69) ont constaté que l'adaptation a principalement lieu dans les 45 premiers essais, sans autre adaptation dans les 45 essais successifs (90 au total). Ensuite, le pointage devient alors totalement naturel. En pratique, dans les différentes études cliniques (70), il persiste tout de même un léger biais vers la droite, et ce, même après 100 essais.

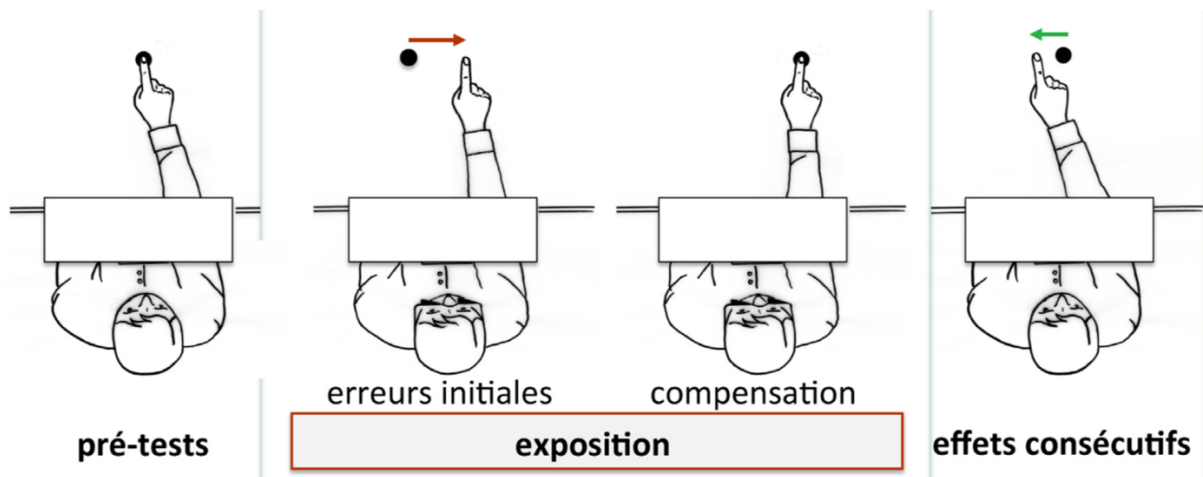


Figure 20 Illustration issue du protocole de Rode et al. de 2015 (71)

On retrouve donc les deux grands types de réactions compensatrices (apprentissage et adaptation) au cours de l'exposition aux prismes (72). Elles apparaissent successivement dans l'ordre :

- La composante cognitive, qui s'apparente à l'apprentissage par « recalibrage » sans effet consécutif.
- La composante d'adaptation « vraie » ou « réalignement sensorimoteur » plus lente à se développer, plus durable dans le temps et qui produit des effets consécutifs. On l'appelle aussi le « réalignement stratégique ». C'est le processus qui consiste à tenir à jour les cartes proprioceptives internes sur la position et la taille du corps par rapport au monde extérieur (73).

Les effets consécutifs

A ce stade, lorsqu'on enlève les lunettes prismatiques au sujet, en fin de séance d'adaptation, on observe les effets consécutifs immédiats (« after-effect » ou « post-effect »), c'est à dire une persistance de la compensation avec une déviation dans le sens inverse de la déviation initiale, lors du pointage. Les effets consécutifs compensatoires, sont toujours de sens opposé au sens de déviation du prisme. Ce décalage de mouvement s'accompagne également d'un décalage des représentations proprioceptives et décalage du référentiel égocentré dans le noir. C'est l'utilisation de ce décalage des représentations proprioceptives pour ré orienter le comportement moteur du patient qui est bénéfique chez le négligent. Avec des prismes de 10 degrés et au bout de 60 essais, Rosetti et al 1998 (46), ont montré que même les sujets sains ont un effet consécutif avec une déviation de 4 degrés vers la gauche sur une tâche de droit devant manuel. De manière surprenante, l'effet consécutif n'est pas égal à l'écart prismatique. Habituellement et, sans que l'on sache pourquoi, il est d'environ 40% de la déviation du prisme (67).

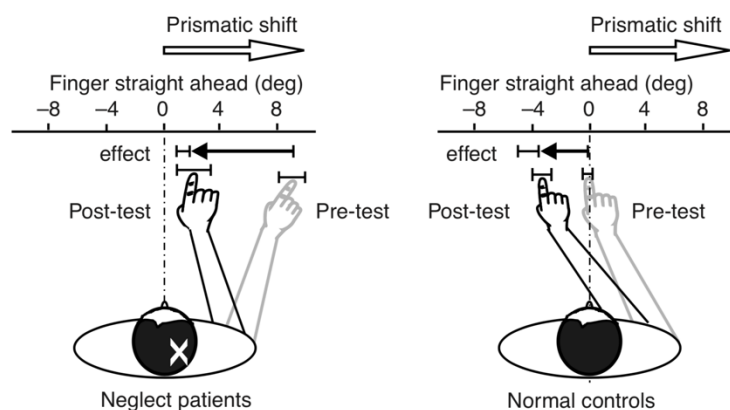


Figure 21 D'après Rossetti et al. 1998 (46), les patients négligents répondent plus à l'adaptation que les témoins (flèches noires).

Il existe trois techniques d'évaluation quantitatives et spécifiques des effets consécutifs (71), afin d'objectiver une différence entre pré-adaptation et post-adaptation. Ils permettent de différencier la part visuelle de la part proprioceptive de l'effet consécutif et sont complémentaires des tests papier-crayon :

- *La mesure du Droit Devant Manuel ou Proprioceptif* (« Subjective Straight Ahead » manuel = SSA-m) (46) : il mesure la composante proprioceptive uniquement. Pour le Droit Devant Manuel le sujet devra réaliser une série de 10 pointages avec sa main droite dirigée, dans l'obscurité, en direction de son « droit-devant ». Il permet de mettre en évidence l'alignement du référentiel égocentrique. C'est le test le plus facilement réalisable et c'est sur ce test que l'effet des prismes est le plus important (71). C'est celui qui présente la plus grande corrélation avec l'amélioration des patients (74) et il est le mieux corrélé au test des cloches. Les patients hémipariétaux dévient deux fois plus vers la gauche que les sujets sains après adaptation prismatique (*cf fig. 21*). Rode et al. en 2014, (71) recommandent l'utilisation de ce test pour quantifier le phénomène d'adaptation prismatique mais également pour le suivi de la référence égocentrique des patients (donc de leur négligence spatiale en général).

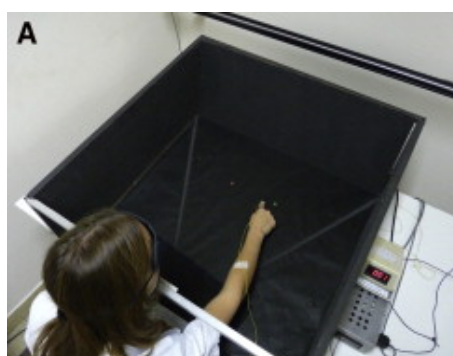


Figure 22 La mesure du Droit Devant Manuel selon Rode et al. 2015 (71)

- *La mesure du Droit Devant Visuel ou Visuo-proprioceptif* (« Subjective Straight Ahead » visuel = SSA-v) : il mesure la composante visuelle uniquement. Pour le Droit Devant Visuel, le sujet doit stopper le déplacement latéral dans le noir, d'une cible visuelle (10 essais) lorsque celle-ci est perçue en position « droit-devant ».

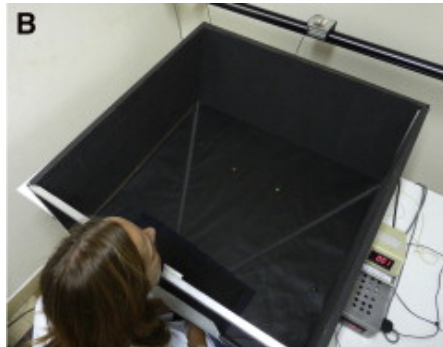


Figure 23 *La mesure du Droit Devant Visuel selon Rode et al. 2015 (71)*

- *La mesure de la Précision du Pointage sans Rétroaction Visuelle en Boucle Ouverte* (« Visual Open-Loop pointing » = VOL) (75) : pour la mesure du pointage sans rétroaction visuelle, le sujet doit réaliser une série de 10 pointages avec sa main droite en direction d'une cible visuelle et en l'absence de vision de sa main. Le but étant de tester le réalignement visuo-proprioceptif en s'affranchissant de la part de compensation par rétrocontrôle visuel du membre supérieur. Pour cela, on peut utiliser un cache fixe qui permet de masquer la partie proximale du mouvement du point de vue du sujet, en ne laissant entrevoir que la cible (*cf fig. 20*). On peut sinon utiliser l'alternance entre yeux ouverts avec visualisation de la cible sans pointage et yeux fermés avec pointage. Rode et al. (2014) (71) décrit l'additivité des effets visuels et proprioceptifs de l'adaptation : $VOL = SSA-m + SSA-v$; ce qui signifie que l'alignement visuo-proprioceptif, correspond à la somme des mesures de droit-devant proprioceptif et droit-devant visuel.

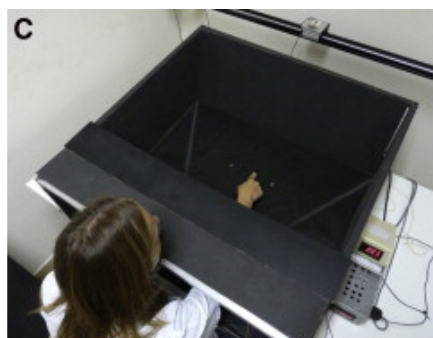


Figure 24 *La mesure de la Précision du Pointage sans Rétroaction Visuelle selon Rode et al. 2015 (71)*

Différentes études suggèrent que réorienter le comportement moteur d'un côté, entraîne également une amélioration de la prise de conscience des informations situées du même côté. Le travail dans un secteur précis peut améliorer un autre secteur la négligence. C'est ce qu'on appelle la « généralisation ».

La notion de « transfert » évoque la capacité à transférer la capacité d'adaptation suite à l'exposition aux prismes, d'une main exposée, à la main controlatérale par exemple, ou d'une tâche de pointage habituelle, à d'autres tâches motrices. Le pointage est majoritairement utilisé dans les études sur l'adaptation prismatique par commodité mais des travaux en cours s'intéressent à d'autres types de mouvement comme le lancer de fléchettes lors de l'exposition aux prismes. Les premiers résultats montrent un transfert des compétences entre pointage classique et lancer d'objets. Cependant, le transfert de compétence ne s'effectuait que dans un sens chez des sujets peu expérimentés au lancer, du pointage vers le lancer uniquement. Par contre, avec des experts en lancer de fléchettes, le transfert de compétence a bien lieu du lancer vers le pointage. Le transfert de compétence dépendrait donc du degré d'expertise à cette tâche. La multiplication des tâches est donc une piste pour améliorer l'adaptation et la généralisation.

Ces résultats sont à mettre en balance avec certaines études négatives, comme celle de Martin et al 1996 (76), qui montrait que l'adaptation était spécifique à la fois aux parties du corps entraînées et au type de lancer entraîné. Baraduc et al. (77) ne montrait pas d'amélioration si la posture durant le test n'était pas exactement la même que durant la procédure d'exposition.

L'expansion représente le fait que les effets de l'adaptation prismatique s'étendent depuis un niveau sensori-moteur jusqu'à d'autres niveaux plus cognitifs (78)(79)(80)(81) ou pour de modalités sensorielles différentes (82) : lecture (83), copie de dessin (46), représentation mentale (test de la carte de France (84)), bissection de nombre (85), droit devant auditif... L'adaptation prismatique affecte de nombreux niveaux de symptomatologie de la négligence, suggérant que ses effets s'étendent en quelque sorte aux systèmes sensoriels, moteurs et cognitifs non exposés (86). L'expansion de l'effet de l'adaptation prismatique a même été objectivée jusqu'au domaine des activités de vie quotidienne (69) (58). Certains auteurs (87), (88) décrivent même une expansion de l'effet d'adaptation prismatique à d'autres domaines sans rapport avec la négligence spatiale unilatérale comme les douleurs du syndrome douloureux régional complexe du membre supérieur.

De manière générale, l'effet positif constaté, tant pour les fonctions sensorimotrices (recalibrage du référentiel égocentrique objectivé sur l'épreuve du droit devant manuel) que pour les fonctions spatiales plus cognitives (lecture, écriture, exploration visuelle, etc...), suggère qu'elles dépendent d'un niveau commun de représentation spatiale lié à une intégration multi-sensorielle.

Efficacité

La première étude suggérant que l'adaptation prismatique peut aider les sujets négligents (46) faisait état d'une efficacité de deux heures suivant la procédure d'exposition. Plusieurs études expérimentales et observationnelles ont rapporté des effets bénéfiques dans les mesures classiques de la négligence (75) (89) (90) ainsi que des symptômes plus spécifiques, tels que des biais dans l'exploration visuelle (91) (92), la recherche visuelle (93), l'imagerie mentale (84) ou le déséquilibre postural (82).

Cependant, les premiers rapports négatifs (94) (95) montraient une inefficacité de la technique mais pouvant s'expliquer par un nombre de pointage insuffisant pour consolider l'adaptation. Il est encore difficile de prévoir l'efficacité en fonction de la localisation de l'atteinte cérébrale mais il a au moins été noté que plus la lésion est occipitale, moins les prismes fonctionnent (72). Selon Sarri en 2008 (74), l'absence d'amélioration peut potentiellement être liée à des lésions corticales dans le sillon intra pariétal droit et à des lésions de la matière blanche dans le lobe pariétal inférieur et le gyrus frontal moyen. Les imageries cérébrales fonctionnelles montrent que la diminution de la négligence après adaptation prismatique est corrélée à une augmentation du débit cérébral du thalamus gauche, du cervelet droit ainsi que du cortex occipito-temporal gauche. Ces résultats sont en faveur de la mise en jeu, après adaptation prismatique, d'un réseau cérébello-cortical, susceptible de rendre compte des effets cognitifs observés.

Des études menées auprès de participants sains (96) et de patients négligents (75) ont montré que l'adaptation prismatique répétée peut entraîner un maintien prolongé des effets d'adaptation parfois même au-delà de cinq semaines après la fin du programme de traitement ; 10 à 20 séances semble le chiffre optimal avec une fréquence variant de 2/semaine à 2/jour. Cependant, on ne sait toujours pas s'il y a un effet cumulatif de l'adaptation prismatique répétitive ou si l'effet est maximal après une ou quelques séances et maintenu pendant les répétitions (59).

Comme pour les autres techniques de rééducation de la négligence, l'efficacité en vie quotidienne reste globalement à prouver.

Un autre aspect concerne la sélection des patients. Il semblerait qu'une meilleure sélection des patients permettrait une meilleure réponse aux prismes.

Tout d'abord, l'aspect aiguë ou chronique de la lésion. Certaines études (97) suggèrent qu'il n'est pas indispensable de mettre en place la technique de façon précoce. L'adaptation peut être plus rapide mais il n'y a pas de supériorité fonctionnelle à moyen et long terme (59). Certains relatent une efficacité même après 9 mois voire plusieurs années post AVC (98).

Par ailleurs, certains suggèrent que des patients avec atteinte de la composante visuo-motrice ou de la motricité ciblée répondent mieux qu'en cas d'atteinte purement perceptuelle (99) (100).

Sarri (74) propose de plutôt sélectionner les patients qui dévient beaucoup au Droit Devant Manuel (SSA-m) car ils répondent mieux aux prismes.

Selon Serino et al. (72), l'adaptation serait proportionnelle à la modification des erreurs du patient, plus qu'à l'amplitude des effets consécutifs.

Il est possible qu'il soit plus efficace de privilégier les patients au cervelet intègre qui conservent donc la capacité de réalignement sensorimoteur (la composante de compensation stratégique étant plutôt de localisation pariétale).

Mizuno et al. en 2011 (58) suggère dans une étude à grand effectif de 440 patients, que la Mesure d'Indépendance Fonctionnelle (MIF) à la sortie de l'hôpital est plus améliorée chez les sujets avec négligence modérée, et n'est pas améliorée chez les patients avec négligence sévère.

Enfin, l'âge élevé pourrait jouer un rôle en défaveur de l'adaptation.

Le point faible de la technique reste la courte durée d'efficacité de celle-ci. Certaines approches novatrices semblent prometteuses et pourraient même permettre une optimisation de l'efficacité de l'adaptation prismatique si elles y étaient associées : Stimulation sensorielle, t-DCS et r-TMS, réalité virtuelle, adjonction médicamenteuse, etc. (101). Les effets positifs de ces associations correspondraient alors à un effet cumulatif des effets consécutifs.

Synthèse

La négligence spatiale unilatérale est un trouble neuropsychologique fréquent (environ 30 à 50% des AVC), grave et envahissant qui pèjore le pronostic fonctionnel des patients victimes d'AVC. Le niveau de preuve des nombreuses approches thérapeutiques développées au fil du temps pour la rééduquer est plutôt faible et l'adaptation prismatique ou son association avec d'autres techniques fait partie des rares méthodes semblant permettre une diminution efficace et potentiellement durable de ce trouble. L'amélioration des activités de vie journalière avec les prismes ne pourra se faire qu'après avoir sélectionné des patients potentiellement répondeurs.

Chapitre II : Les jeux vidéo sérieux et la réalité virtuelle thérapeutique

Définitions

Grâce aux progrès croissants des technologies de l'information et de la communication, la réalité virtuelle est aujourd'hui de plus en plus présente. « Réalité virtuelle », « réalité augmentée », « jeux vidéo », « serious game », « physiogame », sont des termes bien souvent confondus alors qu'ils ne renvoient pas au même concept.

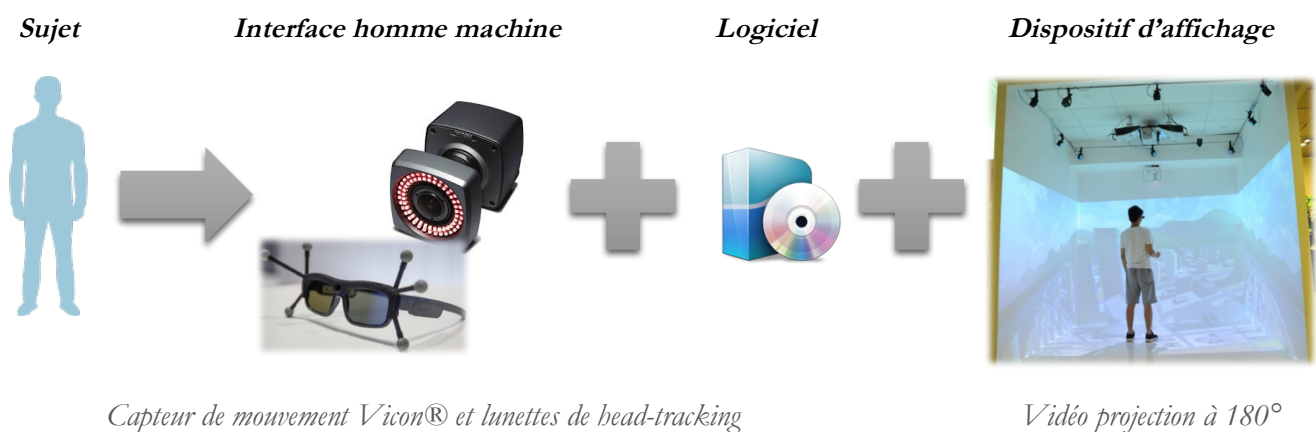
La réalité virtuelle

Selon Fuchs en 1996 (102), la réalité virtuelle est une « simulation informatique interactive immersive, visuelle, sonore et/ou haptique, d'environnements réels ou imaginaires ». Son but est de donner la possibilité à une (ou plusieurs) personne de réaliser une activité sensori-motrice dans un monde artificiel (imaginaire, symbolique, ou une simulation de certains aspects du monde réel). Le sujet peut interagir par différents moyens : toucher, vision, mouvements. Elle recrée un environnement (visuel, auditif, haptique) qui simule la réalité à partir d'outils informatiques, au travers d'interfaces adaptées à tous les sens de l'homme (103). Elle provoque chez l'utilisateur une sensation « d'immersion », car les stimulations surviennent en simultanéité, à la même vitesse et dans le même temps, comme dans le monde réel.

Associer les mots « réalité » et « virtuel » peut sembler contradictoire car ils constituent un oxymore. Cela représente bien le défi de la réalité virtuelle, qui est de produire une réalité alternative, tout en immergeant le sujet afin qu'il pense que ce monde virtuel est réel.

Un outil en réalité virtuelle comporte toujours trois éléments indispensables :

- Les interfaces homme-machine ou périphériques de contrôle et de retour sensoriel
- Le logiciel ou programme informatique
- Le dispositif d'affichage



Ci-dessus, exemple du système de réalité virtuelle CAVE™, développé à partir de 1992 par la société visbox®, et qui permet une immersion à plus de 180° du sujet via une vidéo-projection sur 3 murs et le sol, d'une représentation virtuelle et en stéréoscopie 3D. Des lunettes stéréoscopiques permettent la vision 3D et permettent également un suivi de la tête du sujet via des capteurs externes pour adapter la vidéo-projection, afin de donner une illusion immersive en trois dimensions au sujet, et la possibilité de se déplacer dans la pièce.

La réalité augmentée

La réalité augmentée est une technologie à part. Celle-ci représente l'ensemble des technologies utilisant un dispositif permettant de superposer une simulation informatique par-dessus le monde réel et d'interagir avec celui-ci.

Par exemple, une démonstration d'application médicale a été réalisée le 5 décembre 2017 et consistait en l'utilisation du casque de réalité augmentée Hololens de Microsoft afin d'optimiser une opération de chirurgie orthopédique avec visualisation en direct par le chirurgien de la reconstruction 3D de la tomodensitométrie du patient.



Figure 25 Application chirurgicale de réalité augmentée

Les jeux vidéo

Un jeu vidéo est un jeu électronique avec interface utilisateur qui permet l'interaction purement ludique avec l'humain en générant un retour visuel sur un dispositif vidéo. Le joueur dispose de dispositifs (appelés périphériques) pour agir dans le jeu et ressentir les conséquences de ses actions sur un environnement virtuel. Les jeux vidéo classiques peuvent être non immersifs, semi-immersifs, ou immersifs.

Les « Serious Games » ou « Jeux vidéo sérieux »

Ils sont définis comme des applications informatiques utilisées dans un but autre que le divertissement. Ils utilisent les caractéristiques ludiques du jeu tout en se concentrant sur un objectif principal d'apprentissage ou d'entraînement, avec l'idée d'appliquer les leçons apprises dans des environnements de travail proches de la vraie vie. A la différence de la réalité virtuelle, qui se veut la plus immersive possible, les jeux vidéo sérieux peuvent être immersifs, semi-immersifs, ou non immersif (en deux dimensions).

Il existe de nombreuses catégories de serious game, correspondant aux divers domaines d'application (publicité, éducation, informatif, formation professionnelle, santé...)

L'immersion, la présence et la localisation du soi en réalité virtuelle

L'« immersion » est l'état psychologique dans lequel, via la réalité virtuelle, le sujet cesse de se rendre compte de son état physique et ne prête plus attention à son environnement réel. Le temps peut alors sembler distordu et il a l'impression de vivre une expérience à l'intérieur de l'environnement réel alors que son corps se situe physiquement ailleurs. Ce dernier point est ce que l'on appelle le sentiment de « présence » (104).

Le degré d'immersion dépend à la fois du nombre de fonctions sensorielles stimulées (visuelle, auditive, haptique, olfactive...), de leurs qualités respectives (ex : graphismes 3D crédibles, haute définition, temps de latence bas, sons surround...), de la concordance des sensations avec celles auxquelles le sujet est habitué, de la synchronisation des différents sens entre eux (par exemple la vue et le toucher) et enfin de la sensation de plaisir procurée au patient. De ce degré d'immersion, va dépendre l'adhérence du sujet.

Pour créer l'immersion la plus complète, il faut duper les cinq sens principaux en percevant l'environnement numérique comme réel :

- *La vue*, grâce à des affichages 3D panoramiques de haute résolution, réactifs aux mouvements de la tête et des yeux.
- *L'audition*, grâce à du son surround immersif qui s'adapte au mouvement de la tête.
- *Le toucher*, grâce aux périphériques à retour de force dits « haptiques ».

- L'*olfaction*, grâce à l'ajout de périphériques au niveau du nez.
- Le *goût*, grâce à des périphériques expérimentaux qui ont recours à la simulation thermique.
- Mais aussi *l'équilibration* et la proprioception lorsque les mouvements réels sont transposés virtuellement grâce à l'utilisation de centrales inertielles et à la reconnaissance de mouvements.

Dans les jeux ou simulation informatiques en deux dimensions, le joueur est confronté à un conflit visuo-proprioceptif et cela altère grandement l'immersion. Dans l'exemple ci-dessous (*cf. fig 26*), le sujet a deux représentations de son membre supérieur, un réel et un virtuel. Même si les mouvements réels et virtuels sont parfaitement synchronisés, il existe deux représentations du soi pour le sujet : le « soi » réel dit « proprioceptif » et le soi « virtuel », qui ne peut être que visuel. Nous pouvons donc nous demander s'il s'agit bel et bien d'un système de réalité virtuelle, en ce sens, qu'il n'est pas si immersif. La terminologie de « réalité virtuelle semi-immersive » ou de manière plus générale, de « serious game » ou « jeux vidéo sérieux » semble plus adaptée.



Figure 26 Systeme Gloveha® de rééducation du membre supérieur

Les 3 composantes de la réalité virtuelle

Que ce soit avec des jeux vidéo sérieux peu immersifs, des jeux vidéo classiques, ou avec un dispositif de réalité virtuelle immersive, il existe toujours trois composantes indispensables afin de garantir une interaction entre l'homme et la machine. Cette interaction est bidirectionnelle : l'action du sujet vers la machine, puis la rétroaction de la machine vers le sujet (ou « feedback »).

Les interfaces homme-machine (ou « effecteurs »)

Il s'agit de périphériques de contrôle et/ou de retour sensitif. Ils permettent l'interaction sensori-motrice directe avec le programme informatique car l'utilisateur doit être en mesure d'interagir avec l'environnement virtuel de façon naturelle et intuitive. Ils sont utilisés pour l'action du sujet dans son environnement numérique, mais parfois également pour la rétroaction sensitive haptique qui peut simuler le ressenti tactile (par vibration) et la perception kinesthésique (par retour de force). Il s'agit soit de contrôleurs directement manipulés par le sujet, soit de dispositifs de capture externe du mouvement. Ils sont issus du grand public ou sont spécifiquement conçus à des fins professionnelles. Voici ci-dessous quelques exemples selon la technologie utilisée.

Les contrôleurs grand public :



Figure 27 Souris

Figure 28 Tablette graphique

Figure 29 Manette

Figure 30 Le Wii Nunchuck comprend une centrale inertielle

Figure 31 Capteur de pression Wii Balance board

Les contrôleurs spécifiques de rééducation :



Figure 32 Pablo de Tyromotion dispose d'une centrale inertielle pour capter le mouvement



Figure 33 Le Zimmerman VPL DataGlove est un gant de donnée. Il permet l'action dans le jeu et le retour de force pour donner l'illusion du toucher d'un objet attrapé.

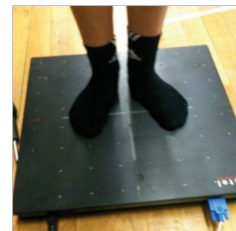


Figure 34 Plateforme de stabilométrie Satel

Les dispositifs de capture externe du mouvement :

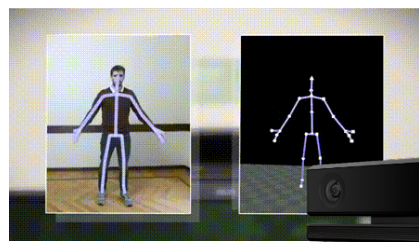


Figure 35 La Kinect 2.0 de Microsoft est très utilisée dans la recherche car son prix est très abordable et permet la capture des mouvements des segments de membre.



Figure 36 Le Leapmotion permet la capture des mouvements des mains et des doigts.



Figure 37 Camera Vicon[®] pour la capture professionnelle de mouvement.

Les exosquelettes ou les effecteurs distaux :



Figure 38 Exosquelette Armeo Power®



Figure 39 Manipulandum à effecteur distal ReaPlan®

Les interfaces cerveau-machine :



Figure 40 Des interfaces contrôles par le cerveau (BCI) répondant à l'activité neuronale ont commencé à apparaître.

Les logiciels

Il s'agit du programme informatique qui constitue la partie logicielle du dispositif. Il permet la création du monde virtuel exposé au sujet.

En rééducation, il peut être issu du grand public mais plus spécifiquement conçu dans un but rééducatif par une équipe de programmeurs spécialisés.

Il peut être spécifiquement auto-adaptatif, c'est-à-dire qu'il pourra automatiquement adapter la difficulté ou les amplitudes de mouvement requis en fonction du déficit et du score capté pour chaque patient (105). Une interface de pilotage peut parfois permettre au thérapeute d'adapter en direct les caractéristiques du jeu selon les besoins du patient (106), il peut permettre des modes multi-joueurs ou une utilisation au domicile via une plateforme web.

Il permet le suivi des performances du patient et la récupération de données à des fins de recherches. Le plus souvent, il incitera le mouvement et retransmettra le feedback visuel. La diversité des exercices et le caractère ludique sont censés augmenter la motivation et l'adhésion du patient et éviter l'effet d'apprentissage.



Figure 41 Hammer and Planks de NaturalPads



Figure 42 Voracy Fish de Genious

Le dispositif d'affichage

Différents types d'affichage permettent des degrés divers d'immersion dans les mondes virtuels. Du moins, au plus immersif, nous avons :

- *Les moniteurs bidimensionnels (écrans d'ordinateurs, TV) sont peu immersifs, de par leur caractère déporté par rapport à la position de l'utilisateur et, de par leurs deux seules dimensions.*



Figure 43 Le jeu « Hammer & Planks » de NaturalPad utilise un écran 2D.

- Les moniteurs bidimensionnels de grande taille permettent d'englober un plus grand champ de vision de l'utilisateur.



Figure 44 Le projet REACTIVE utilisait une vidéo projection de grande taille pour réduire les fonctions exécutives.



Figure 45 Le système Grail de MOTEK est une solution utilisant la réalité virtuelle, dédiée à l'analyse de la marche et à l'entraînement dans des conditions écologiques ou difficiles.

- Les moniteurs tridimensionnels utilisent un affichage en 3 dimensions pour augmenter l'immersion. Ils nécessitent l'utilisation de lunettes spéciales pour une vision stéréoscopique.



Figure 46 Le système RehAtt utilise une diffusion 3D sur un moniteur, associé à un stylo robotisé.



Figure 47 Lunettes de stéréoscopie

- Les salles d'immersion ou « Cave® » sont des salles avec vidéo projection adaptative aux déplacements, à plus de 180°. L'utilisateur voit une image en relief grâce à l'utilisation de lunettes stéréoscopiques. Elle permet le déplacement du sujet dans la pièce. Sa principale limite est son coût, ainsi que la place nécessaire à son installation.

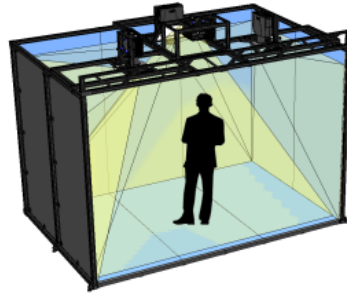


Figure 48 CAVE Systems de visbox

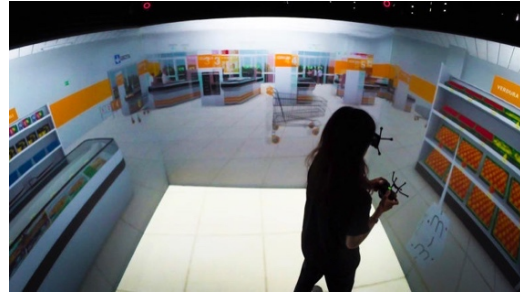


Figure 49 CAVE, utilisé à des fins de rééducation par l'Istituto Auxologico Italiano de Milan, Italie.

- Les visiocasques stéréoscopiques ou « head-mounted display » (HMD) sont des dispositifs portés sur le crâne, compacts, qui disposent d'un écran distinct pour chaque œil (permettant une vision stéréoscopique), de lentilles de Fresnel avancées au plus proche de l'œil (afin de garantir la mise au point, et un grand champ de vision) et pour les plus avancés d'entre eux, de centrales inertielles (permettant de faire correspondre l'affichage aux mouvements de la tête du sujet). La plupart intègrent également un casque audio pour le retour auditif. Les visiocasques d'ancienne génération avaient une très faible résolution, un temps de latence élevé pouvant être responsable de cinétoses, et l'interaction avec le programme était limitée. La sensation d'immersion était faible.

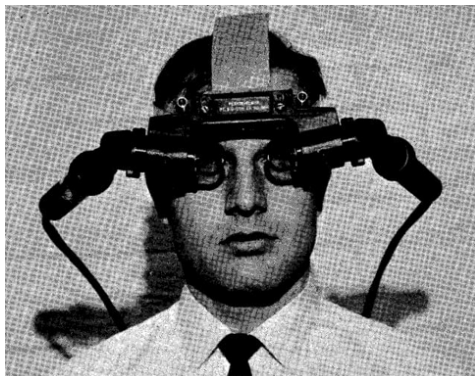


Figure 50 Les premiers HMD datent des années 1960. Ils étaient utilisés à des fins militaires de simulation. Les mouvements de la tête n'étaient pas coordonnés.



Figure 51 SEGA VR, 1991, utilisé pour le jeu.

La réalité virtuelle moderne par casques immersifs

Une plus grande immersion

Jusqu'alors, peu de modalités sensorielles étaient stimulées. Les casques de réalité virtuelle modernes ont commencé à apparaître dans les années 2010. En 2013, la société Oculus VR sort la version développeur de ce qui sera le premier casque de réalité virtuelle avancé.



Figure 52 Oculus Rift Development Kit 1 (DK1)

Il faudra attendre 2016 pour les versions commerciales.



Figure 53 Oculus Rift version commerciale 2016



Figure 54 HTC Vive version commerciale 2016

Ils sont quasi tout-en-un puisqu'ils comprennent, à la fois le dispositif d'affichage, mais aussi les interfaces homme-machine que sont les capteurs de mouvement. Certains des derniers casques peuvent également intégrer la partie logicielle et un micro-ordinateur et sont entièrement sans fil (Oculus Quest). Ces casques ont la particularité d'intégrer de multiples dispositifs internes permettant de créer une grande sensation d'immersion à l'utilisateur :

- *Vision* : ils intègrent un visiocasque stéréoscopique permettant la vision 3D à travers des lentilles adaptables à l'écart pupillaire du sujet. La définition des écrans et le champ de vision est plus grand que dans les visiocasques historiques.

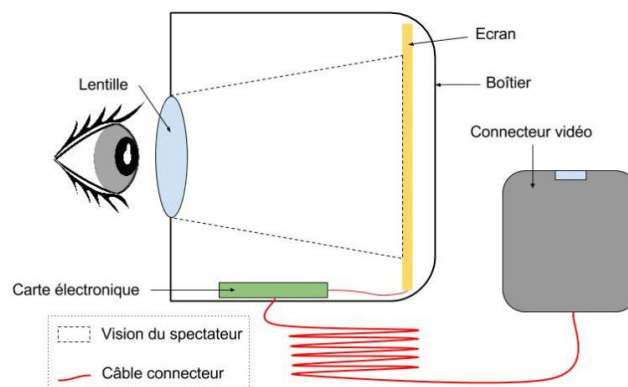


Figure 55 Principe de fonctionnement simplifié d'un HMD.

- *Audition* : un casque intégré permet de transmettre un son spatialisé binaural.
- *Mouvements* : ils comprennent des capteurs de position de la tête, des membres, du corps par des centrales inertielles qui permettent le « motion tracking ». Le « Full body-tracking » est la technique permettant de capter les mouvements des 4 membres via l'utilisation de trackers dédiés. Le tracking des mains et des doigts peut se faire via un capteur externe ajouté sur le casque (LeapMotion), par des caméras internes au casque ou via des contrôleurs spéciaux. Certains casques intègrent un dispositif de suivi du mouvement des yeux (eye-tracking), permettant de nouvelles possibilités d'interactions.

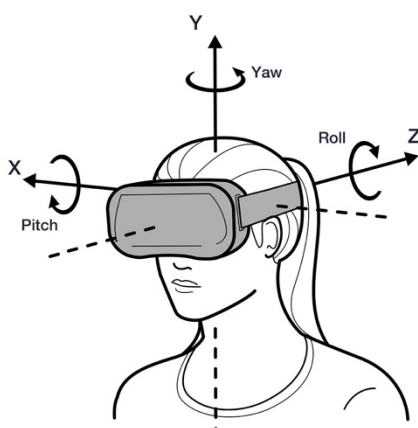


Figure 56 La centrale inertielle intégrée comprend un accéléromètre, un gyroscope et un magnétomètre pour le suivi des mouvements du casque.



Figure 57 A gauche : Le VIVE tracker permettant le tracking des segments de membres ou d'accessoires. A droite, le contrôleur Valve Index permet également le tracking des doigts.

- *Proprioception* : Des dispositifs haptiques intégrés aux contrôleurs émettent des vibrations pour simuler le retour sensitif au contact des objets virtuels. Plus spécifiquement, il existe des gants de données (datagloves) permettant une simulation de ressentis tactiles de plusieurs textures différentes.



Figure 58 Gloveone de NeuroDigital

- *Déplacements* : Les déplacements du sujet dans son environnement réel sont captés pour être retranscrits virtuellement. C'est ce que l'on appelle le « tracking room-scale ». Les technologies permettant ce suivi du sujet dans la pièce se font soit grâce à des capteurs aux extrémités de la pièce, à l'intérieur du casque, ou bien via des plateformes ou tapis multidirectionnels (« treadmills »).



Figure 59 Suivi Roomscale capté par des caméras tout autour du casque (Oculus Insight).

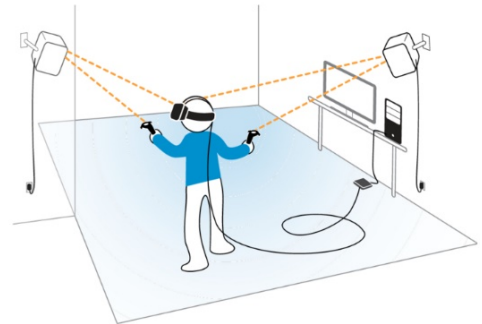


Figure 60 Suivi Roomscale capté par des balises infrarouges externes (HTC Vive Lighthouse).



Figure 61 Les plateformes ou tapis multidirectionnels (« treadmills ») permettent un déplacement infini.

- *Olfaction et goût* : Des dispositifs (expérimentaux) permettent de stimuler l'olfaction par des capsules d'odeurs, et stimuler le goût via des électrodes linguales.

Les effets indésirables

La réalité virtuelle n'est pas exempte de désagréments voire d'effets indésirables (107). Ils sont dans l'immense majorité des cas réversible à l'arrêt de l'utilisation du dispositif. Une sollicitation multi sensorielle mal adaptée peut être source de conflits sensoriels.

La fatigue visuelle, (108) a été rapportée dès 1993, du fait de la vision binoculaire. Depuis, les technologies ont évolué et les casques permettent le réglage précis de l'écart pupillaire pour ajuster l'écartement des lentilles afin que la pupille se trouve exactement au centre de la lentille de Fresnel et ne provoque pas de distorsions visuelles. La sécheresse oculaire peut survenir en cas d'utilisation prolongée.

Le « *motion sickness* » ou « *cybersickness* », plus couramment appelé « *mal de la réalité virtuelle* », est une cinétose (tout comme le mal des transports) et correspond à un état de mal-être de l'utilisateur, par conflit entre les trois différents référentiels de l'équilibre : la vision d'une part, l'équilibriception (système vestibulaire) et la proprioception d'autre part. Le sujet perçoit le très léger décalage entre stimuli visuels (virtuels) et ce qu'il ressent par proprioception et par le système vestibulaire. Cela peut entraîner une sensation d'inconfort, apathie, somnolence, migraine, désorientation, fatigue, pâleur, transpiration, salivation excessive, nausées, vomissements, déséquilibre. Ce phénomène est souvent dû à un temps de latence trop élevé entre l'action du sujet, et le feedback visuel retransmis. Les technologies qui permettent le déplacement synchronisé du sujet dans la pièce et dans le monde virtuel empêchent la survenue de ce symptôme. La cinétose peut également apparaître lorsque le sujet se déplace à moyenne ou haute vitesse dans le jeu, alors qu'il est immobile dans le réel. Les constructeurs ont recours à deux techniques pour réduire ce phénomène : les déplacements virtuels par téléportation plutôt qu'un déplacement linéaire par glissement, et le floutage de la vision périphérique lors des déplacements à haute vitesse. D'autres techniques comme la stimulation vestibulaire concomitante et l'adjonction d'un nez virtuel ont permis d'améliorer le motion-sickness, mais c'est surtout l'évolution des technologies et le raccourcissement du temps de latence qui a permis l'éradication de ce phénomène.

L'isolement social : Comme pour l'utilisation exagérée d'internet ou des jeux vidéo, la réalité virtuelle peut conduire les sujets vulnérables à l'isolement social, certains pouvant préférer les expériences vécues dans le monde virtuel à celles que leur propose la réalité de leur vie.

Les contre-indications

Il n'existe pas à ce jour de contre-indication formelle. Cependant, certaines conditions sont à prendre en compte. L'utilisation de casque de réalité virtuelle est souvent déconseillée aux enfants, qui peuvent avoir du mal à différencier la réalité du virtuel. Selon Cartwright (1994), le même raisonnement est à appliquer pour les patients atteints de troubles psychiatriques, notamment les patients schizophrènes (109).

La tolérance chez des patients avec troubles cognitifs majeurs ou des troubles neurologiques n'a, par ailleurs, jamais été étudiée.

Les constructeurs de casques de réalité virtuelle recommandent généralement aux personnes sujettes à l'épilepsie (notamment photosensibles) d'éviter d'utiliser leurs équipements.

Les Serious Games en santé et en rééducation

Dans le domaine médical, les serious games sont identifiés sous une catégorie appelée "game for health" (jeux pour la santé) ou « Healthgame » (110).

Ils ont plusieurs buts, selon le public visé, que ce soit les patients ou les professionnels de santé (111):

- Sensibiliser la population à un sujet important, dédramatiser la maladie.
- Favoriser le bien-être du patient, lutte contre la douleur.
- Préparer en amont le patient aux examens médicaux qu'il pourrait subir.
- Faire de l'éducation thérapeutique.
- Former le personnel soignant (112).
- Apporter une aide per opératoire.
- Rééduquer.

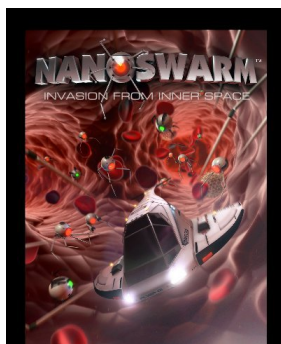


Figure 62 Nanoswarm: Invasion from Inner Space, un serious game sensibilisant aux problèmes d'obésité.



Figure 63 VR-CPR : un outil de simulation en VR immersive à la réanimation cardiopulmonaire à destination des professionnels de santé

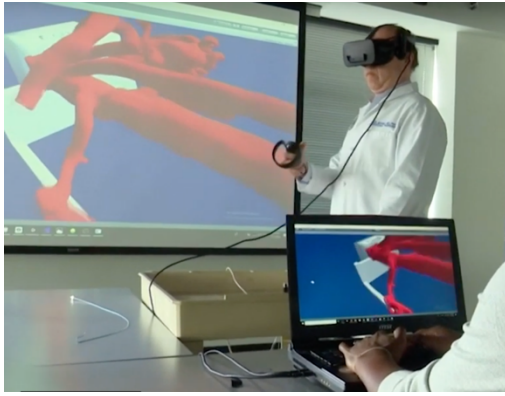


Figure 64 Système per opératoire de visualisation endovasculaire pour le cathétérisme, développé par l'université de Washington 2019.



Figure 65 Réduction de la douleur et de l'anxiété chez les patients en soins palliatifs du "Royal Trinity Hospice". Les patients accèdent virtuellement aux expériences qu'ils rêvaient de faire avant de mourir.

C'est depuis les années 2000, que l'utilisation des serious-game dans un but rééducatif commence. Certaines activités comme la rééducation de la préhension, de la posture et de la marche, les activités perceptivo-motrices, la rééducation cognitive, l'apprentissage des transferts, la conduite du fauteuil roulant électrique, certaines activités de vie quotidienne, deviennent possible grâce à cette technologie (113). Une part importante de la neuroéducation repose sur l'hypothèse que les patients ont la capacité de s'améliorer en pratiquant dans un environnement proche de l'environnement familial.

L'introduction d'une interface informatisée a plusieurs avantages en rééducation (114) :

- Elle fournit une rétroaction immédiate par différentes modalités sensorielles. Le signal feedback permet de mieux encadrer la réponse motrice.
- La mesure de l'activité et de ses paramètres permet de quantifier et enregistrer les progrès du patient ; les lui présenter permet d'améliorer l'adhérence. Le recueil de données facilite également les travaux de recherche clinique.
- Apprentissage par mouvements répétés. Les exercices répétés sont mieux vécus par le patient grâce à l'aspect ludique et à la diversité des exercices, donc l'adhérence au programme de rééducation est améliorée. Par ce biais, on évite également l'effet d'apprentissage.
- Certaines situations ne sont pas reproductibles facilement chez le thérapeute. Par exemple, on peut simuler des activités de vie quotidienne, et ce de manière sécurisée.
- Permet d'augmenter le temps rééducatif, avec le même nombre de rééducateurs et parfois l'usage en dehors des institutions (113).
- Le caractère auto-adaptatif (105) aux difficultés du patient permet de proposer un exercice pas trop difficile, mais qui stimule au maximum la fonction que l'on veut rééduquer.

- La modulation du mouvement : Il est possible de majorer ou simuler les mouvements réalisés pour favoriser la récupération (comme dans la thérapie miroir par exemple) ou inversement de minorer les mouvements réalisés pour pousser le patient à en faire plus, ou pour lutter contre une sous-utilisation de membre.

La rééducation des phobies

Certains programmes utilisent la thérapie cognitivo-comportementale pour lutter contre les phobies. Ils permettent une immersion progressive dans des situations difficiles à reproduire dans le monde réel (peur du vide, agoraphobie, arachnophobie, aviophobie...).



Figure 66 Lutte contre l'aviophobie en réalité virtuelle

La rééducation vestibulaire

La rééducation des troubles vestibulaires est idéale en réalité virtuelle immersive, car elle permet de bilancer et réduire les problématiques de verticale subjective, utiliser les stimulations optocinetiques, le Rod & Frame Test, traiter le mal des transports (cinétoses), le syndrome du défilement, Equitest virtuel, l'acuité visuelle dynamique, etc.



Figure 67 Module optocinetique de la solution VIRTUALIS

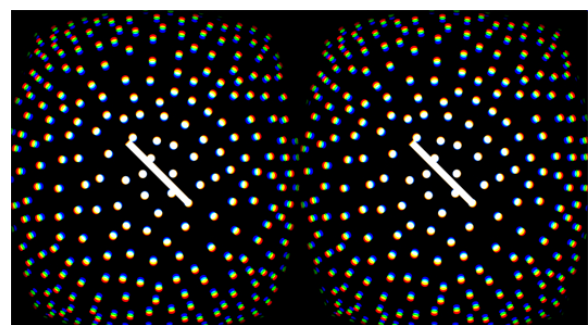


Figure 68 La mesure de la verticale visuelle subjective (VVS) avec la solution de VESTIBULUS

La rééducation posturale, de l'équilibre et de la marche

Certains jeux vidéo ont été détournés de leur usage ludique, au profit de la rééducation posturale. C'est le cas de la Wii Balance Board associée au jeux vidéo Wii Sports, très largement utilisé chez les kinésithérapeutes libéraux et très étudiée dans la littérature scientifique (115). Son faible coût a favorisé son déploiement chez les kinésithérapeutes, mais cet outil grand public a des limites : par exemple, certains exercices nécessitent l'utilisation des deux membres supérieurs et ne sont donc pas adaptés aux patients hémiplegiques (116).



Figure 69 Certaines équipes adaptent même le matériel grand public (balance board) pour l'utilisation en fauteuil roulant (117).

Une méta-analyse récente d'essais contrôlés randomisés (2019) (118), montrait que la réalité virtuelle, lorsqu'elle est combinée à la thérapie conventionnelle, est modérément plus efficace pour améliorer l'équilibre que la thérapie conventionnelle seule en post-AVC.

La rééducation de la marche peut être proposée en réalité virtuelle, moyennant le couplage avec des tapis roulants avec allègement du poids corporel et/ou des orthèses robotisées associées ou non à de l'électrostimulation fonctionnelle. Moreira et al. en 2013 (119), dans une revue systématique de la littérature, démontraient que l'utilisation de la réalité virtuelle favorisait la modification des paramètres de la marche malgré la diversité des protocoles selon les études.

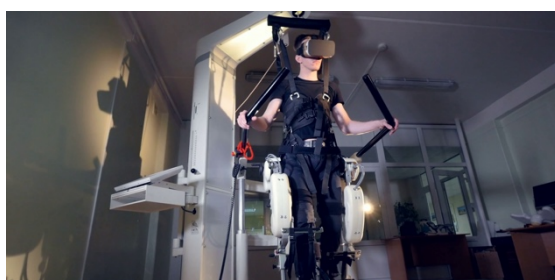


Figure 70 Le jeu sérieux Loko.Sprint de Neuro Rehab VR permet l'immersion lors de l'utilisation de l'exosquelette de marche Lokomat

La lutte contre la douleur

Plusieurs modalités de réalité virtuelle ont été tentées pour réduire différents types de douleur. Les pathologies les plus concernées sont : la fibromyalgie, les céphalées chroniques, les douleurs de membres fantômes, les douleurs neuropathiques, notamment chez le blessé médullaire.

L'hypothèse principale est que l'immersion permet de se distraire des stimuli douloureux et peut diminuer sa perception de la douleur. Cependant, Gupta et al. 2018 (120) montrait, qu'en plus de la distraction, il existe probablement d'autres mécanismes expliquant son efficacité, comme la production de changements neurophysiologiques liés au conditionnement et aux thérapies cognitivo-comportementales d'exposition virtuelle.

L'équipe de Chi et al. a récemment (2019) (121) réalisé une revue systématique de la littérature et montrait que plusieurs techniques différentes étaient efficaces dans le traitement de douleurs neuropathiques chez le blessé médullaire. Certains auteurs utilisaient la marche virtuelle, l'hypnose virtuelle, les illusions virtuelles. Il en ressort que le traitement combiné, marche virtuelle et stimulation par courant continu transcrânien, était le plus efficace.

La thérapie miroir virtuelle a été utilisée dans les douleurs de membres fantômes (122) mais reste trop peu décrite pour le moment. Sato et al. en 2010, (123) dans un travail préliminaire, utilisaient la réalité virtuelle 2D non immersive afin de réduire la douleur d'au moins 50% chez 4 parmi 5 patients atteints du syndrome douloureux régional complexe de type I.



Figure 71 Prototype de miroir virtuel immersif « Shapes and Rhythm »

La rééducation articulaire

Des serious game ont été développés en réalité virtuelle immersive spécifiquement pour mesurer et réduire les amplitudes du rachis cervical et lombaire. Par son côté distrayant et ludique, elle peut permettre aux patients présentant une kinésiophobie de se remettre en mouvement.

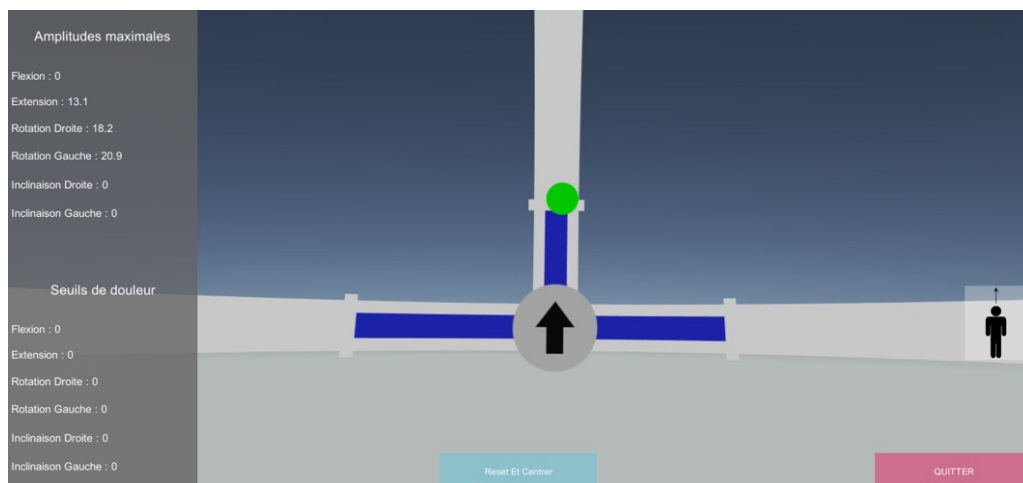


Figure 72 Mesures d'amplitudes du rachis cervical (avec seuil de douleur) en quelques secondes (Virtualis)

La rééducation sensori-motrice ou « physio-gaming »

Les physio-games (ou « exergames ») sont des jeux thérapeutiques qui permettent à leurs utilisateurs d'interagir avec un scénario généré par ordinateur, engageant le système des neurones miroirs et les mécanismes de neuro-plasticité (124). Les systèmes de réalité virtuelle permettent un feedback sensorimoteur puissant. La grande diversité des périphériques de contrôle offre de nombreuses possibilités de combinaisons afin de s'adapter à la fonction à rééduquer. Le développement technologique et la multiplication des dispositifs élargissent considérablement le nombre de solutions disponibles. Ils impliquent l'utilisation d'une fonction motrice pour interagir avec l'environnement virtuel. C'est le mouvement appliqué pour contrôler l'effecteur qui sera à l'origine du bénéfice attendu en rééducation par le mouvement.



Figure 73 Exergame par Mira Rehab utilisant la Kinect 2.0 pour capturer le mouvement du bras du patient.



Figure 74 Jeu de parcours électrique par VIRTUALIS. Le patient doit déplacer le contrôleur avec précision.

La réalité virtuelle ne peut qu'accroître les possibilités d'interaction de l'individu avec son environnement. Les informations sensibles et sensorielles peuvent être adaptées avec une grande créativité pour recréer un grand nombre de situations en un minimum d'espace et de temps, s'adaptant à la fois aux objectifs du plan de soin et au mode de récupération du patient. A titre d'exemple, un programme de récupération classique de la préhension consiste à diriger la main vers une cible fixe et à la saisir, ce qui limite considérablement la diversité des tâches possibles. La réalité virtuelle permet de créer des illusions de situation dans lesquelles la nature et les propriétés de l'objet, sa localisation dans l'espace, la trajectoire à lui imposer au décours de la prise peuvent varier, de façon précise et fiable et dans un intervalle de temps court si cela s'avère souhaitable (125).

La répétition de tâches orientées est l'un des fondements même de la rééducation neurologique après accident vasculaire cérébral (126) (127) (128). Hélas, l'attention et la motivation liées à la répétition de tâches vécues comme ennuyeuses diminuent rapidement. La réalité virtuelle, parce qu'elle s'adapte à l'environnement, à la performance et aux désirs du patient, contribue à préserver la motivation. La tâche est répétitive, mais le patient peut avoir l'illusion qu'elle ne l'est pas car l'environnement et la cible changent.



Figure 75 Le dispositif Diego de Tyromotion, peut utiliser la réalité virtuelle immersive en suspension.

D'autre part, le dispositif de réalité virtuelle n'impose pas, une fois l'installation réalisée, la présence permanente du thérapeute qui peut rester cependant informé de la qualité de la tâche effectuée et de sa progression. Cela ouvre la voie de l'augmentation du temps rééducatif, voir même de la rééducation à domicile (129) (130).

En termes d'efficacité, il est très difficile de conclure tant les technologies sont différentes et progressent rapidement. Les premières études (131) suggéraient que les patients étaient capables d'apprentissage moteur dans un environnement virtuel, que les compétences motrices acquises en

réalité virtuelle étaient transférées dans le monde réel, dans la plupart des cas dans des tâches équivalentes, mais dans quelques cas, généralisées à d'autres tâches non-apprises.

A l'heure actuelle, la preuve que l'utilisation de jeux vidéo commerciaux en réadaptation améliore la fonctionnalité du membre supérieur après un AVC n'est pas faite (132) (133). Cependant, cette approche a le potentiel de fournir facilement et de façon abordable, une thérapie de réadaptation d'AVC dans les milieux où l'accès au traitement est limité par des contraintes géographiques ou financières.

Selon Laffont et al. 2013, (106) les serious games spécifiques de rééducation n'ont pas encore prouvé leurs supériorité par rapport à des jeux grand public, mais cela reflète le caractère encore immature de ces nouvelles technologies.

Selon la revue cochrane « *Virtual reality for stroke rehabilitation* » révisée en 2017 (134), la réalité virtuelle n'était pas supérieure aux approches thérapeutiques conventionnelles pour améliorer la fonction du membre supérieur. Cependant, elle permettrait d'améliorer la fonction du membre supérieur et l'autonomie dans les activités de la vie quotidienne, lorsqu'elle était utilisée en complément des soins classiques en augmentant le temps global de rééducation. Par contre, les preuves étaient insuffisantes pour conclure quant à l'amélioration de la vitesse de marche, de l'équilibre, de la participation ou de la qualité de vie.

La Haute Autorité de Santé, dans son rapport de 2012 (135) sur les méthodes de rééducation de la fonction motrice de l'AVC stipule que : « L'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure sur l'intérêt de la rééducation par réalité virtuelle. Des études doivent être réalisées pour établir et standardiser l'utilisation des dispositifs de réalité virtuelle et les critères d'évaluation ».

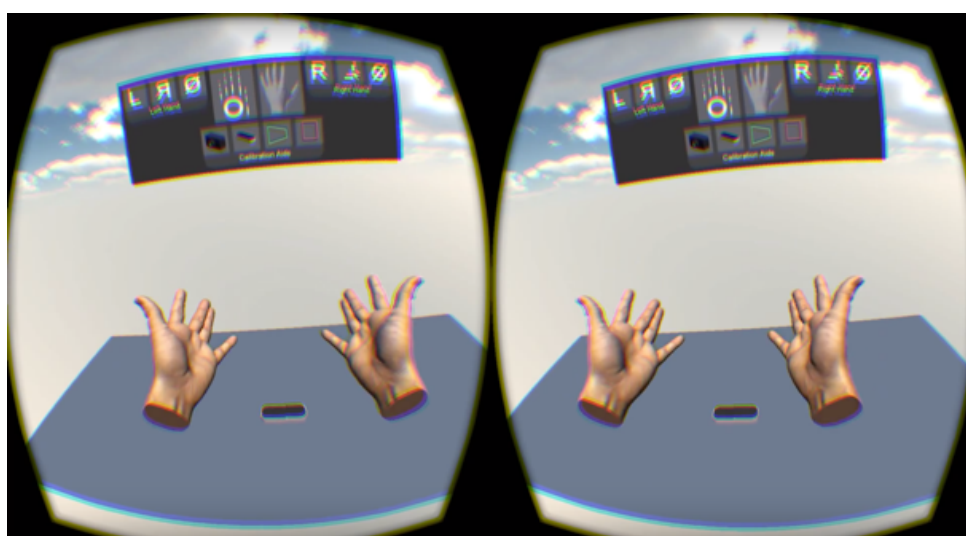


Figure 76 Des auteurs ont validé en 2019 la faisabilité (136) de la thérapie miroir virtuelle immersive dans la récupération motrice après AVC, mais l'efficacité n'a pas encore été étudiée.

La rééducation cognitive

La réalité virtuelle peut être utilisée à la fois pour l'évaluation des fonctions cognitives, mais aussi pour leur rééducation. La dysfonction exécutive, les altérations mnésiques, l'apraxie, les déficits attentionnels, la négligence spatiale unilatérale sont les principaux troubles concernés (137). Elle permet de simuler des situations de vie quotidienne où les déficits cognitifs risquent de décompenser et par là même conduire au développement de stratégies de suppléance (acheter chez un commerçant, préparer un repas, s'orienter, simulateur de conduite...). Elles simulent ces situations dans un environnement particulièrement sécurisé, avec un aspect ludique (138).

Le supermarché virtuel « VAP-S » (Virtual Action Planning-Supermarket) (139) développé par Evelyne Klinger et le CHU de Caen en 2002, était spécifiquement conçu pour évaluer et rééduquer les patients souffrant de déficiences cognitives, avec difficultés dans les activités de vie quotidienne en s'entraînant dans une tâche de courses au supermarché. Il est sensible dans l'identification des troubles des fonctions exécutives et délivre de précieuses informations sur l'impact fonctionnel de troubles neuropsychologiques en vie quotidienne (140). Ce concept a été largement repris par la suite, et notamment avec casque de réalité virtuelle immersive (141).



Figure 77 Le jeu VAP-S d'Evelyne Klinger

Le projet « REACTIVE » (142) de l'institut Hopale de Berck-sur-mer, avait pour objectif de développer un outil de rééducation en réalité virtuelle pour les personnes cérébrolésées et notamment hémipariétales. Plusieurs scénarios paramétrables ont été développés ainsi que des interfaces permettant aux patients d'interagir avec le système. De nombreux scénarios étaient disponibles luttant ainsi contre la lassitude du patient ainsi que l'effet d'apprentissage. Des options permettaient d'adapter le scénario au plus proche des capacités motrices et cognitives du patient, en conservant la reproductibilité des bilans.



Figure 78 Les jeux du projet REACTIVE

Des jeux grand public comme le « Programme d'Entraînement Cérébral du Dr Kawashima » sur Nintendo DS) ont été utilisés notamment dans la sclérose en plaque, afin de rééduquer les fonctions cognitives. Celui-ci propose des exercices faciles à mettre en application qui favorisent la plasticité du thalamus et donc l'apparition ou le renforcement de connexions, ce qui ralentirait le déclin des aptitudes cognitives de certains patients (143).

Synthèse

Les technologies innovantes modernes peuvent être bénéfiques pour nos pratiques de rééducation neurologique. C'est notamment le cas de la réalité virtuelle dans son ensemble depuis les années 2000, et plus particulièrement quand elle est la plus immersive possible. Depuis 2014, la démocratisation des casques de réalité virtuelle (HMD) dans le milieu grand public à des fins de divertissement et de jeu a permis de drastiquement diminuer les coûts des équipements et va faciliter leur utilisation pour la recherche médicale, le diagnostic ou le traitement de certaines maladies. Qu'elle révolutionne pour toujours la façon de jouer dans le domaine grand public ou bien qu'elle soit simplement un effet de mode, elle n'en perdra probablement jamais son intérêt en médecine et plus précisément en rééducation. La réalité virtuelle offre des possibilités qui ne sont pas facilement accessibles dans les laboratoires de recherche en neuropsychologie. Leur force est la possibilité d'une interaction sensorimotrice complète, très diverse et immersive dans un monde virtuel. L'immersion fait qu'il n'existe pas de dissociation des référentiels (spatiaux) virtuels et réels puisqu'ils sont superposés. L'avantage des casques modernes par rapport aux systèmes antérieurs, est leur compacité et le tout-en-un. Il est possible de les utiliser avec des patients avec troubles moteurs et posturaux qui rendent nécessaire l'utilisation du fauteuil roulant ou l'alitement. Les applications en rééducation sont déjà nombreuses mais de nombreuses pistes d'utilisation n'ont pas encore été étudiées telles que la

rééducation haptique des préhensions fines, l'appareil de Bon Saint Côme virtuel, la réadaptation aux activités de vie quotidienne (ex : cuisine thérapeutique), la mise en situation du patient dans un environnement stressant ou dangereux, la thérapie miroir virtuelle à visée motrice, la thérapie par contrainte induite virtuelle (et la lutte contre la non utilisation acquise), le simulateur de conduite virtuel adapté au handicap, la simulation de pilotage de fauteuil roulant électrique, la rééducation virtuelle de la marche simulée avec exosquelette ou stimulations proprioceptives vibratiles, ou encore pour améliorer la thymie des personnes à mobilité très réduite par leurs déficits ou les patients alités.

L'attitude des thérapeutes face à ces nouveaux outils technologiques est encore souvent récalcitrante (107), du fait par exemple de l'intrusion de l'ordinateur dans leur relation avec le patient ou de la crainte d'être remplacés par des ordinateurs. En fait, toutes ces technologies permettront probablement à terme d'optimiser l'efficacité et le temps rééducatif pour les patients, sans augmenter la charge de travail des thérapeutes. La technologie n'est pas une fin en soi et elle ne remplacera jamais l'intervention de l'humain mais peut ouvrir la voie de la rééducation à domicile avec télé-suivi rééducatif personnalisé du patient. Un changement d'attitude vis à vis de ces technologies nécessite une grande motivation qui ne pourra avoir lieu que quand les bénéfices l'emporteront sur le coût nécessaire à son adoption. De nombreux outils technologiques s'appuient sur les avancées scientifiques dans le domaine des neurosciences et notamment de la plasticité cérébrale. A terme, cela devrait modifier considérablement nos stratégies et nos techniques, en rééducation motrice et cognitive.

Chapitre III : Développement d'un outil de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale par adaptation prismatique, en réalité virtuelle immersive

Pourquoi un outil en réalité virtuelle immersive ?

Les limites des prismes classiques

La genèse du projet, vient de notre difficulté à mettre en place des stratégies efficaces de quantification et de rééducation de ce trouble extrêmement complexe qu'est la NSU. La thérapie par adaptation prismatique semble l'option rééducative la plus prometteuse d'après la littérature, mais reste en pratique une des techniques les moins utilisées dans les centres de rééducation du fait de son coût élevé (environ 4000 €), d'un protocole d'exposition exigeant et complexe avec peu de souplesse et d'une faible adhérence des patients à des tâches rébarbatives de pointage. Mais les prismes ont également d'autres inconvénients expérimentaux : ils sont responsables de distorsions visuelles (du champ de vision et des couleurs) pouvant être perçues comme désagréables par le patient. Ils ne sont pas compatibles avec le port de lunettes correctrices. De grandes déviations au-delà de 20° sont impossibles à réaliser avec des prismes classiques (du fait de trop fortes distorsions, du coût, et de l'impossibilité technique de fabrication) alors qu'on sait depuis la publication de plusieurs études comme celle de Michel et Cruz en 2015 (144) que l'effet de l'adaptation prismatique (chez des sujets sains) dépend du degré de déviation. De petites déviations peuvent donc ne pas produire de transfert vers d'autres tâches parce que l'ampleur de l'effet d'adaptation est trop faible pour être significative. Des prismes de différentes déviations en valeur et en latéralités sont réalisables mais cela augmente les coûts à chaque nouvelle paire. Un autre problème majeur avec les prismes classiques, est l'absence de double aveugle possible, car le patient fera rapidement la différence entre le port de lunettes placebo non déviantes et les lunettes prismatiques déviantes. Ce problème est récurrent dans les études en rééducation de manière générale. Il existe donc un besoin manifeste de nouvelles techniques simples, abordables et rentable pour rééduquer la négligence spatiale unilatérale, et qui puisse s'adapter au profil du patient.

L'avantage du virtuel

La réalité virtuelle devrait permettre d'automatiser le processus d'évaluation et de rééducation et ainsi faciliter la mise en place d'un programme rééducatif pour les patients atteints. La capacité de réalisme de la réalité virtuelle permet de simuler des exercices réels à moindre coût, sans risque et de façon plus efficace pour l'apprentissage. Son adaptabilité doit permettre de personnaliser la rééducation à chaque patient en fonction des déficits prédominants. La modulation du degré de déviation devient possible sans besoin de matériel supplémentaire. La déviation virtuelle est illimitée contrairement aux prismes classiques, et se fait sans aucune distorsion. Le casque de réalité virtuelle est compatible avec le port de lunettes correctrices. De plus, elle peut se faire de manière progressive sans que le patient se rende compte de la déviation. La réaction émotionnelle sera moins forte et les effets consécutifs attendus, plus grands (145). S'il le souhaite, l'examineur a la possibilité de ne pas connaître la valeur de la déviation. De ce fait, le double aveugle devient possible et devrait améliorer la qualité méthodologique des études qui seront réalisées grâce à cet outil. Sa disponibilité sera accrue par la nécessité de matériel non spécifique disponible dans le commerce et son relatif faible coût par rapport à l'équipement standard pour rééduquer via des prismes. Cet équipement non spécifique de réalité virtuelle, une fois acheté par les institutions, peut ainsi être utilisé pour d'autres programmes rééducatifs distincts qui utilisent le même matériel. Sa possible utilisation à domicile avec des programmes personnalisés à distance en ferait un outil tourné vers l'avenir, car la rééducation se veut de plus en plus ambulatoire.

Le choix des techniques, du matériel, du partenaire industriel

Concernant la méthode de rééducation, nous avons décidé de nous inspirer de la méthode de l'adaptation prismatique afin de la transposer en thérapie virtuelle.

Les méthodes informatisées d'évaluation virtuelle que nous avons mis au point, sont des transpositions d'épreuves existantes et déjà validées. Il s'agit de la mesure du Droit Devant Manuel, de la mesure du Droit Devant Visuel, de la mesure de la précision du pointage sans rétroaction visuelle et enfin du test des cloches. Les trois premières épreuves sont destinées à quantifier l'héminégligence en mesurant la référence égocentrique des patients, mais aussi à quantifier les effets consécutifs de l'adaptation prismatique. Ils sont donc utiles pour le suivi évolutif des patients négligents qui bénéficieront des prismes classiques ou virtuels. Certains auteurs (74) suggèrent même que les valeurs obtenues à ces épreuves permettraient d'adapter le degré de déviation prismatique à imposer au patient pour une meilleure efficacité.

Le test des cloches est une des épreuves papier-crayon les mieux validées et les plus utilisées en pratique clinique.

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 permet de supporter des jeux en réalité virtuelle. Un contrôleur et un traqueur étaient utilisés, respectivement pour le pointage, et pour le calibrage. Deux émetteurs infrarouges permettaient la capture de mouvement des différents dispositifs dans l'espace à l'échelle de la pièce. Le logiciel a été développé en utilisant Unity (Unity 2019, Unity Technologies, San Francisco, CA, USA).



Figure 79 Le casque HTC Vive utilisé pour la conception du prototype.



*Figure 80 En haut : Le contrôleur Vive
En bas : le pointeur virtuel*

A partir de mars 2017, nous avons commencé à rechercher un partenariat avec plusieurs startups développant des programmes de réalité virtuelle immersive. Nous avons retenu la société VIRTUALIS (3 Avenue de l'Europe, 34830 Clapiers, France) pour développer notre projet de serious game, par facilité géographique mais surtout parce que les membres de son équipe avaient un savoir-faire en production de jeux thérapeutiques pour la rééducation.

La collaboration intersectorielle

Ce travail a été possible grâce à la collaboration entre notre équipe de cliniciens-chercheurs et une entreprise privée comprenant des techniciens spécialisés dans la conception de jeux-vidéo thérapeutiques. Notre but commun était la conception d'un outil spécifique de quantification et de rééducation de la négligence spatiale unilatérale en réalité virtuelle immersive.

Cependant, la finalité des deux parties n'était pas exactement la même. Dans notre cas, nous souhaitons la réalisation effective de cet outil car nous étions en manque de méthodes innovantes et efficaces pour traiter nos patients négligents. Les entreprises privées, via leur secteur recherche et développement, ont à terme, l'obligation d'être rentables financièrement via la vente de leurs solutions et produits.

Au début, nous avons été limités du fait de l'absence de fonds pour financer une prestation de réalisation de programme informatique sur mesure par une entreprise privée. C'est souvent le cas avec les structures hospitalières publiques, ou les délais d'obtention d'un financement sont souvent incompatibles avec l'agenda des entreprises privées qui veulent aboutir rapidement à une solution commercialisable avant leurs concurrents. L'enjeu a donc été de trouver un partenariat où chacun des acteurs pourrait trouver un bénéfice à la conception du logiciel.

A terme, nous pensons que les entreprises privées ont beaucoup à gagner d'un partenariat avec des équipes scientifiques puisqu'elles permettent de s'assurer de l'émergence d'idées d'applications cliniquement pertinentes, et de la validité clinique des outils proposés par des études de bonne qualité. Ces études augmentent également la visibilité par la communauté scientifique. Les cliniciens font également le lien avec les utilisateurs directs, à savoir les patients et les rééducateurs.

D'un autre côté, le développement de jeux vidéo sérieux (ou d'autres nouvelles technologies à visée rééducative), implique de posséder des connaissances en informatique, en programmation, en robotique, en électronique, que bien souvent, seuls des techniciens d'entreprise spécialisée possèdent. La gestion du matériel, sa maintenance et la formation des équipes soignantes à la technologie sont également des missions qui leurs incombent.

A ce jour, peu d'études (146) se sont intéressées aux difficultés de la collaboration intersectorielle. Un des obstacles est l'obtention d'un financement ou bien d'arriver à établir un accord de partenariat de développement conjoint. Une autre difficulté majeure est le manque de structures facilitant les liens directs entre les cliniciens et les techniciens ou entreprises. Par ailleurs, les contraintes de temps ne sont souvent pas les mêmes. Les entreprises peuvent parfois être contraintes de prioriser le développement d'autres applications et mettre en suspens le projet commun, ce qui peut mettre en difficulté les cliniciens. A l'inverse, les validations scientifiques peuvent prendre du temps, alors que la concurrence des entreprises peut être un enjeu majeur dans leur développement. Enfin, la communication des deux acteurs entre eux peut également poser problème. En effet, ils utilisent des

codes de communication spécialisés différents. Cela implique souvent que chacun doit posséder un minimum de connaissances dans le domaine de l'autre.

Dans une époque où les patients sont de plus en plus au cœur de leur prise en charge, il semble crucial de faire participer patients et thérapeutes, à l'élaboration de versions acceptables et conviviales de serious games. Ceux-ci peuvent être cependant complexes à paramétrer et ils requièrent un certain niveau de formation et expertise dans la gestion du système et l'analyse des résultats. Néanmoins, la généralisation de la réalité virtuelle dans le grand public, la diminution du coût total, et l'orientation future vers la création de plateaux techniques spécialisés devraient permettre d'habituer et faciliter nos prises en charge en rééducation grâce aux nouveaux outils technologiques et informatiques.

Développement d'outils de quantification de la négligence en réalité virtuelle immersive

Les outils existants dans la littérature scientifique

Evelyne Klinger en 2006 (107), suggérait que la réalité virtuelle permet de suivre la position du sujet ou de son regard, d'évaluer des facteurs de profondeur et de mouvement et par conséquent de définir de nouvelles stratégies d'évaluation neuropsychologique.

Rose and al., en 2005 (137), ont effectué une revue de la littérature sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans la rééducation après lésion cérébrale. Une brève revue spécifique sur la négligence retrouvait quatre études publiées autour des années 2000 :

- Dès 1996, Rushton et al. (147) relevaient les applications potentielles de la réalité virtuelle pour l'évaluation de la négligence. L'intérêt selon eux étaient la capacité de la réalité virtuelle à simuler les activités du quotidien, à l'inverse des épreuves papier-crayon. L'autre avantage est l'application d'une position 3D et d'un vecteur de mouvement aux objets, puisque le niveau de profondeur des objets et leurs mouvements semblent être déterminants dans l'attention visuelle.
- Myers and Bierig en 2000 (148) ont développé un système virtuel pour le diagnostic de l'héminégligence visuelle. Ils pouvaient mesurer l'angle maximum de rotation de la tête, le temps mis pour atteindre cet angle maximal dans chaque direction, le nombre de signaux nécessaires au patient pour tourner la tête vers la gauche.

- Kodgi et al. en 1999 puis la même équipe en 2000 (149) évaluaient la négligence visuelle en utilisant un visiocasque équipé du suivi du regard afin d'enregistrer les mouvements des yeux. Le biais du regard vers la droite était présent chez leurs 4 patients inclus puis confirmé par leur seconde étude.

Fasotti et al, en 2013 (150), ont effectué une revue de la littérature plus récente et ont sélectionné dix études concernant l'évaluation de la négligence spatiale unilatérale grâce à la réalité virtuelle :

- Broeren et al., 2007 (151) utilisaient une tâche de barrage dans un environnement virtuel et montraient que même des patients redevenus cliniquement asymptomatiques pouvaient présenter des anomalies en réalité virtuelle. Celle-ci pourrait être plus sensible que les tests papier-crayon.
- Buxbaum et al., 2008 (152), 2012 (153) signalaient que la réalité virtuelle s'avère prometteuse en tant que mesure sensible et efficace de la navigation en situation réelle. Ils simulaient la navigation en fauteuil roulant le long d'un parcours virtuel et le patient devait citer les objets environnants rencontrés.
- Jannink et al., 2009 (154) utilisaient un test de négligence projeté en 3D via un HMD d'ancienne génération. Des boules virtuelles provenant de la droite ou de la gauche, devaient être repérées par le patient dans un environnement virtuel urbain. Les résultats montrent qu'il existe des différences significatives entre les groupes (AVC chronique et aiguë contre sujets sains) quant au temps total passé au test et au temps de réponse moyen dans le champ visuel gauche.
- Kim et al., 2010 (155) ont développé un outil d'évaluation de la négligence extra-personnelle en simulant un test de franchissement de rue avec un dispositif immersif. L'angle de déviation de la tête, le rapport du temps de réaction gauche/droite, les taux de repérage visuels et auditifs côté gauche dans le programme ont montré des différences significatives entre un groupe de 16 négligents vs 16 non négligents. Le logiciel permettait une évaluation en toute sécurité.
- Peskine et al., 2011 (156) ont créé un système de réalité virtuelle avec HMD avec une tâche de navigation dans une ville virtuelle, proche de la vie quotidienne. Le nombre d'arrêt de bus virtuel omis était comptabilisé. Chez les sujets négligents, ils étaient significativement plus importants ainsi que le ratio d'omission gauche/droite.

- Dvorkin et al., 2012 (157) cartographiaient avec précision les zones du champ visuel déficientes grâce à un outil utilisant un écran 3D. Ils permettaient de dépister les formes légères de négligence. Les auteurs critiquaient la non pertinence d'utiliser un écran en 2 dimensions ou des outils papier-crayon pour évaluer un trouble de la représentation dans l'espace tridimensionnel. Le temps de réaction à l'apparition de cibles était utilisé.

Le système RehAtt VR-DiSTRO est un outil validé comportant une batterie de tests de négligence informatisée. Il a été développé à partir d'un projet de recherche de l'Université d'Umea en Suède. 15 tests tirés de la B.I.T. ont été numérisés, et permettaient de passer d'un temps de passation de 45 min à 15 minutes environ, et ce de manière automatisée. L'outil est également utilisé pour la rééducation. L'équipe de Fordell et al., en 2011(158) avait pour but de construire cette batterie de tests en réalité virtuelle 2D et évaluer sa précision et sa facilité d'utilisation chez les patients ayant subi un AVC aigu. Les auteurs concluaient que le logiciel a rapidement et avec une grande précision identifié la négligence visuospatiale et qu'il était facile à utiliser chez les patients âgés.

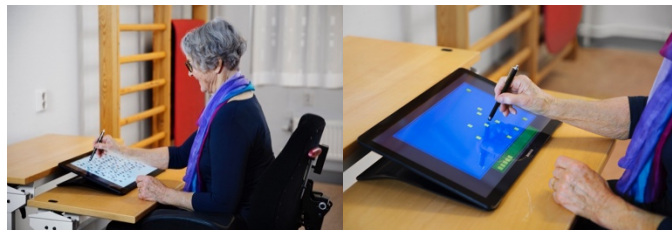


Figure 81 Le système RehAtt VR-DiSTRO

En 2000, Potter et al. (159) n'utilisaient pas la réalité virtuelle, mais le couplage des tests standards (bissection de la ligne et test d'Albert) à une tablette graphique reliée à un ordinateur. L'enregistrement informatisé du processus de remplissage des tests permettait d'identifier les anomalies dans leur processus de réalisation et de comptabiliser les erreurs.

En 2005, Tanaka et al. (160) utilisaient un HMD pour la passation des épreuves papier-crayon d'annulation des lignes et des étoiles (extraites de la B.I.T.). Il existait alors une différence significative entre les évaluations conventionnelles de la négligence et les évaluations en réalité virtuelle du côté gauche. Ils y ajoutaient une épreuve permettant d'évaluer l'impact de la distance du test par rapport au sujet et émettaient l'hypothèse que les tests tridimensionnels pourraient être plus adaptés.

Ulm et al. en 2013 (161) utilisaient un dispositif constitué de 8 écrans tactiles disposés en cercle autour d'une chaise sur laquelle s'assoit le patient. Il permettait d'identifier rapidement et avec fiabilité la négligence et était bien accepté par les patients. L'évaluation était plus détaillée qu'avec les méthodes

standards car elle pouvait donner des informations sur le temps de réaction, et sur les schémas d'exploration visuelle.

Glize et al. en 2012 puis en 2017 (162) ont étudié l'efficacité de l'adaptation prismatique classique dans une tâche de navigation en réalité virtuelle. Ils ont utilisé le célèbre jeu VAP-S (139) de simulation de supermarché au cours duquel les patients devaient acheter des articles sur une liste de huit produits. Ils évaluaient l'index de latéralité dans la préhension des objets virtuels et les dessins de mémoire du plan du supermarché. Chez les sept patients souffrant de négligence chronique inclus, les performances de navigation ont été significativement améliorées après adaptation prismatique. Un effet de longue durée a été observé, jusqu'à un mois après l'adaptation prismatique. La performance des tâches de représentation a également été considérablement améliorée. Ces résultats suggèrent pour la première fois, une extension des bénéfices de l'adaptation prismatique à un environnement virtuel. La réalité virtuelle permettait alors de quantifier les effets consécutifs des prismes en se rapprochant d'une condition écologique.

Ronchi et al. en 2018 (163) ont réalisé une étude préliminaire d'évaluation de leurs outils d'évaluation de l'espace lointain en cas de négligence spatiale unilatérale. La scène d'une forêt était diffusée via un HMD et le patient devait sélectionner des objets statiques. La difficulté était modulée par la présence de distracteurs et une double tâche auditive supplémentaire. Les auteurs concluaient que l'évaluation de l'espace lointain détectait des anomalies chez un groupe de patients négligents et avaient même détecté une négligence chez les patients chroniques qui ne montraient aucun signe de négligence dans les évaluations classiques.

Ogourtsova et al. en 2018 (164) utilisaient des scènes 3D simples ou complexes, pilotables par joystick ou le patient négligent devait trouver des objets sur une étagère d'épicerie.

Au final, l'analyse de la littérature nous montre que la réalité virtuelle peut être un outil d'évaluation efficace qui peut fournir plus d'informations et des résultats plus sensibles que les évaluations classiques de la négligence. Certaines études spécifiques vont dans le sens d'une meilleure sensibilité en ce qui concerne la détection de la négligence légère, notamment chez des patients considérés comme « cliniquement guéris » par les épreuves papier-crayon (151) (154). Cette précision dans la mesure peut aider les thérapeutes à surveiller les changements de l'état d'un patient, à évaluer l'efficacité de la réadaptation et à quantifier la gravité de la négligence. Lorsque les tests standards se normalisent mais que les scores en réalité virtuelle sont encore pathologiques, le thérapeute pourrait poursuivre la rééducation de cette négligence. Les épreuves papiers-crayon ne permettent qu'une évaluation en deux dimensions dans l'espace péri-personnel proche du patient. Il est probable que

cette meilleure sensibilité de la réalité virtuelle soit due à la possibilité de créer numériquement des situations environnementales complexes et de vie quotidienne, à différents degrés de profondeurs dans l'espace tridimensionnel. Les mouvements de la tête et des yeux, les déviations posturales et la cinématique des membres peuvent être analysés et être utiles pour détecter les déficits subtils. Les données de mesures sont automatiquement recueillies par ordinateur et permettent une analyse plus facile et plus fine des déficiences. A titre d'exemple, il est possible d'examiner le schéma moteur de résolution d'une épreuve, les temps de réaction, le suivi oculaire du regard ou des indices temporels de biais latéralisés.

Après exposition des résultats au patient, il est possible d'élaborer des stratégies pour compenser la négligence. Ces nouvelles techniques peuvent également aider les patients et leur famille à prendre davantage conscience des déficits et des problèmes de sécurité inhérent à ce trouble de la représentation spatiale.

Cependant, le point commun de toutes les études sur les nouvelles approches diagnostiques en réalité virtuelle de la négligence sont leur modeste puissance statistique. Les groupes étaient inégaux. Il n'y a quasiment jamais de randomisation car les études ont comparé des sujets sains à des sujets négligents pour déterminer si les évaluations en réalité virtuelle pouvaient faire la distinction entre les deux groupes. Ces études montrent des différences statistiques entre les groupes mais ces résultats étaient prévisibles puisque les groupes témoins étaient composés principalement d'individus sains, ne permettant pas d'éliminer les facteurs confondants (des facteurs autres que la négligence peuvent expliquer une moins bonne performance par rapport aux sujets sains). De plus, la passation des tests en aveugle aurait pu réduire les biais expérimentaux. Quasiment aucun des groupes de patients de la littérature n'avait plus de 12 sujets. (Seule une étude (165) comptait un nombre important de participants (n=50).

Concernant cette thématique, il y a un net besoin d'études de meilleure qualité, utilisant des échantillons de plus grande taille, dans différents environnements virtuels et des patients souffrant de diverses déficiences motrices et cognitives, afin de pouvoir généraliser les résultats. Les approches futures devront mettre l'accent sur l'augmentation de la complexité des objets présentés au patient, tester l'effet des objets dynamiques par rapport aux objets statiques sur les mouvements oculaires des sujets négligents et déterminer si cette technique peut être utilisée pour les entraîner à visualiser des informations du côté négligé.

A notre connaissance, aucun auteur ne s'était intéressé à réaliser une version virtuelle des tests de Droit Devant Manuel (SSA) et de Pointage en Boucle Ouverte (VOL) décrites dans les études portant sur l'adaptation prismatique (71).

Le Droit Devant Manuel (SSA-m)

Dans l'épreuve originale (71), le sujet doit réaliser une série de 10 pointages avec sa main droite dirigée, dans l'obscurité, en direction de son « droit-devant » et permet de mettre en évidence la discordance visuo-proprioceptive. Un système électronique sur une table spéciale permet alors de relever les déviations angulaires des pointages par rapport à l'axe du corps.

Dans notre version en réalité virtuelle, nous diffusons au sujet un écran noir via le visio-casque afin de masquer tout repère visuel. Une consigne vocale préenregistrée indique au sujet la consigne de pointage. Le sujet utilise alors un contrôleur en main (dont la position est relevée en temps réel par les émetteurs infrarouges laser) pour pointer droit devant lui à plusieurs reprises. Entre chaque pointage, le patient doit repositionner sa main qui tient le contrôleur, au niveau du sternum. Le nombre de pointage est paramétrable mais 10 pointages sont généralement utilisés pour calculer la déviation angulaire moyenne par rapport à l'axe du corps. Les déviations des différents pointages réalisés sont calculées à partir des coordonnées dans les trois dimensions de l'espace, lorsque le contrôleur franchit la limite virtuelle horizontale de la table préalablement calibrée. Les données enregistrées de cette épreuve sont exportables dans un rapport enregistré au format .csv sous forme de tableau de valeurs.



Figure 82 Le SSA-m : Le sujet pointe droit devant lui, sans aucun retour visuel dans le casque.

Le Droit Devant Visuel (SSA-v)

Dans cette épreuve qui évalue la composante visuelle uniquement, le sujet doit interrompre le déplacement latéral dans le noir, d'une cible visuelle lorsque celle-ci est perçue en position « droit-devant ».

Dans notre version en réalité virtuelle, nous diffusons au sujet une scène où il n'y a aucun repère spatial. Un bouton de calibration permet de faire coïncider la scène virtuelle à la position réelle de la tête du sujet. Une cible noire se déplace sur une ligne horizontale en face du sujet, au milieu de son champ de vision, sous le contrôle d'une manette avec joystick. Le déplacement latéral est géré par le sujet lui-même ou bien l'examineur. Le déplacement de la cible est arrêté en position droit devant. La déviation angulaire par rapport au droit devant réel est calculée pour tous les essais et enregistrée dans un rapport exportable au format .csv sous forme de tableau de valeurs.



Figure 83 Manette utilisée par le sujet ou l'examineur pour le déplacement horizontal de la cible.



Figure 84 Vision à l'intérieur du casque. Dans cet exemple, le droit devant visuel est dévié de 15° vers la droite.

Fin de la séance	
Mesure 1 :	Angle Repère : -1.43 Angle Tête : 0.31
Mesure 2 :	Angle Repère : -8.09 Angle Tête : 0.26
Mesure 3 :	Angle Repère : 0.56 Angle Tête : 0.08
Mesure 4 :	Angle Repère : -3.52 Angle Tête : 0.07
Mesure 5 :	Angle Repère : 1.64 Angle Tête : 0.05
Mesure 6 :	Angle Repère : -1.2 Angle Tête : -0.05
Mesure 7 :	Angle Repère : -4.38 Angle Tête : -0.080
Mesure 8 :	Angle Repère : -4.36 Angle Tête : -0.120
Mesure 9 :	Angle Repère : -4.74 Angle Tête : -0.100
Mesure 10 :	Angle Repère : -4.29 Angle Tête : -0.110
Mesure 11 :	Angle Repère : -0.42 Angle Tête : -0.020
Mesure 12 :	Angle Repère : -3.75 Angle Tête : 0.130
Moyenne : -2.83	
Sauvegarder Menu Principal Quitter	

Figure 85 Les résultats des différents SSA-v et leur moyenne.

La précision du pointage sans rétroaction visuelle (VOL)

Cette épreuve évalue l'alignement visuo-proprioceptif en s'affranchissant de la part de compensation par feedback visuel du membre supérieur. Le sujet doit réaliser une série de pointages (généralement 10) avec sa main droite en direction d'une cible visuelle et en l'absence de vision de sa main.

Dans notre version en réalité virtuelle, nous diffusons une scène avec un table virtuelle (calibrée avec l'aide d'un tracker pour correspondre à la position de la table réelle d'examen). Sur cette table se trouve une cible de couleur à portée de pointage du sujet. La cible à pointer se situe soit à 10° vers la gauche, soit à 10° vers la droite, par rapport à la ligne définissant le droit devant réel du patient. Dans un premier temps, le sujet doit regarder la cible qui est apparue aléatoirement à droite ou à gauche. Puis la scène devient totalement noire sans aucun feedback visuel possible. Via une consigne vocale préenregistrée, le sujet est invité à pointer à l'endroit où se situait la cible. Une fois le pointage sans rétroaction visuelle effectué, une autre cible apparaît aléatoirement à gauche ou à droite et l'épreuve est recommencée jusqu'à un nombre de fois prédéfini à l'avance. La moyenne de ces valeurs est calculée automatiquement et toutes les données sont exportables au format .csv sous forme de tableau de valeurs.



Figure 86 Scène virtuelle du VOL.

Le test des cloches virtuel

Le test des cloches classique (36) (comme tous les tests papier-crayon) a le gros défaut d'évaluer l'héminégligence en se basant sur un test sur une feuille A4 standard. La feuille se situe dans l'espace péri-personnel proche du patient, à portée de main, et n'évalue pas l'espace péri-personnel éloigné.

C'est pour cela qu'un test des cloches virtuel nous semblait pertinent, car il nous permettrait de moduler la distance entre le sujet et le plan du test (afin de tester au besoin l'espace péri-personnel lointain) et permettait d'englober tout le champ de vision du sujet afin d'évaluer sa négligence dans l'environnement à 180°. Ce zoom adaptable rend la scène plus immersive qu'une feuille A4 et ainsi, reproduit des conditions plus écologiques pour le patient puisque réparties sur tout le champ visuel. La scène est placée devant le patient dans un plan vertical plus réaliste que la position horizontale originelle et une fonction de calibrage est présente afin de définir le milieu de la scène avec précision. Le sujet tient un contrôleur dans la main et pointe avec un laser virtuel la cloche qu'il souhaite et clique sur le bouton principal pour l'entourer. Il existe 35 cloches au total au sein de 280 autres figures appelées « distracteurs ». L'oubli de 6 cloches ou plus à droite ou à gauche de la page indique une négligence spatiale unilatérale. La distribution spatiale des cloches omises, permet à l'examineur d'évaluer la sévérité de la négligence visuelle, ainsi que de la latéralité de cette négligence. Le score ainsi que la stratégie d'exploration visuelle sont affichés en temps réel sur la vue évaluateur uniquement, ainsi qu'à la fin du test avec possibilité de sauvegarder les résultats.

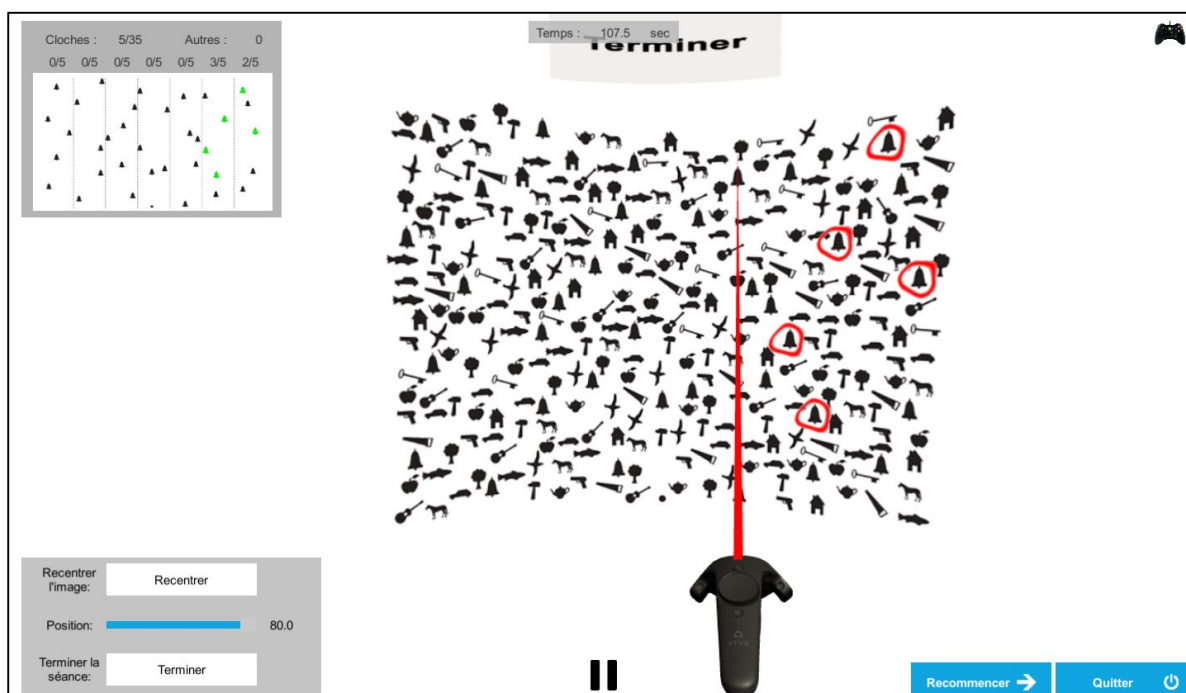


Figure 87 Vue évaluateur : test éloigné au maximum, l'angle de vision correspond au test classique sur papier.

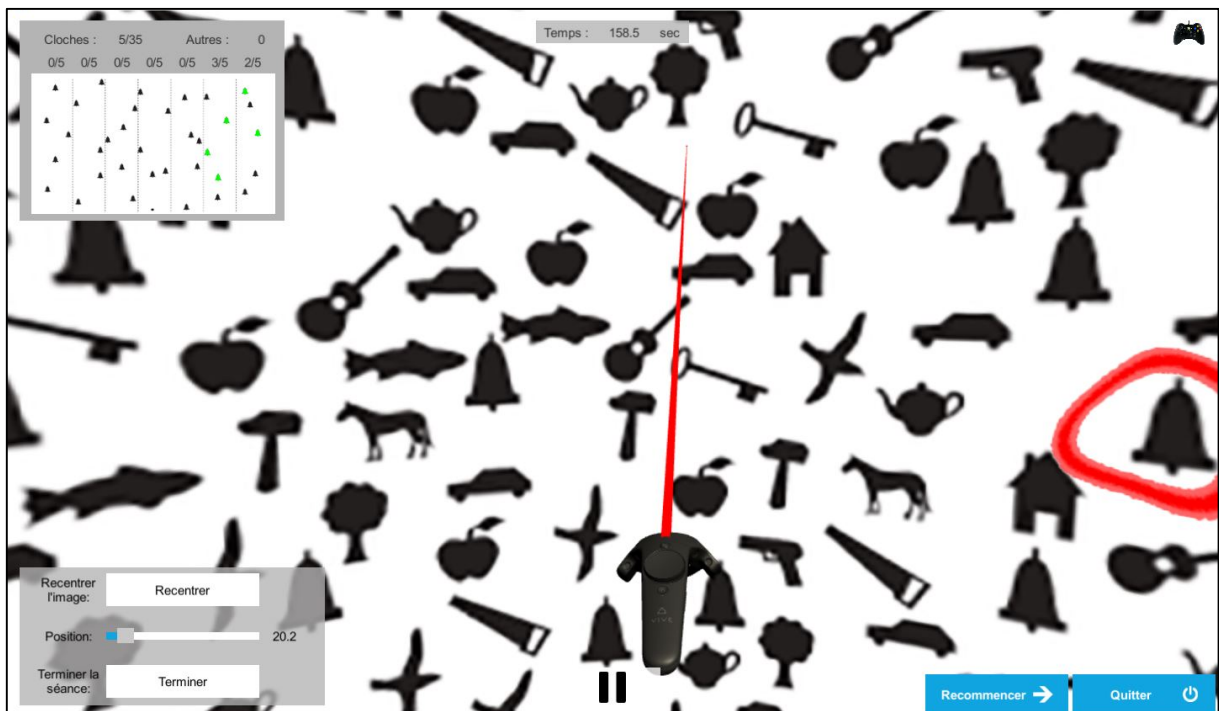


Figure 88 Vue évaluateur : Test rapproché au maximum, il couvre 180° du champ de vision, le sujet doit explorer tout son environnement.

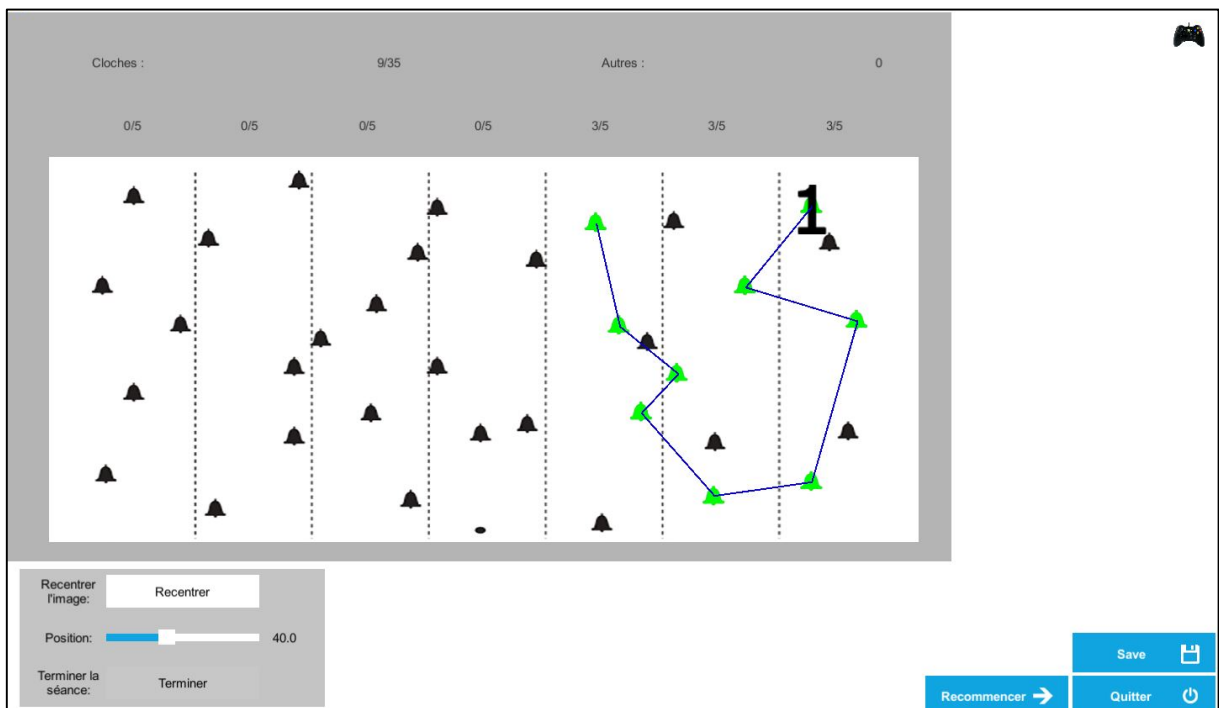


Figure 89 La stratégie d'exploration visuelle est automatiquement transposée sur une vue spéciale, en fin de test. Dans l'exemple, le sujet néglige a omis une grande partie des cloches situées à gauche et débute l'exploration par la droite.

Développement d'un outil de rééducation de la négligence en réalité virtuelle immersive

Les outils existants dans la littérature scientifique

Les techniques virtuelles basées sur l'exploration visuelle

Kim et Al, en 2011 (166), utilisaient le système professionnel IREX® de réalité virtuelle non immersive qui comprend un écran 2D, l'intégration de la silhouette du patient via une caméra et des gants reconnus par le système. Les jeux n'étaient pas spécifiques et consistaient en des tâches d'interaction avec des objets provenant de toutes les directions. Les serious game inclus ont permis une amélioration significativement plus importante sur le test de barrage d'étoiles et l'échelle Catherine Bergego chez 12 patients négligents en phase aiguë d'AVC (contre 12 autres ayant bénéficié d'une rééducation classique de la négligence). Il n'y avait, par contre, pas de différence significative sur le test de bissection des lignes et sur l'indice de Barthel modifié.

Sedda et al. ont créé en 2013 (167) un système de rééducation de la négligence utilisant le même procédé mais avec du matériel low-cost (en utilisant une vidéo-projection murale avec inclusion numérique de la silhouette du patient grâce à une caméra Sony PS3 "EyeToy®"). Il s'agissait d'une étude pilote sur un seul sujet négligent qui montrait une amélioration de son attention et de la négligence suite à des tâches visuelles de recherche d'objets de la vie quotidienne.

L'équipe suédoise de Fordell, Ekman et Wåhlin ont réalisé trois études pour évaluer l'efficacité de leur nouvel outil de rééducation de la négligence « RehAtt™ » composé d'un ordinateur avec moniteur 3D, lunettes 3D et interface de retour de force (stylo robotique) permettant l'activation sensori-motrice du bras contre-lésionnel. Le logiciel combine une rééducation par balayage visuel et une stimulation multi sensorielle dans un environnement de jeu de réalité virtuelle en 3D semi-immersive.

- En 2016, (168) ils incluaient 15 patients victimes d'AVC et souffrant de négligence chronique. Après une exposition de 15 heures sur leur programme (3 × 1 h pendant 5 semaines), ils utilisaient une batterie de tests de négligence et l'échelle Catherine Bergego. Ils ont alors constaté une amélioration significative en ce qui concerne le test de barrage d'étoile ($p = 0,006$), une épreuve de cuisson sur plaque ($p < 0,001$), une épreuve d'extinction ($p = 0,05$) et une amélioration des activités de la vie quotidienne immédiatement après l'entraînement ($p < 0,01$) sur l'échelle Catherine Bergego et ce, même après 6 mois. L'entraînement avec leur méthode de réalité virtuelle a amélioré

l'attention spatiale et a montré un transfert vers les activités de la vie quotidienne dans la négligence chronique.

- En 2018 (169), puis en 2019 (170), ils ont étudié chez les patients de l'étude précédente, leurs imageries par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Ils ont alors constaté après entraînement en réalité virtuelle, une augmentation de l'activité cérébrale dans un réseau étendu incluant le cortex préfrontal et temporal et surtout une augmentation de la connectivité interhémisphérique dans le réseau dorsal de l'attention à l'état de repos. La région contrôlant les mouvements oculaires en saccade vers la gauche est également devenue plus intégrée avec le cortex pariétal postérieur gauche.

En 2017, Tobler-Ammann et al. (171), développaient une série de 9 jeux sérieux sur écran 2D visant à améliorer l'exploration de l'espace négligé. Leur première publication correspondait à une étude pilote et de faisabilité sur 7 patients négligents. L'adhésion des patients était élevée et il n'y a eu aucun effet indésirable. Ces exercices étaient réalisables et sûrs pour les participants. L'exploration visuelle mesurée par caméra infrarouge s'améliorait mais de manière peu significative. La même année (172) ils ont évalué le ressenti des patients et des thérapeutes à l'égard de ces jeux. Les patients et les thérapeutes ont perçu les exercices comme étant conviviaux mais les thérapeutes étaient plus critiques à l'égard de l'utilisation future que les patients. Les auteurs jugent crucial de faire participer les patients et les thérapeutes à l'élaboration de versions acceptables et conviviales de serious games.

Eye-Search est une plateforme web gratuite destinée aux patients souffrant de problèmes de recherche visuelle causés par des lésions cérébrales (hémianopsie et négligence spatiale). Elle a pour vocation l'amélioration de la fonction visuelle par stratégie de compensation, en se basant sur divers exercices de recherche visuelle. Bien qu'elle comprenne un module spécifique à la négligence, seule son efficacité sur hémianopsie latérale homonyme a été étudiée (173) (174).

Yasuda et al en 2017, (175) (176) étaient les seuls, à notre connaissance, à proposer un outil de rééducation de la négligence par exploration visuelle, en utilisant les casques de réalité virtuelle immersive de nouvelle génération. Ils proposaient un programme de rééducation de l'espace proche et de l'espace éloigné grâce à un casque Oculus Rift® associé à un détecteur de mouvement de la main Leap Motion. Le sujet exposé devait saisir des objets sur une table virtuelle et détecter des objets présentés sur un mur virtuel éloigné. Leur étude pilote concluait qu'il y avait une différence significative dans les scores B.I.T. avant et après leur programme de rééducation de l'espace lointain mais pas dans l'espace proche. Une autre étude de la même équipe en 2018, (177) ne retrouvait pas de généralisation dans les activités de vie quotidienne sur l'échelle de Catherine Bergego malgré l'amélioration des symptômes de négligence dans l'espace lointain.

Deux protocoles de recherche en cours utilisent des casques de nouvelle génération pour rééduquer la négligence (178) (179).

Les techniques virtuelles basées sur l'entraînement à des tâches spécifiques

L'épreuve de franchissement de rue virtuelle a particulièrement été étudiée car permet aux thérapeutes d'effectuer des séances stimulantes dans des conditions potentiellement dangereuses.

Trois études ont utilisé des environnements de rue virtuelle en 3D immersive par HMD (180) (181) (165) pour entraîner les patients négligents post AVC. Les patients étaient globalement améliorés (par rapport à un entraînement en balayage visuel) lors du franchissement du passage à niveau réel.

L'article de Navarro et al. en 2013 (182) présente la validation clinique d'un système de réalité virtuelle à faible coût pour l'entraînement au franchissement d'une route sur passage à niveau chez les patients avec et sans négligence. Il s'agissait d'une technique peu immersive sur écran 2D.

D'autres tâches d'entraînement spécifiques comme le maniement du fauteuil roulant ont été testées virtuellement (183).

Les techniques virtuelles inspirées des prismes

Dès 1996, Rushton et al. (147) relevaient les applications potentielles de la réalité virtuelle pour le traitement de la négligence. Ils suggéraient que l'environnement virtuel devrait potentiellement permettre une simulation de l'adaptation prismatique et devrait permettre de plus facilement explorer la relation des différents cadres de référence dans la négligence visuelle unilatérale. Cependant leurs réflexions n'étaient que purement théoriques et les limitations technologiques de l'époque ont probablement contribué à la non réalisation d'un tel outil.

Castiello et al. en 2004 (184) (185) (186) ont essayé d'étendre l'action de l'espace non affecté à l'espace affecté chez les patients atteints de négligence. Ils utilisaient un écran de PC pour l'affichage visuel combiné à un DataGlove® pour le suivi des mouvements de la main. Les sujets sains et négligents inclus devaient saisir des objets réels en ne voyant que la version virtuelle sur écran 2D. En proposant des décalages entre le virtuel et le réel, ils ont induit une reconstruction cérébrale des référentiels et ils suggéraient que cela s'apparentait à de l'adaptation prismatique. Les auteurs considéraient que la main virtuelle faisait partie intégrante du corps et que la représentation de l'espace était donc élargie pour inclure l'espace virtuel (y compris la portion négligée). Leur protocole n'avait pour but que la recherche fondamentale sur le sujet et c'est la seule étude qui utilisait la réalité virtuelle dans ce but.

Gammeri et al. en 2018 (187), induisaient des effets d'adaptation en réalité virtuelle immersive avec casque de type HMD (HTC Vive®). Des groupes de participants sains étaient formés selon la déviation prismatique virtuelle imposée : aucune déviation, déviation de 10°, 20° ou 30° vers la droite. Ils proposaient d'induire le décalage visuel très progressivement au cours de la tâche de pointage afin que le sujet ne se rende pas compte de la déviation et que la composante stratégique de recalibrage soit la plus petite possible. L'erreur de pointage était directement liée au degré de déviation virtuelle et était la plus importante immédiatement après l'adaptation. Le transfert de cette adaptation à d'autres tâches (telle que la bissection de ligne) n'a cependant été observé que dans le groupe des 30 degrés, ce qui suggère qu'un seuil critique de déviation doit être atteint afin d'induire un transfert dans les activités visuo-motrices.

En 2019, une équipe danoise (Ramos et al.) (188) a cherché à savoir si une simulation en réalité virtuelle immersive de l'adaptation prismatique entraînait les mêmes effets consécutifs que les prismes originaux. Leur deuxième objectif était de savoir si les effets consécutifs étaient plus importants en utilisant une déviation latérale virtuelle ou une rotation axiale virtuelle du champ de vision. Pour cela, ils ont exposé 20 sujets sains à 3 conditions différentes d'exposition en cross-over avec période de wash-out suffisante pour faire disparaître les effets du prisme :

- VRR : une scène en réalité virtuelle immersive en imitant une rotation de 10 degrés vers la gauche de la tête.
- VRS : une scène en réalité virtuelle immersive en imitant un déplacement horizontal 2D de 10 degrés vers la gauche.
- PCP : une condition de contrôle utilisant des prismes réels dans une tâche de pointage sur ordinateur avec écran 2D dont la partie basse de l'écran est masquée.

Leurs résultats montrent que les effets consécutifs sont bien présents en virtuel, et que, contre toute attente, ils sont plus importants qu'en condition prismatique réelle. L'effet consécutif produit par la rétroaction indirecte virtuelle (on ne voit pas son propre doigt mais l'image d'un doigt) est plus grand que l'effet consécutif produit par les lunettes à prisme classique (voir son vrai doigt dans la réalité physique). Les auteurs tentent d'expliquer ce surprenant et encourageant résultat en exposant un biais majeur de leur étude (la puissance des prismes utilisés ne correspondait pas à la déviation prismatique virtuelle, mais ils ont corrigé ce biais statistiquement). Une autre explication serait qu'en réalité virtuelle immersive, il y aurait moins de distractions et donc que l'attention accrue pourrait entraîner une adaptation plus rapide.

Enfin, l'étude a démontré qu'il n'y avait pas de différence dans la taille de l'effet consécutif prismatique entre les deux types de déviation : rotation axiale ou translation latérale.

Ces deux études récentes corroborent celle de Veilleux et celle de Norris. Veilleux et al. (189) avaient montré en 2015, que contrairement à ce que l'on pensait, un véritable réalignement responsable d'effets consécutifs se produisait bel et bien dans un contexte virtuel. Norris et al. 2001 (190) suggéraient que le niveau d'adaptation était proportionnel au degré de réalisme de la représentation de l'effecteur.

Comme nous venons de le voir, des outils de rééducation virtuels de la négligence ont été mis au point par des chercheurs depuis les années 2010. Grâce à cette technologie avancée, les patients peuvent être entraînés grâce à des simulations pertinentes pour la vie quotidienne, des situations à risque dans le monde réel, éliminant ainsi la nécessité d'utiliser des environnements réels qui ne sont pas toujours disponibles dans un hôpital (146). Certains utilisent l'entraînement, de manière contrôlée et en toute sécurité, à des tâches délicates comme traverser une rue ou conduire un fauteuil roulant électrique. D'autres utilisent l'approche de l'exploration visuelle en tentant d'attirer l'attention du sujet dans son héli-espace négligé. Ces outils offrent la possibilité de recueillir des données automatiquement et suivre les progrès du patient. La difficulté peut être adaptée au cas par cas selon le déficit et parfois même de manière auto-adaptative.

Cependant, les systèmes sont rarement immersifs et plus souvent en deux dimensions, ce qui limite grandement leur intérêt dans un trouble de l'exploration spatiale car cela va influencer le sentiment de présence et les résultats potentiels. C'est d'ailleurs la conclusion de la revue systématique de la littérature de Ogourtsova et al. sur le sujet, datant de 2017 (191). Elle a analysé toutes les études antérieures et soulignait que, bien que ces nouveaux outils soient prometteurs, la plupart des interventions de réalité virtuelle existantes utilisaient une faible immersion et ne prenaient pas suffisamment en compte la notion de négligence de l'espace proche et lointain.

D'autres auteurs de revues (150) (146) (192) concluent qu'en général, les bénéfices des nouvelles technologies de rééducation de la négligence semblent significatifs et parfois plus intéressants que les méthodes traditionnelles, et que ces bénéfices pourraient durer un certain temps. Cependant, il manque d'études permettant d'en évaluer les bénéfices à long terme. Ils décrivent également le fait que la négligence est rarement un symptôme isolé, et que l'absence d'évaluation des autres atteintes cliniques est clairement une limite de ces études. Ils critiquent également la taille trop faible des échantillons de patients, l'absence fréquente de groupe contrôle et le caractère observationnel de beaucoup d'études.

La vaste gamme de technologies utilisées dans la littérature limite les possibilités de généralisation. Certains utilisent une interaction simpliste avec un environnement virtuel simulé sur un écran d'ordinateur, alors que d'autres utilisent un environnement avec casque de réalité virtuelle

immersive. Il faudra attendre 2017 pour voir arriver des protocoles utilisant les casques modernes de réalité virtuelle (175) (187) (188).

La réalité virtuelle peut être complexe et nécessiter une certaine expertise dans la gestion du système et l'analyse des résultats. Les nombreux dispositifs de réalité virtuelle sont coûteux. Pour justifier ce coût, plusieurs tests et techniques de rééducation différents peuvent être utilisés sur la même plate-forme. Idéalement, un système complet pourrait offrir une batterie de mesures diagnostiques multimodales et d'applications de rééducation. Cela permettrait également de tester l'ensemble du spectre des troubles liés à la négligence avec un seul outil (146).

La grande majorité des études ne comprenait pas de groupe témoin et, ni les participants ni les évaluateurs n'étaient aveuglés (191). Par conséquent, les résultats peuvent avoir été biaisés par des effets placebo ou d'apprentissage. Le traitement était souvent de courte durée.

L'efficacité clinique des systèmes de réalité virtuelle doit être évaluée au moyen d'une méthodologie plus rigoureuse et de plan d'étude randomisé chez des populations de plus grande taille, avec des patients de forme de négligence différente, et à différentes phases après la lésion cérébrale.

Très peu d'auteurs se sont intéressés à la création de prismes virtuels. L'adaptation prismatique semble être une des techniques les plus prometteuse dans le traitement de la NSU et il est tout à fait possible d'en recréer les conditions avec un programme en réalité virtuelle immersive.

Développement de deux prototypes en réalité virtuelle non immersive

Nous avons choisi de développer une méthode s'apparentant à la thérapie par l'adaptation prismatique. Dans un premier temps nous avons tenté de réaliser un prototype hybride qui associait réalité virtuelle en deux dimensions et thérapie prismatique classique. Pour se faire nous avons utilisé le robot de rééducation REAplan® de la société Axinessis, comme effecteur de la tâche de pointage (manche déplaçable dans un plan horizontal), couplé à un jeu sérieux de rééducation retransmis sur un moniteur deux dimensions dans un plan vertical. Cependant, le logiciel intégré REAlab® ne permettait pas un travail spécifique des tâches de pointage dont nous avons besoin. De plus, ce prototype ne nous permettait pas de nous affranchir des lunettes prismatiques classiques.



Figure 90 Port des prismes lors de tâches s'apparentant à des pointages sur REAplan®

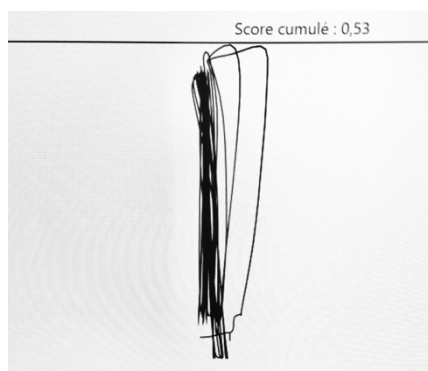


Figure 91 Les trajectoires des 3 premiers pointages correspondaient à nos attentes.

Nous avons réalisé un second prototype qui permettait de s'affranchir des lunettes prismatiques en proposant un système doté d'un moniteur 2D placé face au sujet, d'un effecteur de type tablette graphique, ainsi que d'un système de cache, empêchant le patient de voir le mouvement réel du bras ainsi que la partie inférieure du moniteur. La tablette graphique était volontairement positionnée décalée vers la gauche par rapport à l'axe du patient, afin de créer un décalage de l'effecteur virtuel vers la droite. La tâche de pointage était effectuée sans rétrocontrôle visuel du bras réel et en ne voyant que la trajectoire distale de l'effecteur virtuel. Ainsi nous avons recréé des conditions s'apparentant à l'exposition prismatique classique sans l'utilisation de lunettes dédiées.

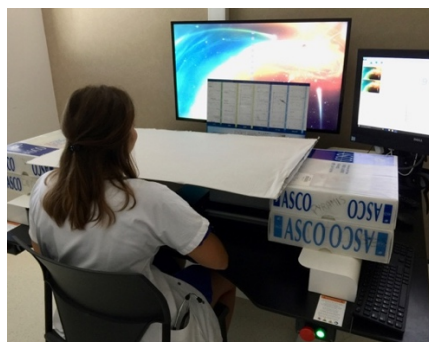


Figure 92 La tablette graphique est masquée par le dispositif

Wilms et al. (193) avaient tenté le même procédé en 2010 mais en utilisant un écran directement tactile, afin de savoir si un feedback direct ou indirect du doigt était équivalent en termes d'efficacité. La partie inférieure de l'écran était masquée par une structure en bois, et le sujet devait pointer sur cette partie inférieure. Le rétrocontrôle visuel était assuré par une copie virtuelle du lieu de pointage dans la partie supérieure de l'écran. L'adaptation ne se produisait que quand le sujet voyait le bout de son doigt réel pendant l'étape d'exposition à des vrais prismes. Il semblerait donc important d'avoir un feedback direct sur le pointage, et non une représentation virtuelle sur un écran 2D dans un autre référentiel que le référentiel égo-centré.

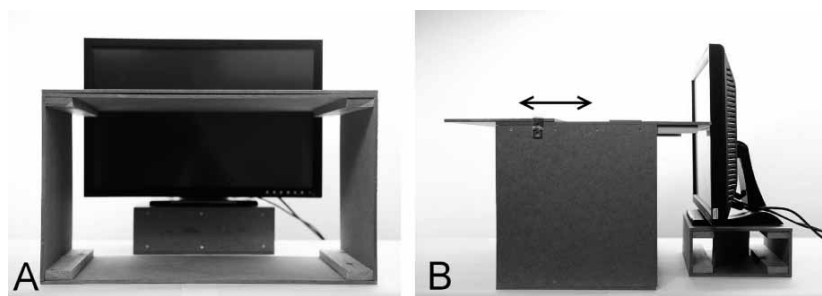


Figure 93 Dispositif utilisé par Wilms et al. 2010.

De plus, l'héminégligence ne touche pas que la dimension de l'objet, elle se manifeste principalement par un trouble de la cognition spatiale, donc de l'environnement avec différents degrés de distance par rapport au patient. C'est pourquoi, il est probable que la conception d'un outil diagnostique et thérapeutique numérique de la négligence ne devrait pas se limiter à deux dimensions sur un moniteur d'ordinateur standard. Dans un système de réalité virtuelle à deux dimensions avec des effecteurs de type clavier, souris ou tablette graphique, la difficulté est que le sujet possède deux référentiels égo-centriques différents : celui de patient (proprioceptif), et le référentiel virtuel (par feedback visuel). Le cerveau subit alors un conflit visuo-proprioceptif lié au décalage entre le virtuel et le réel. Bien que les utilisateurs finissent par s'y habituer, il y a de grandes chances que ce décalage ne soit pas compatible avec une rééducation s'apparentant à l'adaptation prismatique car elle résultera plus d'un apprentissage que d'une adaptation. C'est pourquoi, nous avons décidé de nous orienter vers un système de réalité virtuelle totalement immersive.

Développement d'un prototype en réalité virtuelle immersive

L'information visuelle en 3D qu'une réalité virtuelle immersive peut procurer, apporte donc une dimension supplémentaire et facilite la présentation d'un plus grand nombre d'informations. L'effort cognitif du sujet pour transposer la localisation de son « soi » dans le virtuel sera grandement diminué voir absent, car les repères visuels, proprioceptifs, auditifs et haptiques sont congruents et se situent dans le même repère égocentré. Un système de réalité virtuelle immersif en trois dimensions multiplie par ailleurs les possibilités thérapeutiques :

- Il est le plus à même de coller à la réalité en proposant un champ visuel à 360°.
- Il propose une superposition des coordonnées des référentiels égocentrés réels et virtuels du sujet.
- Il est le plus à même d'enrichir les tâches proposées or, dans la littérature, la rééducation de ce trouble par le biais des épreuves papier-crayon n'a pas montré d'applicabilité dans la vie réelle du patient, mais simplement une amélioration des performances sur ces mêmes tests. Il semble alors plus logique d'immerger le patient dans un monde virtuel le plus réaliste possible avec différents degrés de profondeur lors de l'exposition aux prismes ou lors des tests.

Le but de ce travail a été de réaliser un cahier des charges de l'outil idéal de rééducation de l'héminégligence par réalité virtuelle immersive, en se basant sur le principe de l'adaptation prismatique, ainsi que sa réalisation effective en collaboration avec une entreprise spécialisée en réalité virtuelle immersive thérapeutique.

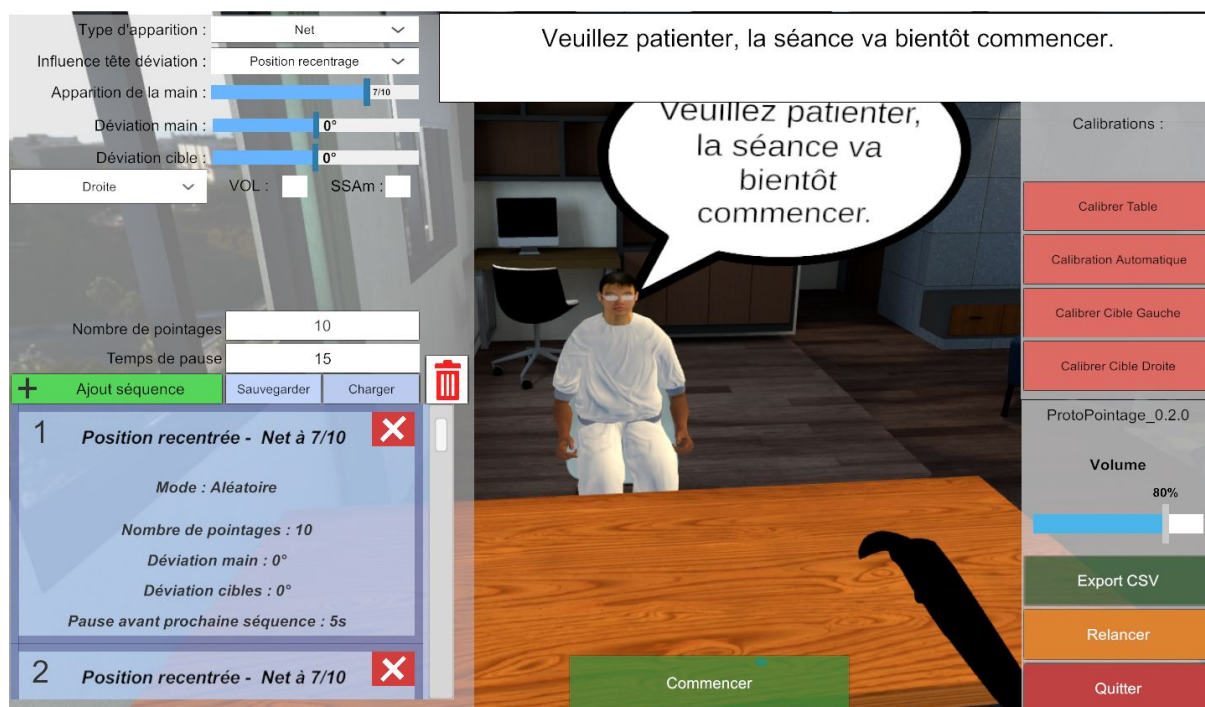


Figure 94 Vue examinateur du logiciel de pointage. A travers le casque, le sujet ne voit que l'environnement virtuel.

Nous avons reproduit les conditions les plus fidèles possible au protocole initial décrit par l'équipe lyonnaise en 1998 (46) et en y ajoutant des options de paramétrages inspirées des nombreux autres protocoles qui ont suivis, afin de pouvoir optimiser le processus d'adaptation. Nous allons détailler les caractéristiques du programme que nous avons développé :

L'installation du sujet se fait sur une chaise fixe face à un table standard. Le matériel supplémentaire requis est un casque de réalité virtuelle de type HMD, un seul contrôleur pour l'interaction est requis, un traqueur pour le calibrage, deux stations infrarouges lasers placées de part et d'autre de la pièce, un ordinateur, ainsi que le logiciel « ProtoPointage.exe ». Le casque est fixé sur la tête du sujet, en ayant préalablement mesuré et paramétré l'écart pupillaire du sujet pour un meilleur confort visuel. Dans le protocole classique (cf. *fig 91*), le sujet exposé pose son menton sur une plateforme qui sert à la fois à fixer la tête dans l'espace, mais aussi à masquer la course proximale du membre supérieur lors du pointage. Dans notre version virtuelle, la fixation de la tête n'est pas nécessaire, car le calibrage initial du logiciel permet de centrer la tête par rapport au centre de la scène virtuelle. Nous avons également incorporé une option (nommée « Influence tête-déviaton ») permettant d'asservir (ou non) la position des cibles à la position du casque (donc de la tête). De ce fait, les mouvements latéraux de la tête n'ont pas de répercussion sur les mesures de déviations angulaires des pointages puisque l'axe du droit devant du patient est adapté en temps réel. De plus, le masquage de la course proximale du mouvement de pointage virtuel se fait informatiquement.



Figure 95 Le protocole original d'exposition.



Figure 96 Protocole d'exposition virtuel

La scène virtuelle créée comprend une pièce dans laquelle se trouve une table virtuelle. Un avatar (le thérapeute virtuel) se trouve assis en face du sujet exposé.



Figure 97 La table virtuelle, la cible bleue et l'avatar du thérapeute

Le calibrage est une étape primordiale. Elle permet de faire correspondre les coordonnées des repères égocentrés réels et virtuels ainsi que la synchronisation de la hauteur de la table réelle avec la table virtuelle. Une fois que le sujet est assis et bien centré, un appui sur la touche « C » du clavier de l'examineur permet de calibrer les repères de la scène virtuelle. Ensuite, l'examineur calibre la table grâce au traqueur.

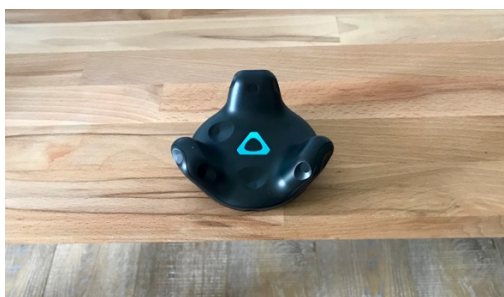


Figure 98 Le traqueur est placé au bord de la table réelle pour calibrer la hauteur ainsi que l'éloignement de la table virtuelle.

Les instructions sont données vocalement et visuellement (sous forme de texte dans une bulle) par l'avatar (le thérapeute virtuel). Les indications vocales préenregistrées sont théoriquement suffisantes pour comprendre toutes les consignes, mais l'examineur a la possibilité de compléter les instructions à l'oral. Le nombre de pointage restant est indiqué sous forme de texte en temps réel.

Les cibles virtuelles (l'une jaune, l'autre bleue) se situent sur cette table virtuelle. Elles vont apparaître à tour de rôle, chacune à des endroits distincts de la table (les emplacements sont entièrement paramétrables mais il existe une option pour placer automatiquement les deux cibles

écartées de 10° vers la gauche et vers la droite par rapport à l'axe central du patient). Une fois la cible pointée, elle disparaît immédiatement et un feedback auditif est transmis au patient. Quelques instants après, la nouvelle cible apparaît et peut être pointée. Au cours des pointages successifs, les cibles apparaissent soit alternativement, soit de manière aléatoire soit uniquement à droite, soit uniquement à gauche selon l'option préalablement paramétrée. L'option aléatoire est préférée pour diminuer l'effet d'apprentissage du patient.

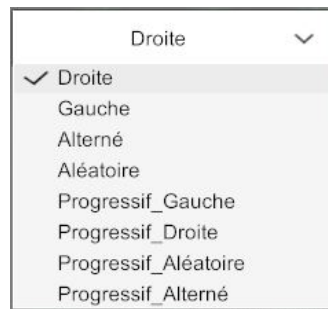


Figure 99 Menu déroulant permettant de choisir l'ordre d'apparition des cibles.

Les interactions du sujet pour le pointage dans le monde virtuel se font grâce à un unique contrôleur tenu en main. La main droite comme la main gauche peuvent être utilisées en fonction du côté de la négligence. Le sujet n'a pas besoin d'utiliser les différents boutons. La précision des coordonnées de pointage est de l'ordre du millimètre. Lorsque le pointeur atteint le plan horizontal de la table virtuelle, les coordonnées dans l'espace de la pointe du pointeur sont récupérées, et sa déviation (en degrés) par rapport à la cible visée est calculée par le programme en utilisant la formule :

$$\tan^{-1}(\text{distance pointage-cible} / \text{distance sujet-pointage}) \times \pi$$

Pour masquer la course proximale du pointage (afin que le sujet ne compense pas par rétrocontrôle visuel proactif), une option (nommée « apparition de la main ») permet de régler la distance à laquelle le contrôleur apparaît (en dixième de la distance totale du sujet à la cible). L'apparition peut être progressive (en fondu) ou brutale.

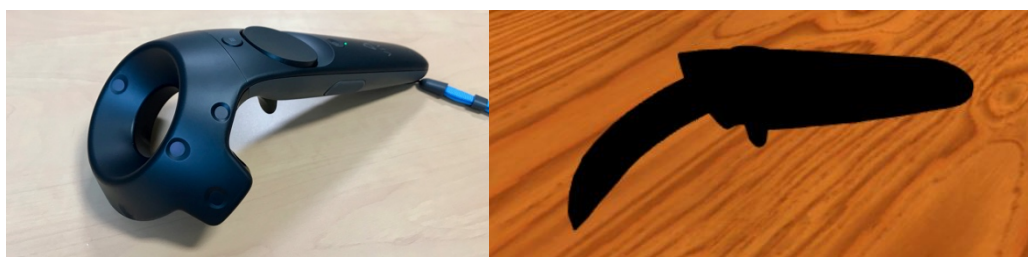


Figure 100 A gauche : le contrôleur Vive.

A droite : le pointeur virtuel

Il existait une autre méthode d'interaction avec le monde virtuel mais que nous avons préféré ne pas utiliser : il s'agit de l'incorporation de mains virtuelles grâce à la capture des mouvements des mains réelles. Ce dispositif avait l'avantage de permettre une interaction sans aucun effort cognitif du sujet et des pointages naturels avec l'index comme pour un pointage classique. Cependant, avec ce dispositif, la qualité des interactions est médiocre lorsque les mouvements de pointage sont rapides et de grandes envergures. De plus, la précision des pointages n'était pas suffisante.

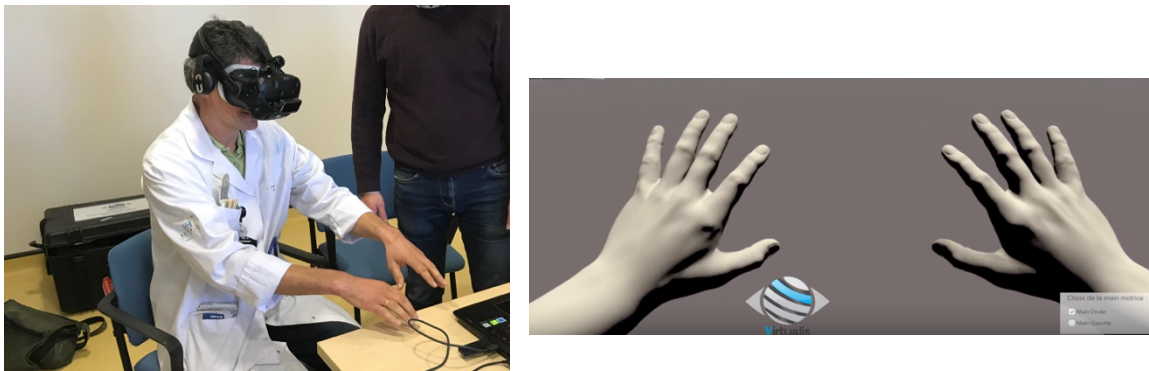


Figure 101 Intégration des mains virtuelles grâce au capteur Leapmotion fixé sur le casque.

La *déviat*ion prismatique virtuelle est créée numériquement par le logiciel et pré-paramétrée par l'examineur. Elle consiste en un décalibrage vers la droite ou vers la gauche des référentiels virtuels. Il s'agit d'une rotation des éléments virtuels par rapport à l'axe vertical du sujet (comme le font les prismes classiques) et non d'une translation.

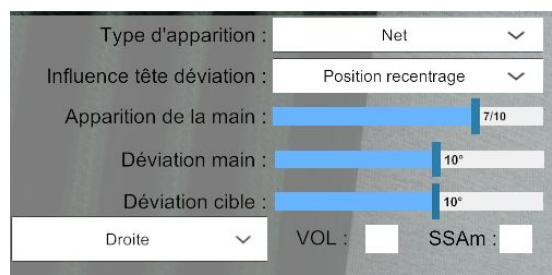


Figure 102 Une barre glissante permet de paramétrer l'ampleur de la déviation, allant de -25° (gauche) à $+25^{\circ}$ (droite).

Les différentes options permettent de dévier les mains virtuelles, les cibles virtuelles, ou l'environnement. Les différents éléments peuvent être déviés isolément ou ensemble, et à des valeurs différentes. Une option facultative permet de choisir une déviation progressive des différents éléments. La vitesse d'augmentation de la déviation est paramétrable. Michel C et al. en 2007 (145)

montraient qu'une déviation progressive de 2° en 2° restait inconsciente pour le patient et l'efficacité de l'adaptation était plus grande comparativement à une déviation immédiate à 10°.

La session d'exposition est entièrement paramétrable à l'avance. Un nombre illimité de séquences différentes peut être ajouté. Des temps de pause peuvent être ajoutés entre les séquences. Des options permettent d'ajouter des séquences d'évaluation de la négligence ou de l'effet d'adaptation par VOL (précision du pointage sans rétroaction visuelle) ou SSA-m (droit devant proprioceptif). Il est possible d'enregistrer une séquence type pour être facilement réutilisé plus tard.

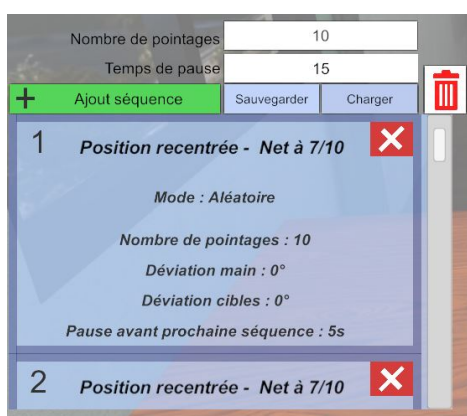


Figure 103 Le paramétrage de la séquence d'exposition.



Figure 104 Options permettant l'ajout de séquence d'évaluation de l'effet d'adaptation.

L'export des données de pointage se fait via un rapport enregistré au format .csv sous forme de tableau de valeurs.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Série	Pointage 1	Pointage 2	Pointage 3	Pointage 4	Pointage 5	Pointage 6	Pointage 7	Pointage 8	Pointage 9	Pointage 10	Pointage 11	Pointage 12	Pointage 13	Pointage 14
2	SSA-m de référence	0,175	-0,432	-0,18	-0,679	-0,504	1,093	0,358	-2,182	-1,617	-4,569				
3	VOL de référence	-2,204	-3,738	-2,535	-1,823	-2,451	-4,132	-3,263	-3,36	0,402	-0,708				
4	Exposition 10°	8,264	4,51	-0,324	1,677	2,193	1,875	1,353	-1,985	1,472	1,502	0,65	-0,631	-0,765	-1,586
5	SSA-m immédiat	-3,755	-3,747	-5,179	-5,621	-5,967	-7,05	-8,365	-7,815	-7,739	-7,941				
6	VOL immédiat	-5,351	-5,378	-3,376	-6,472	-4,58	-5,47	-5,449	-6,453	-4,947	-6,39				
7															
8	Série	Moyenne	Mode	Course Prox	Position réf	VOL	SSAM	Déviation m	Déviation ci	Nombre de p	Progressif	Variation ar	Variation ar	Valeur maximum	
9	SSA-m de référence	-0,853727	Aléatoire	Apparition p	Position recé	Non	Oui	0	0	10					
10	VOL de référence	-2,381207	Aléatoire	Apparition p	Position recé	Oui	Non	0	0	10					
11	Exposition 10°	0,1557384	Aléatoire	Apparition p	Position recé	Non	Non	10	10	100					
12	SSA-m immédiat	-6,317801	Aléatoire	Apparition p	Position recé	Non	Oui	0	0	10					
13	VOL immédiat	-5,386565	Aléatoire	Apparition p	Position recé	Oui	Non	0	0	10					
14															

Figure 105 Exemple de fichier d'export de données

Chapitre IV : Etude pilote sur sujets sains

Introduction

Nous avons réalisé une étude pilote afin de tester notre logiciel de pointage avec le principe des prismes virtuels. Celle-ci s'intéressait aux comportements de pointage chez des sujets sains, à des phases différentes d'exposition. Le but principal était d'étudier la tolérance et la faisabilité de cette technique. Le but secondaire était d'obtenir une idée de l'efficacité de l'outil virtuel.

Matériel et méthode

Sept sujets sains (3 femmes, 4 hommes, âge moyen $28,5 \pm 2,5$ ans) ont participé à l'étude. Six participants ont été classés comme droitiers et un comme gaucher d'après les résultats de l'Edinburgh Handedness Inventory (194) (cf. Annexe 2). Aucun d'entre eux n'avait de trouble moteur et tous avaient une vision normale (+/- avec lunettes correctrices). Tous les participants ont donné leur consentement éclairé et leurs caractéristiques ont été inscrites sur une feuille de recueil d'information (cf. Annexe 1). Les tests ont eu lieu sur la période du mois d'août 2019.

Un système Vive VR® (HTC Corp., Taoyuan, Taïwan) a été utilisé pour présenter les stimuli et induire un décalage pseudo-prismatique pendant l'adaptation. Les participants étaient assis tout en portant le casque VR et il leur était demandé de tenir un contrôleur dans leur main droite. L'écart pupillaire était préalablement mesuré et configuré pour chaque sujet. La position du contrôleur était suivie en temps réel par le système et reproduite dans l'espace virtuel. Le système a été calibré de sorte que le centre de l'espace virtuel tridimensionnel était aligné sur la ligne médiane du tronc du sujet.

Nous nous sommes basés sur les modalités optimales d'exposition prismatique de la littérature afin de garantir les meilleures conditions d'exposition. Même si différents paramètres d'exposition restent à valider (86), certains semblent quasi établis pour des effets bénéfiques cliniques optimaux :

- *L'amplitude de la déviation* : La déviation choisie et paramétrée était de 10° vers la droite. Les coordonnées 3D du contrôleur et des cibles étaient modifiées par un pré réglage. Afin de correspondre à l'exposition prismatique classique, nous avons décidé de décaler de la même angulation les membres supérieurs virtuels et les cibles. Avec les prismes classiques, de trop petites déviations sont inefficaces : Turton et al. (2010) (61) et Mancuso et al.

(2012) (195) ne rapportaient pas d'efficacité avec des déviations d'environ la moitié des valeurs les plus utilisées (allant de 10° à 20°). De trop grandes déviations fonctionnent mais le sujet risque de se rendre compte de l'adaptation ce qui peut être délétère pour l'efficacité. Nous n'avons pas utilisé la méthode de déviation progressive proposée par Michel C et al. en 2007.

- *Des mouvements actifs et rapides de pointage* étaient demandés aux sujets. Les mouvements actifs fonctionnant mieux que des mouvements passifs ou l'absence de mouvement (66). Le sujet devait voir son erreur pour engager les mécanismes de plasticité cérébrale. Des mouvements rapides seront plus efficaces car moins compensables de manière proactive par processus cognitif d'apprentissage ou par feedback visuel en temps réel.
- *Démasquer la partie distale du mouvement* de pointage uniquement. Nous avons masqué numériquement la course proximale du mouvement de pointage et laissé apparaître le pointeur virtuel uniquement à la fin de la trajectoire. L'apparition se faisait au 9/10^{ème}. Cela permettait de supprimer le rétro contrôle visuel en temps réel du membre supérieur et de favoriser le phénomène d'adaptation. Làdavas en 2011 (89) ou Herlihey et al. en 2012 (196) avaient comparé une procédure d'adaptation où seule la partie terminale du pointage était visible contre une procédure avec deuxième moitié du mouvement de pointage visible. Les deux procédures amélioraient la NSU mais la première procédure était significativement meilleure que la deuxième.
- *Le nombre de cible* était de deux. Le nombre optimal de cibles a été étudié (197) (198) (199). L'efficacité est la même avec 5 ou 6 cibles et au moins deux cibles doivent être utilisées. Si une seule cible est présente, il n'existe que l'effet de compensation cognitive par apprentissage car le système sensori-moteur ne se remet pas en question à chaque nouveau pointage.
- *L'emplacement des cibles* : Les cibles ont été placées automatiquement à -10° et +10° de déviation de part et d'autre de la ligne centrale, comme cela se fait classiquement mais uniquement de manière consensuelle. Par convention lors des expérimentations avec les prismes, la cible n'est jamais placée dans l'axe du patient puisque c'est cet emplacement qui est utilisé pour mesurer les effets consécutifs lors des différents tests.

- *Les cibles* utilisées étaient statiques car aucune étude ne s'est encore intéressée au fait d'utiliser des cibles dynamiques plutôt que fixes car le signal d'erreur, majoré, aurait complexifié l'analyse des données expérimentales sur les systèmes classiques d'analyse du mouvement. En revanche, la réalité virtuelle ouvre cette possibilité, ce qui en fait une piste d'amélioration de l'adaptation prismatique à explorer secondairement. Cela pourrait conduire à une meilleure remise en question du référentiel sensorimoteur à chaque pointage.
- *Le nombre de pointage* était de 100 pour les phases d'exposition prismatique virtuelle, et de 10 pour les phases de quantification de l'effet d'adaptation (afin de réaliser une moyenne). Fortis et al. (2010) (69) ont constaté que l'adaptation a lieu dans les 45 premiers essais avec un effet plafond une fois ce chiffre atteint, mais que les 45 pointages suivants pourraient avoir un effet de consolidation de l'adaptation (67) (66). 60 pointages minimum doivent être réalisés à chaque séance d'exposition (197) (198) (199).

La méthode d'évaluation des effets consécutifs reposait sur l'utilisation des programmes informatiques de VOL et SSA-m, précédemment créés, qui mesurent respectivement la précision du pointage en boucle ouverte, et le droit devant proprioceptif.

Les données de déviation angulaire ont été recueillies automatiquement par le logiciel pour tous les participants et une vue en graphique permettait de rapidement visualiser les scores de pointage.

Une seule séance d'adaptation était proposée aux sujets sains. La séquence d'exposition était la suivante (cf. annexe 1) :

Tests pré exposition

- Test du logiciel de pointage sans déviation prismatique : 10 pointages avec apparition de la main aux 1/10^{ème} puis 10 pointages avec apparition de la main aux 9/10^{ème}.
- Mesure de référence du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure de référence de l'effet d'adaptation par VOL.

Exposition (adaptation prismatique virtuelle)

- 100 pointages en mode aléatoire, 10° de déviation vers la droite, décalage non progressif.
- Mesure immédiate du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure immédiate effet d'adaptation par VOL.

----- 60 secondes de pause -----

Test post exposition

- Mesure retardée du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure retardée de la décroissance de l'effet d'adaptation par VOL.

Recalibrage

- 100 pointages en mode aléatoire, 0° de déviation.
- Mesure après recalibrage, du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure après recalibrage, de l'effet d'adaptation par VOL.

Questionnaire de tolérance (Simulator Sickness Questionnaire)

Faisabilité

Il n'y a eu aucun obstacle à la réalisation de la séance d'adaptation pour chacun des sujets sains. Aucun sujet n'a été exclu. Le temps d'installation et de réglage était de l'ordre de 5 minutes. Le temps de passation total de la séquence (tests/exposition/tests/recalibrage) était d'environ 15 minutes. (Une session d'exposition rééducative pour les patients devrait être à terme d'environ 8 minutes, car sans recalibrage). L'adhésion des sujets était bonne mais ils trouvaient la plupart du temps l'exercice long et répétitif car la séquence de pointage était particulièrement longue et il y avait une séquence supplémentaire de recalibrage. Au total 300 pointages étaient réalisés pour chacun des sujets.

Les données ont été inspectées manuellement à la recherche de données extrêmes reflétant des bogues dans l'acquisition des coordonnées dans l'espace. Sur 2100 pointages (300 pointages x 7 sujets), seul 33 (soit environ 1,57%) ont dû être exclus afin de ne pas fausser les résultats (ils étaient éloignés de la moyenne de plus de 3 écarts types). Ils auraient probablement pu être évités en plaçant les bases infrarouges plus proche du sujet afin de réduire les aberrations de coordonnées.

Tolérance

Pour évaluer la tolérance, nous avons utilisé le questionnaire du mal des simulateurs (Simulator Sickness Questionnaire) développé par Kennedy en 1993 (200). Ce questionnaire est une auto évaluation concernant 16 symptômes couramment retrouvés après exposition à un simulateur. A notre connaissance, il n'existait aucun questionnaire, validé ou non, de tolérance en réalité virtuelle. Nous avons également recueilli tous les autres symptômes décrits par les sujets. Les items du questionnaire étaient :

Inconfort général - Fatigue - Maux de tête - Fatigue visuelle - Difficulté d'accommodation - Salivation - Sueurs - Nausées - Difficulté de concentration - Plénitude de la tête - Vision trouble - Vertiges yeux ouverts - Vertiges yeux fermés - Étourdissements - Estomac lourd - Éructation

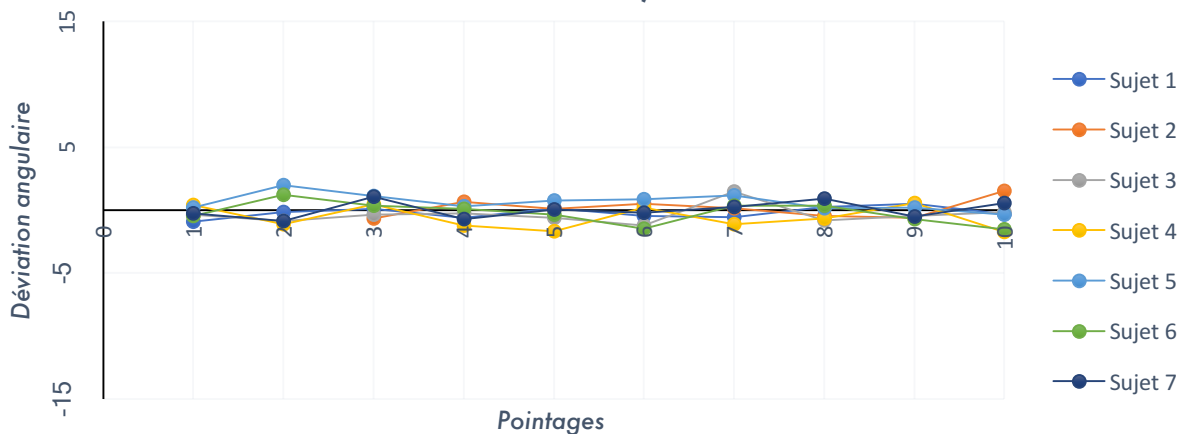
La cotation se fait en points : 0 = absent, 1 = léger, 2 = modéré, 3 = sévère.

Sur les sept sujets sains, un seul a ressenti un effet indésirable lié au port du casque de réalité virtuelle. Celui-ci était une fatigue visuelle, qui était légère et réversible au bout de quelques minutes. Son score au « Simulator Sickness Questionnaire » était donc de 1. Tous les autres participants avaient un score de mauvaise tolérance à 0. A noter que seul un sujet avait déjà utilisé un dispositif de réalité virtuelle immersif par le passé.

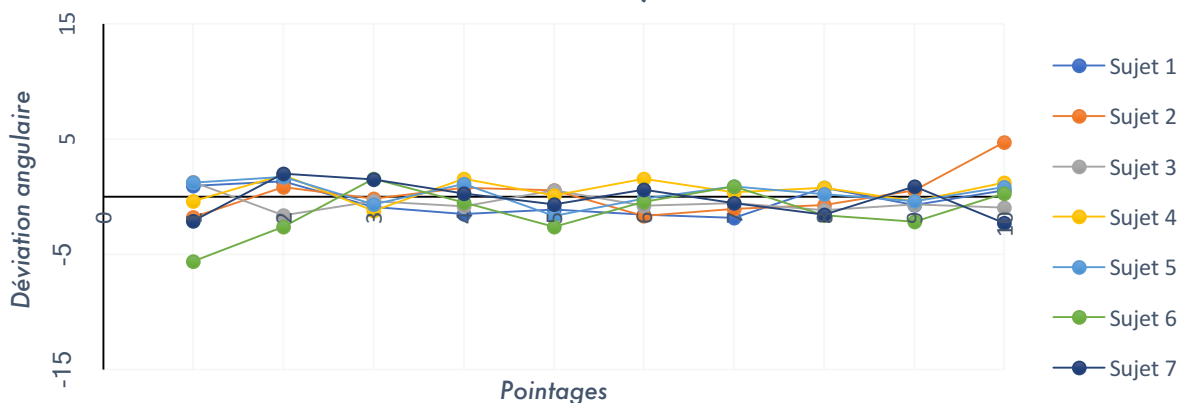
Efficacité

Nous avons observé les différents profils de réponse selon la phase d'exposition et sur une vue graphique. En abscisse, les différents pointages, en ordonnée, l'erreur de pointage en degrés par rapport à l'axe central du patient. Les angles positifs correspondent à une déviation vers la droite, et inversement.

Test du logiciel de pointage sans déviation, apparition main aux 1/10eme

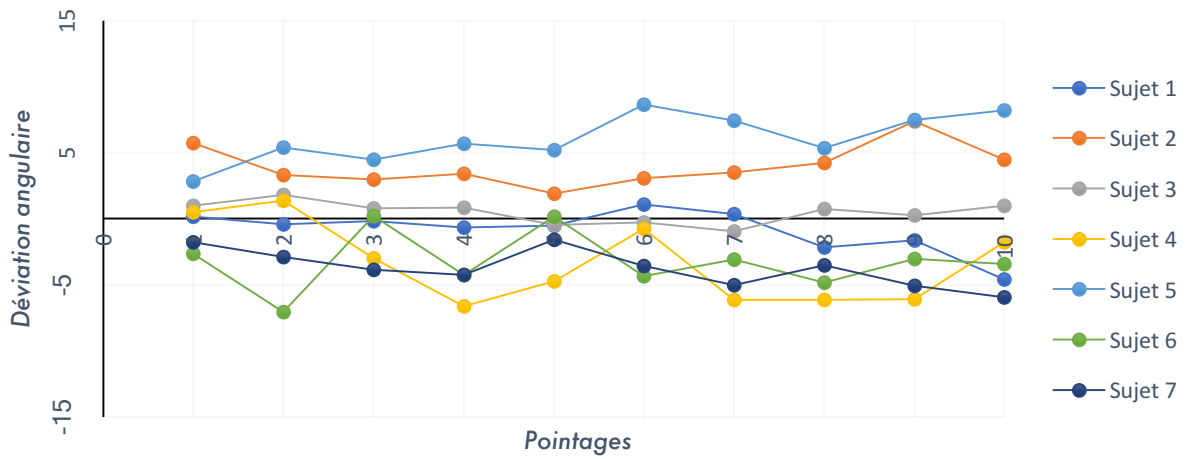


Test du logiciel de pointage sans déviation, apparition main aux 9/10eme

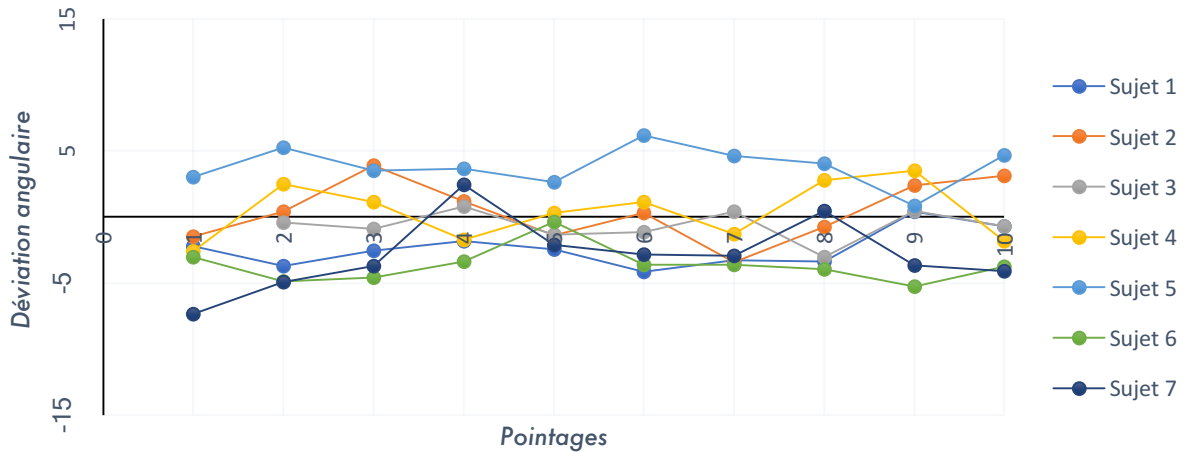


Sur ces deux premiers graphiques sont représentés les pointages de la phase test pré exposition prismatique. Ces épreuves de pointage sans déviation permettaient au sujet de s'habituer au logiciel et à la consigne de pointage. Comme attendu, les pointages sont tous très proches de la ligne centrale. Les moyennes des déviations angulaires étaient respectivement de $-0,08^\circ$ (écart type = 0,39) et $-0,19^\circ$ (écart type = 0,62).

SSA-m de référence

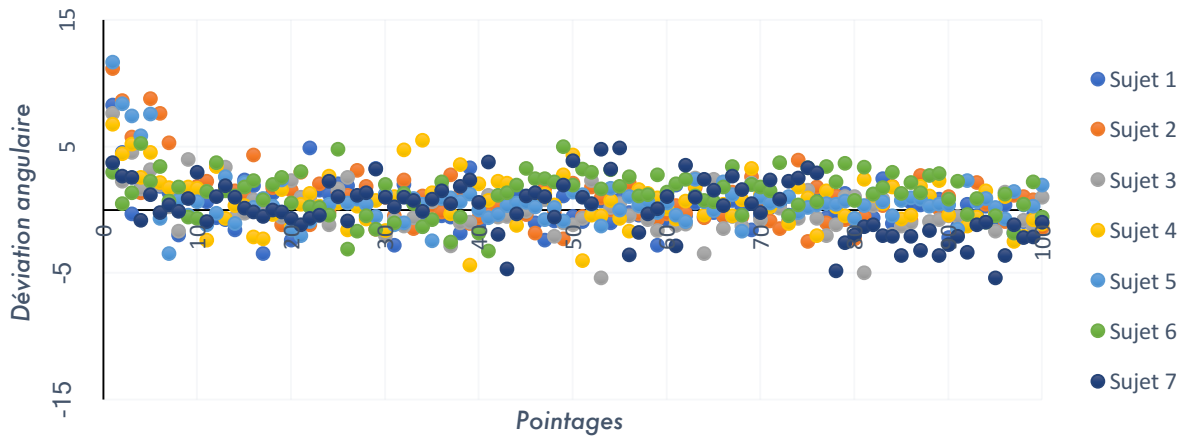


VOL de référence



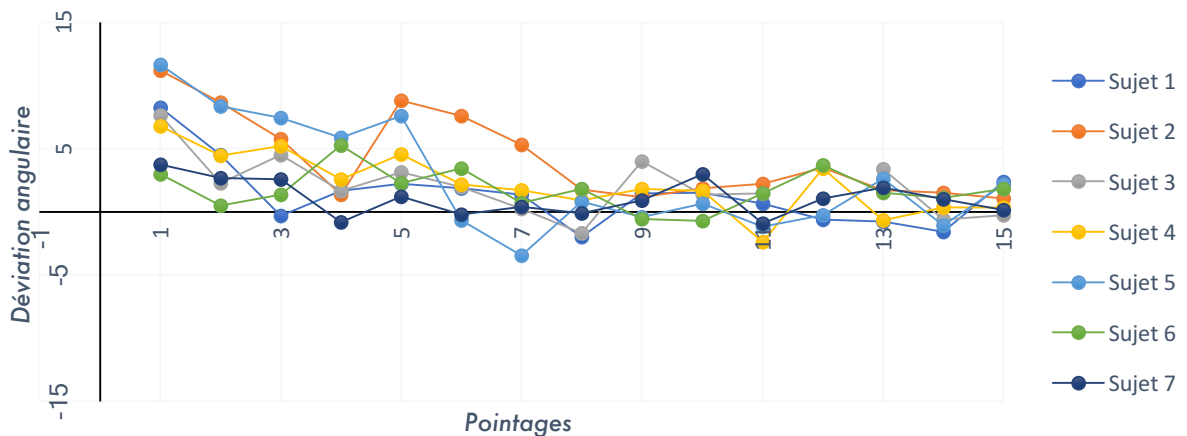
Sur ces deux graphiques sont représentés les pointages de la phase d'évaluation avant adaptation prismatique. Le SSA-m et le VOL de référence permettaient de connaître, respectivement, le droit devant manuel proprioceptif, et l'adéquation visuo-proprioceptive de chaque sujet. Les résultats sont plus hétérogènes selon les sujets, probablement de par l'absence de rétroaction visuelle durant le pointage ou par variation interindividuelle du référentiel proprioceptif. Cependant, ils restent globalement autour de l'axe central, de part et d'autre de celui-ci, avec des déviations n'excédant pas 5°. Les moyennes des déviations angulaires étaient respectivement de $-0,08^\circ$ (écart type = 3,86) et $-0,69^\circ$ (écart type = 2,56).

Exposition, 10° de déviation vers la droite



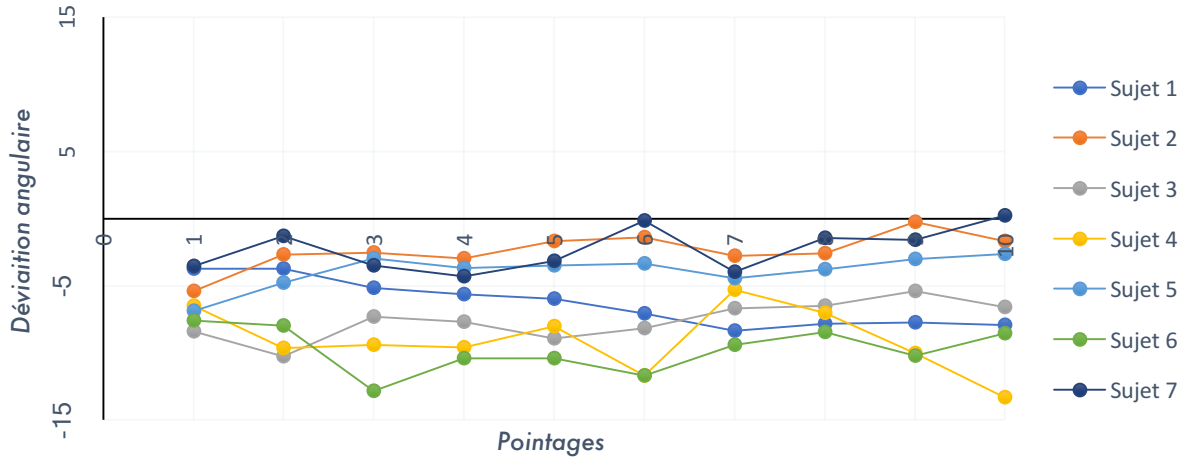
Sur ce graphique sont représentés les 100 pointages de la phase d'adaptation prismatique virtuelle. Les cibles virtuelles, ainsi que le pointeur virtuel étaient déviés de 10° vers la droite. Le résultat obtenu est parfaitement en accord avec les résultats classiques obtenus avec des prismes standards lors de l'exposition, à savoir : les tous premiers pointages sont déviés d'environ 10° vers la droite et il faut en moyenne 8 pointages successifs, pour que le sujet se corrige progressivement et atteigne la ligne médiane. La moyenne des déviations angulaires était de -0,42° (écart type = 0,94).

Exposition, 10° de déviation vers la droite (Zoom)

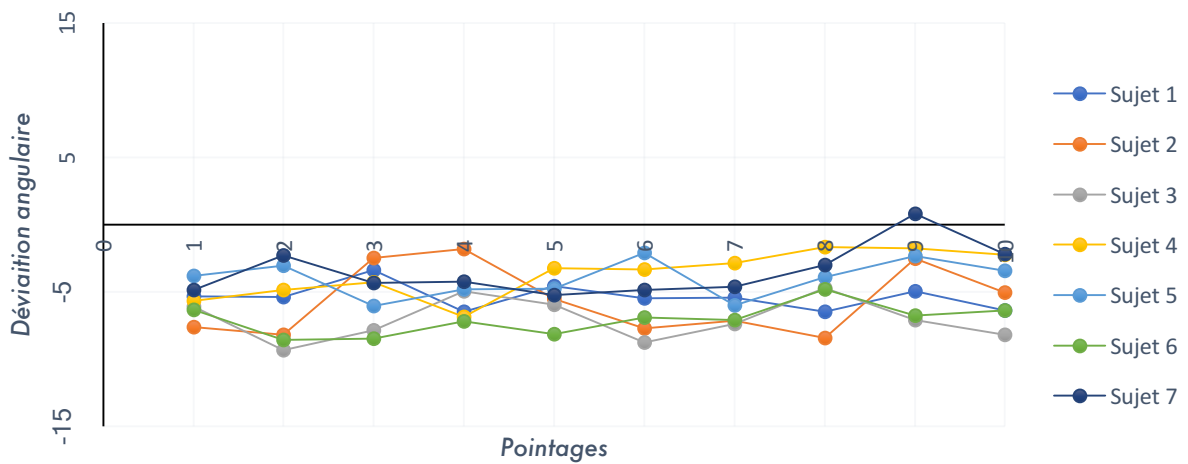


Ci-dessus une vue agrandie sur les 15 premiers pointages, avec leurs courbes de tendance se rapprochant de la ligne médiane.

SSA-m immédiat post exposition



VOL immédiat post exposition



Les deux graphiques ci-dessus, représentent les pointages d'évaluation par SSA-m et VOL de la phase post adaptation prismatique immédiate. On remarque que juste après la session d'adaptation prismatique virtuelle, tous les sujets sains présentent les effets consécutifs des prismes, à savoir une déviation d'environ 5 à 10° vers la gauche (dans la direction opposée aux prismes). Les moyennes des déviations angulaires étaient respectivement de -5,9° (écart type = 3,09) pour le SSA-m et -5,18° (écart type = 1,51) pour le VOL ce qui représente 59 % et 52 % de la déviation prismatique virtuelle utilisée (10°).

Une analyse de la variance n'a pas été possible car il n'y avait pas d'homogénéité des variances (le test de Levene était statistiquement significatif). Un test non paramétrique a mis en évidence un effet intervention ($p < 0.001$). Le logiciel d'analyse statistique utilisé était JASP v.0.10.

	SSA-m	VOL
Avant exposition	-0,08° (écart type = 3,86)	-0,69° (écart type = 2,56)
Après exposition	-5,9° (écart type = 3,09)	-5,18° (écart type = 1,51)
p	$p < 0.001$	$p < 0.001$

Figure 106 Tableau récapitulatif avant/après exposition.

Il en ressortait donc une différence statistiquement significative entre les pointages pré- et post-exposition pour l'ensemble des sujets ($p < 0.001$) et concernant les deux épreuves de test (SSA-m et VOL).

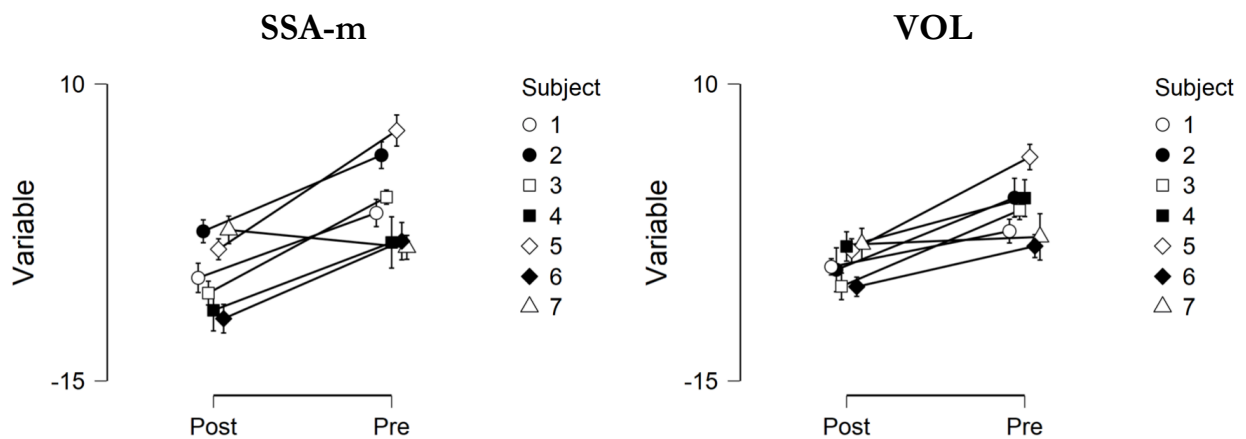
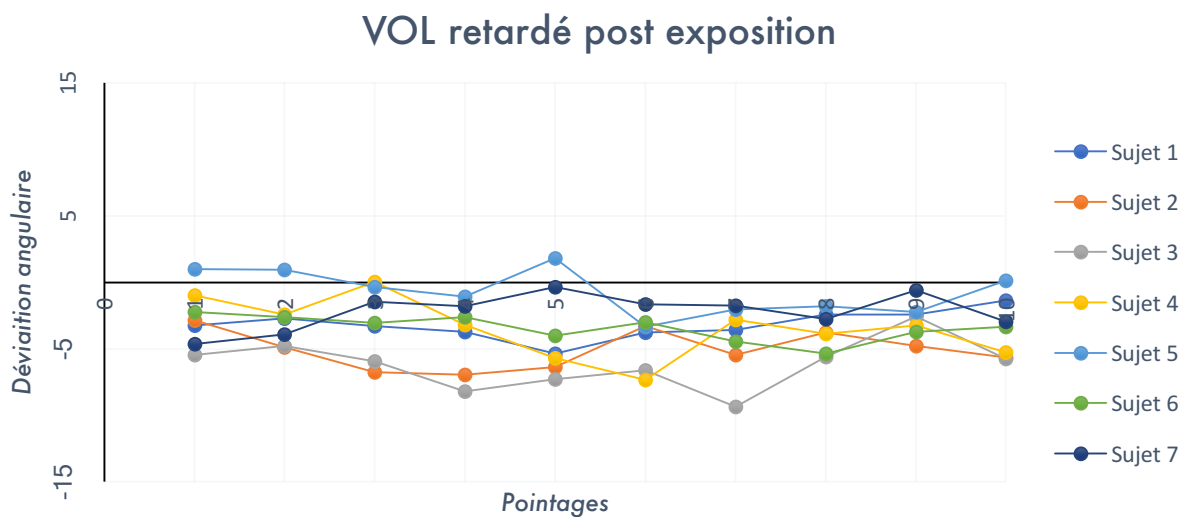
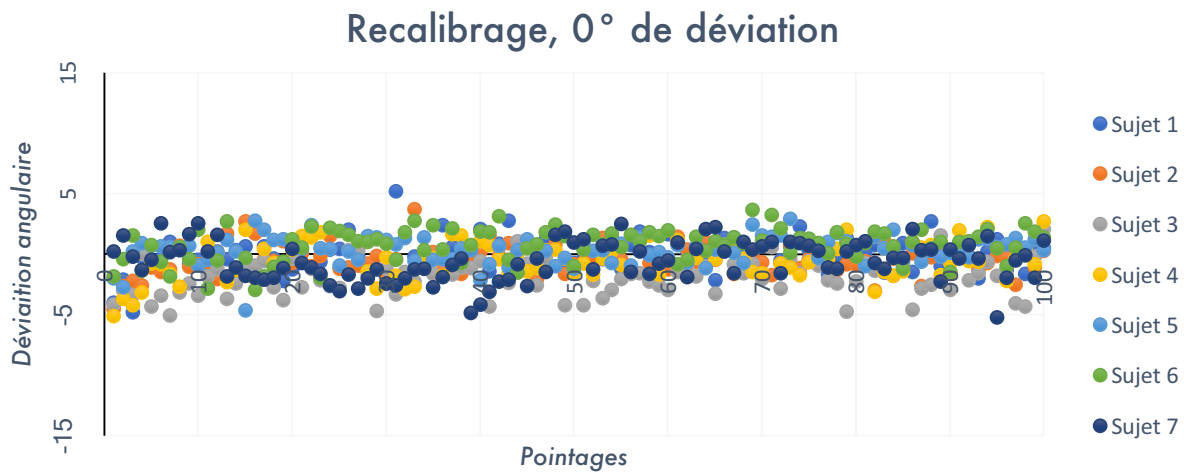


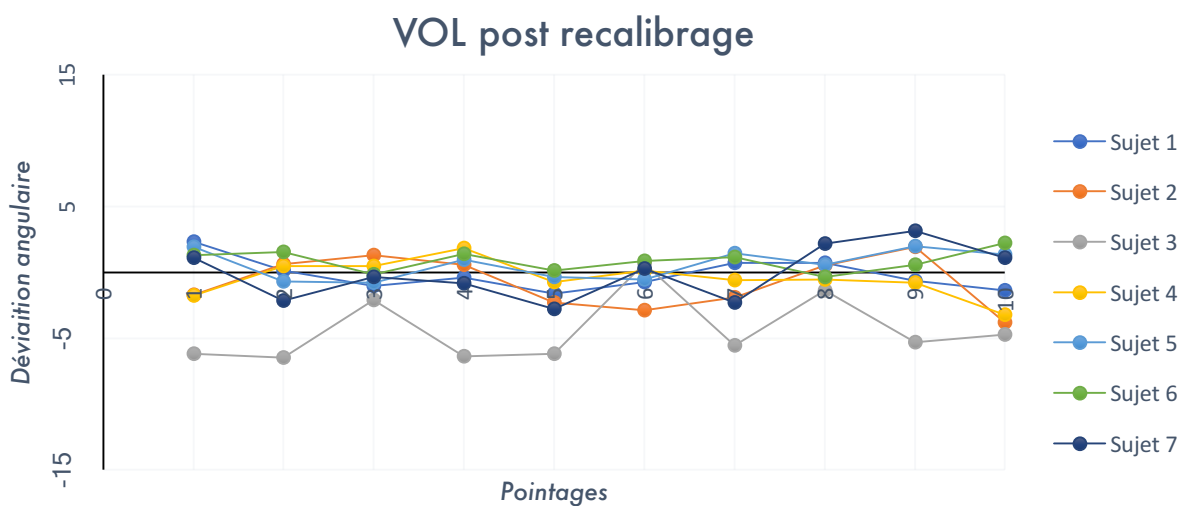
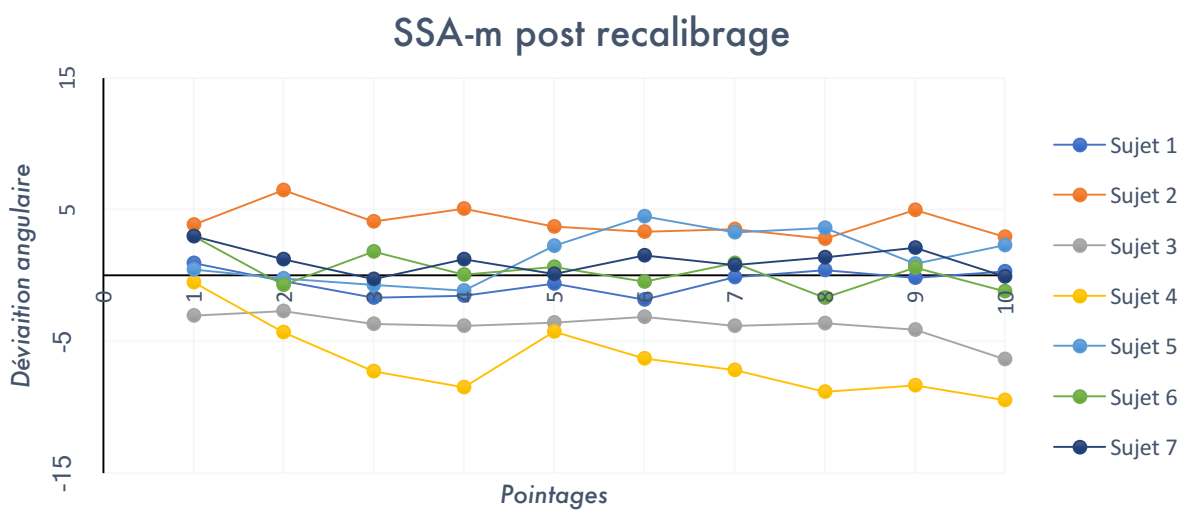
Figure 108 Représentation de la différence avant/après exposition, pour chaque individu (en degrés).



Les deux graphiques ci-dessus, représentent les pointages d'évaluation par SSA-m et VOL de la phase post adaptation prismatique retardée. Ces phases faisaient suite à une courte pause de 1 minute après l'évaluation immédiate. On remarque qu'après une courte pause, le référentiel égocentré des sujets sains a tendance à se rapprocher de la ligne médiane, tout en restant légèrement dévié vers la gauche. Les moyennes des déviations angulaires étaient respectivement de $-1,88^\circ$ (écart type = 3,83) et $-3,45^\circ$ (écart type = 1,79).



Le graphique ci-dessus montre la phase de recalibrage durant un exposition sans déviation avec 100 pointages. On note une légère persistance des effets consécutifs en tout début d'exposition (les premiers pointages sont légèrement trop déviés vers la gauche). Puis rapidement, les sujets se réalignent sur l'axe central. La moyenne des déviations angulaires était de $-0,07^\circ$ (écart type = 0,89).



La robustesse de l'adaptation a été évaluée par une épreuve SSA-m et VOL après la procédure de désadaptation. Les moyennes des déviations angulaires étaient respectivement de $-0,53^\circ$ (écart type = 3,54) et $-0,63^\circ$ (écart type = 1,74).

Chapitre V : Discussion

Discussion

Nous avons pu réaliser 4 outils diagnostiques complémentaires de la négligence. Ils sont tous inspirés d'épreuves existantes et validées dans leur forme standard mais qui présentaient des lacunes.

Les 3 premiers (VOL, SSA-m, SSA-v) permettent de se rendre compte et chiffrer précisément le décalage du repère égo-centré du patient mais également de quantifier l'effet consécutif de l'adaptation prismatique après exposition. Leurs versions originales sont difficiles à acquérir, manier, et mettre en place. Nos versions virtuelles permettent d'automatiser et de faciliter le processus de passation car les données sont recueillies et sauvegardées automatiquement. Ces mesures peuvent potentiellement nous aider à mieux repérer les patients répondeurs à l'adaptation prismatique (74).

Les tests papiers-crayon dans leurs formes informatisées sont capables d'identifier les déficits subtils qu'un test papier-crayon statique pourrait manquer. De plus, les méthodes traditionnelles peuvent manquer de validité écologique (93) (202), et il n'y a souvent aucune correspondance entre la performance à la tâche et la performance dans la vie réelle. Enfin, ces protocoles prennent beaucoup de temps et sont fastidieux tant pour les thérapeutes que pour les patients. Le test des cloches virtuel que nous avons développé devrait permettre d'étudier des degrés de profondeurs différents de la négligence, chose que ne font pas les classiques épreuves papier-crayon. L'implémentation future d'une fonction de suivi oculaire par eye-tracking est une piste intéressante. Des cloches et des distracteurs dynamiques ou sonores pourraient également être utilisés.

Il faudra réaliser par la suite des études comparant les versions virtuelles par rapport à leurs versions originales et une mesure de leur spécificité et sensibilité.

Avec notre outil d'adaptation prismatique virtuelle, les contraintes liées au matériel standard sont inexistantes. Par exemple, le masquage de la partie proximale du pointage est plus fiable et précis, ce qui est essentiel (68). Notre logiciel actuel ne prévoit pas d'avertissement de vitesse pour les mouvements de pointage trop lents ou trop rapides bien qu'il serait facile de l'implémenter. Ces derniers points nécessitent normalement une supervision humaine constante pendant l'adaptation prismatique standard ce qui donne un avantage à notre outil.

L'analyse approfondie de la littérature sur les conditions optimales d'exposition prismatique standard nous a permis de développer notre logiciel dans les conditions les plus productives en termes d'effets consécutifs. Notre outil immersif permet de superposer les référentiels spatiaux réels et virtuels, au contraire de programmes déportés sur écran 2D. Veilleux et al. (189) avaient d'ailleurs montré en 2015, que contrairement à ce que l'on pensait, un véritable réaligement responsable d'effets consécutifs se produisait bel et bien dans un contexte virtuel. Selon eux, la quantité d'adaptation est fonction du degré de congruence entre l'information proprioceptive et visuelle. Norris et al. 2001 (190) suggéraient que le niveau d'adaptation était proportionnel au degré de réalisme de la représentation de l'effecteur.

La réalité virtuelle permet de dissocier facilement les différentes modalités d'interactions avec les objets et donne la capacité d'introduire des combinaisons impossibles ou difficiles à réaliser dans le monde réel (185), comme par exemple de grandes déviations ou des déviations différentes entre les mains, cibles et environnements virtuels. Cela pourrait ouvrir la voie à de nouveaux types d'études sur la physiopathologie de ce trouble. En effet, la question de la déviation virtuelle est complexe. Correspond-elle strictement à une déviation prismatique classique ? En effet, les prismes classiques dévient tous les éléments visibles (mains, cibles, environnement) sans distinction, et selon la même angulation. En réalité virtuelle, nous pouvons dévier les différents éléments (les mains virtuelles, l'environnement virtuel, les cibles virtuelles) comme le feraient les prismes, mais il n'existe pas de cibles réelles. L'interaction cible réelle/cible virtuelle et environnement réel/environnement virtuel ne peut pas exister. Seules les mains (ou le contrôleur) existent à la fois en réel et en virtuel et interagissent entre elles. La question de la pertinence de dévier virtuellement les éléments autres que les mains virtuelles se pose alors : faut-il dévier la totalité des 3 éléments (mains, cibles, environnement) comme le font les prismes ? Ou bien seule la déviation des mains virtuelles suffit pour permettre le conflit visuo-proprioceptif ? Quoi qu'il en soit, la déviation de l'environnement et des cibles seules (sans dévier les mains virtuelles) ne peut pas créer d'adaptation, car les interactions sensori-motrices dans le monde virtuel sont indépendantes de celles du monde réel. Il n'y a aucune corrélation (autre que les mains) entre les objets du réel et les objets virtuels. La notion même de déviation isolée de l'environnement virtuel n'a pas de sens, puisque celui-ci est totalement indépendant par rapport à l'environnement réel.

Une autre question reste en suspens : Est-il si important de constater l'erreur de pointage en voyant uniquement la partie distale du pointage ? N'est-ce pas une contrainte directement liée aux limites du prisme standard ? Peut-on s'en passer avec des prismes virtuels ? Existera-t-il un effet consécutif si on fait interagir le sujet dans un environnement virtuel avec uniquement les bras déviés, avec rétrocontrôle visuel permanent de ses bras et en effectuant tout type d'interactions sensorimotrices ? Si oui, cette méthode s'appuie-t-elle strictement sur les mêmes mécanismes que l'adaptation prismatique ? Gammeri et al. en 2018, constituant une des deux autres équipes travaillant

parallèlement sur l'adaptation virtuelle immersive (187), pensent que pour induire un effet d'adaptation alors que le contrôleur virtuel est en permanence visible par le sujet, il faut induire le décalage prismatique virtuel très progressivement. De cette façon, le sujet ne se rend pas compte de la déviation qui peut atteindre des chiffres élevés, et ne compense pas par recalibrage cognitive (ce qui ne produit pas d'effet d'adaptation).

D'autres questions méritent d'être étudiées par la suite : l'aspect réaliste des membres supérieurs est-il indispensable ? Un feed-back visuel indirect suffirait-il ?

A l'avenir, il sera intéressant d'implémenter des fonctionnalités pouvant optimiser la rééducation de la négligence, comme l'utilisation de scènes se rapprochant des activités de vie quotidienne, des tâches fonctionnelles (191), des pointages de cibles et objets dynamiques dans tout l'espace tridimensionnel, un couplage à la technique de balayage visuel, du eye-patching, une méthode virtuelle d'activation de membre, ou encore d'utiliser un indiçage sonore spatialisé pour guider l'attention (203). Le eye-tracking (suivi oculaire) pourrait être implémenté afin de fournir au thérapeute une carte de chaleur des endroits regardés par le patient durant le jeu. Il faudra également rendre le jeu le plus ludique possible afin de favoriser l'adhérence et varier les tâches de pointages (jeu de tir, de lancer, suivi de trajectoires, dessins, préhension d'objets...). Siraishi et al. en 2008 (204) avaient, par exemple, eu l'idée d'ajouter un aspect ludique à ses tâches de pointage sous prismes (jeux de quille traditionnel japonais, jeu de chevilles, lancer de fléchette...) pour lutter contre l'effet rébarbatif des pointages utilisés jusqu'alors. Sa simplification pourra peut-être permettre un programme de rééducation à domicile comme ont proposé certains auteurs avec les prismes classiques (205).

Nous pouvons tout de même citer quelques limites théoriques à notre outil. On peut se poser la question de la tolérance du dispositif chez des patients avec de sévères troubles cognitifs, ou de la difficulté de compréhension des consignes, bien qu'il en soit de même avec les prismes classiques. Les troubles moteurs pour tenir le contrôleur ne sont théoriquement pas problématiques chez les sujets négligents puisque leur main ipsilésionnelle est saine. De rares bogues dans l'affichage du contrôleur peuvent altérer le sentiment d'immersion du patient et compromettre les pointages. Le dispositif actuel est relativement volumineux et avec de nombreux câbles puisque nécessite des bases infrarouges de part et d'autre de la pièce, un ordinateur et une table. Les tout premiers casques tout-en-un, puissants, sans fils, et sans capteur infrarouge externe sont en train de voir le jour (ex : Oculus Quest, mai 2019) et devraient permettre d'améliorer l'installation et la facilité d'utilisation. Des salles dédiées devront probablement être mises en place dans les centres de rééducation. Pour une utilisation clinique, les critères d'hygiène devront également être pris en compte car ces casques n'ont pas été créés comme du matériel médical. Il est donc par exemple difficile de les stériliser, mais il existe des accessoires d'hygiène à usage unique.

La réalité virtuelle immersive doit être considérée comme un nouvel outil thérapeutique à part entière et, en ce sens, mérite d'avoir une vision claire concernant ses effets indésirables potentiels ainsi

que ses contre-indications. Pour le moment, seuls les conseils d'utilisation des fabricants sont disponibles et aucune étude spécifique de tolérance n'a été réalisée, notamment chez des patients neurologiques.

Les résultats de nos essais sur 7 personnes saines suggèrent qu'il est probablement possible de générer un effet consécutif prismatique chez des sujets sains en utilisant la technologie par réalité virtuelle immersive avec déviation prismatique simulée. Du fait de la petite taille de notre échantillon, de l'absence de groupe contrôle et de la non randomisation, il était impossible de conclure quant à l'efficacité de la méthode. Néanmoins, cette étude pilote de faisabilité nous a permis d'observer les différents profils de réponse selon la phase d'exposition et ceux-ci semblent cohérents avec les résultats de la littérature existante sur le sujet.

Deux études récentes (206) (207) en imagerie fonctionnelle avaient déjà montré que la modification de la rétroaction visuelle de la position de la main en réalité virtuelle pouvait affecter les zones du cerveau impliquées dans l'adaptation prismatique. Lors de nos tests, les premiers pointages lors de l'exposition prismatique virtuelle sont déviés vers la droite puis les utilisateurs se sont corrigés pour rapidement atteindre la cible. On peut supposer que, comme dans la littérature (208), les premiers pointages correspondent à un recalibrage, et les pointages suivant à un réalignement sensorimoteur. Après l'exposition, les effets consécutifs moyens vers la gauche, représentaient environ 50 à 60% de la valeur de la déviation prismatique, ce qui est superposable aux chiffres de la littérature sur les prismes standards (67) et sans que l'on en comprenne les mécanismes. Un sujet (sujet 7) semble cependant ne pas répondre aux prismes mais les conditions d'exposition d'étaient pas optimales (non port des lunettes de vue par souhait du sujet). Sur le graphique du SSA-m pré-exposition, on remarque que deux sujets présentaient un droit devant naturellement dévié à droite (sujet 2 et sujet 5). Après exposition, ces deux mêmes sujets ne montraient que de faibles effets consécutifs négatifs, mais tout de même significatifs par rapport à leurs scores initiaux ($p < 0.001$).

Les épreuves d'évaluation après une courte pause suggèrent que les effets consécutifs de l'adaptation prismatique ne sont que temporaires chez le sujet sain et cela est en accord avec la littérature étudiant les prismes classiques.

Dans nos tests, une simple procédure de recalibrage a permis de réaligner le référentiel sensorimoteur des sujets (leurs pointages se superposaient à leurs évaluations de référence avant exposition) et permettait de quantifier la faible robustesse de l'adaptation produite chez les sujets sains. Cependant, un seul sujet (sujet 4) semblait présenter de légers effets consécutifs persistants sur le SSA-m, même après désadaptation à 0°. A noter que ce sujet était le seul de l'échantillon à être gaucher, ce qui peut nous questionner sur les mécanismes cérébraux de l'adaptation prismatique chez ces sujets particuliers.

Nos résultats de pointage sont en tout point concordants avec les deux seules autres études utilisant le même procédé que le nôtre en réalité virtuelle immersive : celle de Gammeri et al. en 2018 (187) et celle de Ramos et al. en 2019 (188). Gammeri (187) utilisait un simple décalibrage en translation du logiciel pour induire un effet de prisme virtuel et montrait que les sujets sains avaient toujours un effet consécutif des prismes, mais que le transfert à des tâches de bissection de ligne ne survenait qu'au-delà d'un seuil de déviation de 30° vers la droite. Ramos et al. en 2019 (188) montraient que pour une même déviation qu'avec des prismes, les effets consécutifs étaient étonnamment meilleurs en virtuel (moins de distractions ?), et qu'il n'y avait pas de différence entre une translation ou une rotation. Ces deux études très récentes ont été réalisées par deux équipes qui travaillaient indépendamment de nous, sur le même sujet que le nôtre, ce qui témoigne du fort engouement actuel pour ce genre de technologie en rééducation neurologique. Il a été rassurant de constater que les deux autres équipes ont utilisé les mêmes technologies (casque HTC Vive), et quasiment les mêmes procédures (Gammeri (187), Ramos et leurs équipes (188) ont utilisé un plan frontal virtuel ou étaient disposées les cibles, alors que notre protocole utilisait une table virtuelle et réelle car s'efforçait de reproduire le plus fidèlement possible le protocole d'exposition prismatique originel décrit dans la littérature). Ces études n'ont pu que nous conforter dans nos hypothèses et renforcer la validité scientifique des prismes virtuels.

Notre courte étude pilote tend également à montrer que l'exposition prismatique virtuelle est une technique facilement utilisable et bien acceptée par les sujets exposés. Elle permettait la réalisation d'un grand nombre de pointages en un temps limité. Cependant, un bon paramétrage de la pièce et du matériel est important afin de diminuer le nombre de bogues lors de la capture des coordonnées de pointage. La technique n'a été responsable d'aucun effet indésirable grave ou durable. Cependant, il est tout de même crucial de tenir compte des effets secondaires transitoires potentiels de tels dispositifs, tels que la cyber-cinétose. La tolérance n'a, à notre connaissance, jamais été étudiée chez des patients avec atteinte neurologique et la prudence est donc indiquée.

Cependant notre étude reste une étude pilote de faisabilité et de tolérance et il est difficile de conclure à l'efficacité car le design de l'étude n'était pas prévu pour cela. Les limites de notre protocole pilote reposent également sur le fait que nous évaluions les effets consécutifs des prismes virtuels avec des outils numériques de mesure du VOL et du SSA-m, alors que ceux-ci ne sont pas validés dans leurs versions en réalité virtuelle. Mais ces résultats encourageants suggèrent la nécessité de réalisation d'études futures sur le sujet. Elles devront être randomisées, contrôlées, et devront évaluer prismes classiques contre prismes virtuels, prismes virtuels contre déviation placebo, mesure du SSA-m et du VOL classique contre mesure en réalité virtuelle. D'autres études devront s'attarder sur les réglages optimaux du logiciel pour produire un maximum d'effets consécutifs et les plus durables.

Notre étude s'est intéressée aux sujets sains ; or, il n'est pas clair que l'induction d'un biais de type négligence chez les sujets sains peut être considérée comme un bon modèle des effets de

l'adaptation prismatique chez les patients négligents. Nous n'avons mesuré que des effets d'adaptation (SSA-m et VOL) et non des effets de transfert comme pourrait le faire une épreuve de bissection de ligne par exemple. Ces épreuves impliquent la visualisation de la main ou du contrôleur dans sa position réelle et nous ne voulions pas affecter la vitesse de recalibrage cognitif des sujets afin de mesurer la robustesse de l'adaptation prismatique (99). Il reste également à savoir si l'adaptation prismatique virtuelle ne s'applique qu'à des mesures spécifiques de la performance ou à des sous-types spécifiques de négligence, et si elle peut affecter les activités de vie quotidienne des patients négligents.

Conclusion

La difficulté de la rééducation du syndrome de négligence unilatérale réside dans son intrication avec de nombreuses autres déficiences, qu'elles soient motrices (hémiplégie, trouble de l'équilibre postural, pusher-syndrome), sensorielles (hémianesthésie, hémianopsie latérale homonyme, hémiaouïe) mais également cognitives (troubles visuoconstructifs, extinction sensorielle, déficit de la mémoire visuo-spatiale, anosognosie et troubles apparentés). Les incapacités du patient sont directement liées à l'ensemble de ces déficiences. De ce fait, il semble primordial de ne pas proposer une rééducation seulement orientée sur le trouble visuo-spatial.

La réalité virtuelle devrait permettre à terme de pouvoir intégrer une approche beaucoup plus globale de la rééducation en tenant compte des différents déficits présents. L'apparition des casques de réalité virtuelle pour le grand public multiplie considérablement le nombre de projets possible dans notre spécialité, comme en témoigne les publications qui commencent à être apparaitre, ainsi que les créations de nouvelles startups spécialisées dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE

1. Heilman KM, Valenstein E. Mechanisms underlying hemispatial neglect. *Ann Neurol.* févr 1979;5(2):166-70.
2. 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.
3. 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.
4. Potet A, Bastier A, Regrain E, Bakchine S, Boyer F, Pradat-Diehl P. Right unilateral spatial neglect in the acute phase of the stroke. /data/revues/18770657/v54sS1/S1877065711004763/ [Internet]. 9 avr 2011 [cité 7 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/572933>
5. 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.
6. Sunderland A, Wade DT, Langton Hewer R. The natural history of visual neglect after stroke. Indications from two methods of assessment. *Int Disabil Stud.* 1987;9(2):55-9.
7. Massironi M, Antonucci G, Pizzamiglio L, Vitale MV, Zoccolotti P. The Wundt-Jastrow illusion in the study of spatial hemi-inattention. *Neuropsychologia.* 1988;26(1):161-6.
8. Bailey MJ, Riddoch MJ. Hemineglect. Part 1. The nature of hemineglect and its clinical assessment in stroke patients: an overview. *Phys Ther Rev.* 1 juin 1999;4(2):67-75.
9. Ferro JM, Mariano G, Madureira S. Recovery from aphasia and neglect. *Cerebrovasc Dis Basel Switz.* 1999;9 Suppl 5:6-22.
10. Halligan PW, Marshall JC, Wade DT. Visuospatial neglect: underlying factors and test sensitivity. *Lancet Lond Engl.* 14 oct 1989;2(8668):908-11.
11. Kerkhoff G, Schenk T. Rehabilitation of neglect: An update. *Neuropsychologia.* 1 mai 2012;50(6):1072-9.
12. Vallar G. Extrapersonal visual unilateral spatial neglect and its neuroanatomy. *NeuroImage.* juill 2001;14(1 Pt 2):S52-58.
13. Weiss PH, Marshall JC, Wunderlich G, Tellmann L, Halligan PW, Freund H-J, et al. Neural consequences of acting in near versus far space: a physiological basis for clinical dissociations. *Brain.* 1 déc 2000;123(12):2531-41.
14. Halligan PW, Marshall JC. Left neglect for near but not far space in man. *Nature.* avr 1991;350(6318):498-500.
15. Husain M, Shapiro K, Martin J, Kennard C. Abnormal temporal dynamics of visual attention in spatial neglect patients. *Nature.* 9 janv 1997;385(6612):154-6.
16. Husain M, Rorden C. Non-spatially lateralized mechanisms in hemispatial neglect. *Nat Rev Neurosci.* janv 2003;4(1):26-36.
17. Driver J, Vuilleumier P. Perceptual awareness and its loss in unilateral neglect and extinction. *Cognition.* avr 2001;79(1-2):39-88.
18. 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.
19. Di Monaco M, Schintu S, Dotta M, Barba S, Tappero R, Gindri P. Severity of unilateral spatial neglect is an independent predictor of functional outcome after acute inpatient rehabilitation in individuals with right hemispheric stroke. *Arch Phys Med Rehabil.* août 2011;92(8):1250-6.
20. Buxbaum LJ, Ferraro MK, Veramonti T, Farne A, Whyte J, Ladavas E, et al. Hemispatial neglect: Subtypes, neuroanatomy, and disability. *Neurology.* 9 mars 2004;62(5):749-56.
21. Denes G, Semenza C, Stoppa E, Lis A. Unilateral spatial neglect and recovery from hemiplegia: a follow-up study. *Brain J Neurol.* sept 1982;105 (Pt 3):543-52.
22. Kalra L, Perez I, Gupta S, Wittink M. The influence of visual neglect on stroke rehabilitation. *Stroke.* juill 1997;28(7):1386-91.
23. Ptak R, Fellrath J. Spatial neglect and the neural coding of attentional priority. *Neurosci Biobehav Rev.* mai 2013;37(4):705-22.
24. Rode G. Le syndrome de négligence unilatérale : de l'évaluation à la rééducation COFEMER. 2013.
25. Farnè A, Buxbaum LJ, Ferraro M, Frassinetti F, Whyte J, Veramonti T, et al. Patterns of spontaneous recovery of neglect and associated disorders in acute right brain-damaged patients. *J Neurol Neurosurg*

Psychiatry. oct 2004;75(10):1401-10.

26. Battersby WS, Bender MB, Pollack M, Kahn RL. Unilateral spatial agnosia (inattention) in patients with cerebral lesions. *Brain J Neurol.* mars 1956;79(1):68-93.
27. 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.
28. 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.
29. Kinsbourne M. Mechanisms of unilateral neglect. In: *Neurophysiological and neuropsychological aspects of spatial neglect.* New York, NY, US: Elsevier Science; 1987. p. 69-86. (Advances in psychology, No. 45).
30. Corbetta M, Miezin FM, Shulman GL, Petersen SE. A PET study of visuospatial attention. *J Neurosci Off J Soc Neurosci.* mars 1993;13(3):1202-26.
31. Bisiach E, Luzzatti C. Unilateral neglect of representational space. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav.* mars 1978;14(1):129-33.
32. Jeannerod M, Biguer B. The Directional Coding of Reaching Movements. A Visuomotor Conception of Spatial Neglect. In: Jeannerod M, éditeur. *Advances in Psychology [Internet].* North-Holland; 1987 [cité 13 sept 2019]. p. 87-113. (Neurophysiological and Neuropsychological Aspects of Spatial Neglect; vol. 45). Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508617100>
33. 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.
34. Axenfeld D. Eine einfache Methode Hemianopsie zu constatiren. *Neurol Cent* 13 437–438. 1894;
35. Albert ML. A simple test of visual neglect. *Neurology.* 1973;23(6):658-64.
36. Gauthier L, Dehaut F, Joanette Y. The Bells Test: A quantitative and qualitative test for visual neglect. *Int J Clin Neuropsychol.* 1989;11(2):49-54.
37. Gainotti G, Messerli P, Tissot R. Qualitative analysis of unilateral spatial neglect in relation to laterality of cerebral lesions. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* août 1972;35(4):545-50.
38. Bergego C, Azouvi P, Samuel C, Marchal F, Louis-Dreyfus A, Jokic C, et al. Validation d'une échelle d'évaluation fonctionnelle de l'héminégligence dans la vie quotidienne: l'échelle CB. *Ann Réadapt Médecine Phys.* 1 janv 1995;38(4):183-9.
39. Azouvi P. Functional Consequences and Awareness of Unilateral Neglect: Study of an Evaluation Scale. *Neuropsychol Rehabil.* 1 avr 1996;6(2):133-50.
40. Hartman-Maeir A, Katz N. Validity of the Behavioral Inattention Test (BIT): relationships with functional tasks. *Am J Occup Ther Off Publ Am Occup Ther Assoc.* juin 1995;49(6):507-16.
41. 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.* août 2002;73(2):160-6.
42. Halligan and Robertson. *The Assessment of Unilateral Neglect.* 1992;
43. Parton A, Malhotra P, Husain M. Hemispatial neglect. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* janv 2004;75(1):13-21.
44. 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.* nov 1977;58(11):479-86.
45. Luauté J, Halligan P, Rode G, Rossetti Y, Boisson D. Visuo-spatial neglect: a systematic review of current interventions and their effectiveness. *Neurosci Biobehav Rev.* 2006;30(7):961-82.
46. 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.
47. 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.* 2009;31(8):630-7.
48. Beis JM, André JM, Baumgarten A, Challier B. Eye patching in unilateral spatial neglect: efficacy of two methods. *Arch Phys Med Rehabil.* janv 1999;80(1):71-6.
49. 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.
50. Schindler I, Kerkhoff G, Karnath H-O, Keller I, Goldenberg G. Neck muscle vibration induces lasting recovery in spatial neglect. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* oct 2002;73(4):412-9.
51. Luauté J, Villeneuve L, Roux A, Nash S, Bar J-Y, Chabanat E, et al. Adding methylphenidate to prism-adaptation improves outcome in neglect patients. A randomized clinical trial. *Cortex J Devoted Study Nerv*

Syst Behav. 2018;106:288-98.

52. 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.
53. Luvizutto GJ, Bazan R, Braga GP, Resende LA de L, Bazan SGZ, El Dib R. Pharmacological interventions for unilateral spatial neglect after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 6 nov 2015;(11):CD010882.
54. 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.
55. 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.
56. O'Shea J, Revol P, Cousijn H, Near J, Petitot P, Jacquin-Courtois S, et al. Induced sensorimotor cortex plasticity remediates chronic treatment-resistant visual neglect. *eLife.* 12 sept 2017;6.
57. Bowen A, Hazelton C, Pollock A, Lincoln NB. Cognitive rehabilitation for spatial neglect following stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 1 juill 2013;(7):CD003586.
58. Mizuno K, Tsuji T, Takebayashi T, Fujiwara T, Hase K, Liu M. Prism adaptation therapy enhances rehabilitation of stroke patients with unilateral spatial neglect: a randomized, controlled trial. *Neurorehabil Neural Repair.* oct 2011;25(8):711-20.
59. Nys GMS, de Haan EHF, Kunneman A, de Kort PLM, Dijkerman HC. Acute neglect rehabilitation using repetitive prism adaptation: a randomized placebo-controlled trial. *Restor Neurol Neurosci.* 2008;26(1):1-12.
60. Rossi PW, Kheifets S, Reding MJ. Fresnel prisms improve visual perception in stroke patients with homonymous hemianopia or unilateral visual neglect. *Neurology.* oct 1990;40(10):1597-9.
61. Turton AJ, O'Leary K, Gabb J, Woodward R, Gilchrist ID. A single blinded randomised controlled pilot trial of prism adaptation for improving self-care in stroke patients with neglect. *Neuropsychol Rehabil.* avr 2010;20(2):180-96.
62. Yang NYH, Zhou D, Chung RCK, Li-Tsang CWP, Fong KNK. Rehabilitation Interventions for Unilateral Neglect after Stroke: A Systematic Review from 1997 through 2012. *Front Hum Neurosci.* 2013;7:187.
63. Barrett AM, Goedert KM, Basso JC. Prism adaptation for spatial neglect after stroke: translational practice gaps. *Nat Rev Neurol.* oct 2012;8(10):567-77.
64. Redding GM, Wallace B. Strategie Calibration and Spatial Alignment: A Model From Prism Adaptation. *J Mot Behav.* 1 juin 2002;34(2):126-38.
65. Newport R, Jackson SR. Posterior parietal cortex and the dissociable components of prism adaptation. *Neuropsychologia.* 2006;44(13):2757-65.
66. Michel C, Pisella L, Halligan PW, Luauté J, Rode G, Boisson D, et al. Simulating unilateral neglect in normals using prism adaptation: implications for theory. *Neuropsychologia.* 2003;41(1):25-39.
67. 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.
68. Redding GM, Wallace B. Components of prism adaptation in terminal and concurrent exposure: Organization of the eye-hand coordination loop. *Percept Psychophys.* 1 janv 1988;44(1):59-68.
69. 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.* 2010;24(6):681-97.
70. Rossetti Y, Koga K, Mano T. Prismatic displacement of vision induces transient changes in the timing of eye-hand coordination. *Percept Psychophys.* 1 mai 1993;54(3):355-64.
71. 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.
72. Serino A, Angeli V, Frassinetti F, Làdavas E. Mechanisms underlying neglect recovery after prism adaptation. *Neuropsychologia.* 2006;44(7):1068-78.
73. Redding GM, Wallace B. Dual prism adaptation: calibration or alignment? *J Mot Behav.* déc 2003;35(4):399-408.
74. 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.
75. Frassinetti F, Angeli V, Meneghello F, Avanzi S, Làdavas E. Long-lasting amelioration of visuospatial

- neglect by prism adaptation. *Brain J Neurol.* mars 2002;125(Pt 3):608-23.
76. Martin TA, Keating JG, Goodkin HP, Bastian AJ, Thach WT. Throwing while looking through prisms. II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations. *Brain J Neurol.* août 1996;119 (Pt 4):1199-211.
 77. Baraduc P, Wolpert DM. Adaptation to a visuomotor shift depends on the starting posture. *J Neurophysiol.* août 2002;88(2):973-81.
 78. 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.
 79. Luaute 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.
 80. 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.
 81. Jacquin-Courtois S, Rode G, Pisella L, Boisson D, Rossetti Y. Wheel-chair driving improvement following visuo-manual prism adaptation. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav.* janv 2008;44(1):90-6.
 82. 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.
 83. 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.
 84. Rode G, Rossetti Y, Boisson D. Prism adaptation improves representational neglect. *Neuropsychologia.* 2001;39(11):1250-4.
 85. Rossetti Y, Jacquin-Courtois S, Rode G, Ota H, Michel C, Boisson D. Does Action Make the Link Between Number and Space Representation?: Visuo-Manual Adaptation Improves Number Bisection in Unilateral Neglect. *Psychol Sci.* 1 juin 2004;15(6):426-30.
 86. 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.
 87. Sumitani M, Rossetti Y, Shibata M, Matsuda Y, Sakaue G, Inoue T, et al. Prism adaptation to optical deviation alleviates pathologic pain. *Neurology.* 9 janv 2007;68(2):128-33.
 88. Christophe L, Chabanat E, Delporte L, Revol P, Volckmann P, Jacquin-Courtois S, et al. Prisms to Shift Pain Away: Pathophysiological and Therapeutic Exploration of CRPS with Prism Adaptation [Internet]. *Neural Plasticity.* 2016 [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.hindawi.com/journals/np/2016/1694256/>
 89. Làdavas E, Bonifazi S, Catena L, Serino A. Neglect rehabilitation by prism adaptation: different procedures have different impacts. *Neuropsychologia.* avr 2011;49(5):1136-45.
 90. Serino A, Barbiani M, Rinaldesi ML, Làdavas E. Effectiveness of prism adaptation in neglect rehabilitation: a controlled trial study. *Stroke.* avr 2009;40(4):1392-8.
 91. Angeli V, Benassi MG, Làdavas E. Recovery of oculo-motor bias in neglect patients after prism adaptation. *Neuropsychologia.* 2004;42(9):1223-34.
 92. Ferber S, Danckert J, Joannisse M, Goltz HC, Goodale MA. Eye movements tell only half the story. *Neurology.* 10 juin 2003;60(11):1826.
 93. Saevarsson S, Kristjánsson Á, Hildebrandt H, Halsband U. Prism adaptation improves visual search in hemispatial neglect. *Neuropsychologia.* févr 2009;47(3):717-25.
 94. Morris AP, Kritikos A, Berberovic N, Pisella L, Chambers CD, Mattingley JB. Prism adaptation and spatial attention: a study of visual search in normals and patients with unilateral neglect. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav.* déc 2004;40(4-5):703-21.
 95. Rousseaux M, Bernati T, Saj A, Kozłowski O. Ineffectiveness of prism adaptation on spatial neglect signs. *Stroke.* févr 2006;37(2):542-3.
 96. Schintu S, Pisella L, Jacobs S, Salemme R, Reilly KT, Farnè A. Prism adaptation in the healthy brain: the shift in line bisection judgments is long lasting and fluctuates. *Neuropsychologia.* janv 2014;53:165-70.
 97. Ten Brink AF, Visser-Meily JMA, Schut MJ, Kouwenhoven M, Eijsackers ALH, Tanja C. W. Nijboer. Prism Adaptation in Rehabilitation? No Additional Effects of Prism Adaptation on Neglect Recovery in the Subacute Phase Poststroke: A Randomized Controlled Trial. *Neurorehabil Neural Repair.* déc 2017;31(12):1017-28.
 98. McIntosh RD, Rossetti Y, Milner AD. Prism adaptation improves chronic visual and haptic neglect: a single case study. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav.* juin 2002;38(3):309-20.
 99. Striemer CL, Danckert JA. Through a prism darkly: re-evaluating prisms and neglect. *Trends Cogn Sci.* juill 2010;14(7):308-16.

100. Ptak R. What role for prism adaptation in the rehabilitation of pure neglect dyslexia? *Neurocase*. 4 juill 2017;23(3-4):193-200.
101. Azouvi P, Jacquin-Courtois S, Luauté J. Rehabilitation of unilateral neglect: Evidence-based medicine. *Ann Phys Rehabil Med*. juin 2017;60(3):191-7.
102. Fuchs P. Les interfaces de la réalité virtuelle [Internet]. 1996 [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00785588>
103. Pellas F. Réalité Virtuelle et prise en charge des cérébrolésés. 1995;
104. Schuemie MJ, van der Straaten P, Krijn M, van der Mast CA. Research on presence in virtual reality: a survey. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc*. avr 2001;4(2):183-201.
105. Nirme J, Duff A, Verschure PFMJ. Adaptive rehabilitation gaming system: on-line individualization of stroke rehabilitation. *Conf Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Conf*. 2011;2011:6749-52.
106. Laffont I, Bakhti K, Coroian F, van Dokkum L, Mottet D, Schweighofer N, et al. Innovative technologies applied to sensorimotor rehabilitation after stroke. *Ann Phys Rehabil Med*. nov 2014;57(8):543-51.
107. Klinger E. Apports de la réalité virtuelle à la prise en charge de troubles cognitifs et comportementaux. 2007;229.
108. Mon-Williams M, Wann JP, Rushton S. Binocular vision in a virtual world: visual deficits following the wearing of a head-mounted display. *Ophthalmic Physiol Opt J Br Coll Ophthalmic Opt Optom*. oct 1993;13(4):387-91.
109. Cartwright, Glenn F. « Virtual or Real? the Mind in Cyberspace » by Cartwright, . - *The Futurist*, Vol. 28, Issue 2, March-April 1994 | Online Research Library: Questia [Internet]. 1994 [cité 8 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.questia.com/magazine/1G1-15266288/virtual-or-real-the-mind-in-cyberspace>
110. Alvarez J. From Video Games to Serious Game [Internet] [Theses]. Université Toulouse; 2007 [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01240683>
111. Wattanasoontorn V, Boada I, García R, Sbert M. Serious games for health. *Entertain Comput*. 1 déc 2013;4(4):231-47.
112. Mantovani F, Castelnuovo G, Gaggioli A, Riva G. Virtual reality training for health-care professionals. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc*. août 2003;6(4):389-95.
113. Rovetta A, Lorini F, Canina MR. Virtual reality in the assessment of neuromotor diseases: measurement of time response in real and virtual environments. *Stud Health Technol Inform*. 1997;44:165-84.
114. Kizony R, Katz N, Weiss PL (Tamar). Adapting an immersive virtual reality system for rehabilitation. *J Vis Comput Animat*. 2003;14(5):261-8.
115. Clark RA, Bryant AL, Pua Y, McCrory P, Bennell K, Hunt M. Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board for assessment of standing balance. *Gait Posture*. mars 2010;31(3):307-10.
116. Ucay O, Teyssedre F, Marchisone J, Moretto P, Labrunee M, Gasq D. Analyse de 26 exercices de la Wii Fit Plus™ de Nintendo pour faciliter la prescription dans la prise en charge rééducative des troubles de l'équilibre. /data/revues/18770657/v55sS1/S1877065712001546/ [Internet]. 9 août 2012 [cité 14 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/749835>
117. Thirumalai M, Kirkland WB, Misko SR, Padalabalanarayanan S, Malone LA. Adapting the Wii Fit Balance Board to Enable Active Video Game Play by Wheelchair Users: User-Centered Design and Usability Evaluation. *JMIR Rehabil Assist Technol*. 6 mars 2018;5(1):e2.
118. Mohammadi R, Semnani AV, Mirmohammadkhani M, Grampurohit N. Effects of Virtual Reality Compared to Conventional Therapy on Balance Poststroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Stroke Cerebrovasc Dis Off J Natl Stroke Assoc*. juill 2019;28(7):1787-98.
119. Moreira MC, de Amorim Lima AM, Ferraz KM, Benedetti Rodrigues MA. Use of virtual reality in gait recovery among post stroke patients--a systematic literature review. *Disabil Rehabil Assist Technol*. sept 2013;8(5):357-62.
120. Gupta A, Scott K, Dukewich M. Innovative Technology Using Virtual Reality in the Treatment of Pain: Does It Reduce Pain via Distraction, or Is There More to It? *Pain Med Malden Mass*. 01 2018;19(1):151-9.
121. Chi B, Chau B, Yeo E, Ta P. Virtual reality for spinal cord injury-associated neuropathic pain: Systematic review. *Ann Phys Rehabil Med*. janv 2019;62(1):49-57.
122. Rutledge T, Velez D, Depp C, McQuaid JR, Wong G, Jones RCW, et al. A Virtual Reality Intervention for the Treatment of Phantom Limb Pain: Development and Feasibility Results. *Pain Med* [Internet]. [cité 14 sept 2019]; Disponible sur: <https://academic.oup.com/painmedicine/advance-article/doi/10.1093/pm/pnz121/5511535>
123. Sato K, Fukumori S, Matsusaki T, Maruo T, Ishikawa S, Nishie H, et al. Nonimmersive virtual reality mirror visual feedback therapy and its application for the treatment of complex regional pain syndrome: an

- open-label pilot study. *Pain Med Malden Mass.* avr 2010;11(4):622-9.
124. Saposnik G, Teasell R, Mamdani M, Hall J, McIlroy W, Cheung D, et al. Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: a pilot randomized clinical trial and proof of principle. *Stroke.* juill 2010;41(7):1477-84.
 125. Holden MK, Dettwiler A, Dyar T, Niemann G, Bizzi E. Retraining movement in patients with acquired brain injury using a virtual environment. *Stud Health Technol Inform.* 2001;81:192-8.
 126. Bütefisch C, Hummelsheim H, Denzler P, Mauritz KH. Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand. *J Neurol Sci.* mai 1995;130(1):59-68.
 127. Kwakkel G, Wagenaar RC, Twisk JW, Lankhorst GJ, Koetsier JC. Intensity of leg and arm training after primary middle-cerebral-artery stroke: a randomised trial. *Lancet Lond Engl.* 17 juill 1999;354(9174):191-6.
 128. Wu CY, Wong MK, Lin KC, Chen HC. Effects of task goal and personal preference on seated reaching kinematics after stroke. *Stroke.* janv 2001;32(1):70-6.
 129. Piron L, Tonin P, Trivello E, Battistin L, Dam M. Motor tele-rehabilitation in post-stroke patients. *Med Inform Internet Med.* juin 2004;29(2):119-25.
 130. Riva G, Gamberini L. Virtual reality in telemedicine. *Telemed J E-Health Off J Am Telemed Assoc.* 2000;6(3):327-40.
 131. Holden MK. Virtual environments for motor rehabilitation: review. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc.* juin 2005;8(3):187-211; discussion 212-219.
 132. Pietrzak E, Cotea C, Pullman S. Does smart home technology prevent falls in community-dwelling older adults: a literature review. *Inform Prim Care.* 2014;21(3):105-12.
 133. Thomson K, Pollock A, Bugge C, Brady M. Commercial gaming devices for stroke upper limb rehabilitation: a systematic review. *Int J Stroke Off J Int Stroke Soc.* juin 2014;9(4):479-88.
 134. Laver KE, George S, Thomas S, Deutsch JE, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database Syst Rev.* 12 févr 2015;(2):CD008349.
 135. Haute Autorité de santé. Accident vasculaire cérébral : méthodes de rééducation de la fonction motrice chez l'adulte [Internet]. Haute Autorité de Santé. 2012 [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_1334330/fr/accident-vasculaire-cerebral-methodes-de-reeducation-de-la-fonction-motrice-chez-l-adulte
 136. Weber LM, Nilsen DM, Gillen G, Yoon J, Stein J. Immersive Virtual Reality Mirror Therapy for Upper Limb Recovery After Stroke: A Pilot Study. *Am J Phys Med Rehabil.* sept 2019;98(9):783-8.
 137. Rose FD, Brooks BM, Rizzo AA. Virtual reality in brain damage rehabilitation: review. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc.* juin 2005;8(3):241-62; discussion 263-271.
 138. Standen PJ, Brown DJ. Virtual reality in the rehabilitation of people with intellectual disabilities: review. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc.* juin 2005;8(3):272-82; discussion 283-288.
 139. Klinger E. A Virtual Supermarket to Assess Cognitive Planning [Internet]. ResearchGate. 2004 [cité 14 sept 2019]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/281573426_A_Virtual_Supermarket_to_Assess_Cognitive_Planning
 140. Sorita E, Joseph PA, N'Kaoua B, Ruiz J, Simion A, Mazaux JM, et al. Analyse de la performance d'adultes cérébrolésés faisant leurs courses dans un supermarché virtuel. *Ann Phys Rehabil Med.* mai 2014;57:e87.
 141. Lo Priore C, Castelnuovo G, Liccione D, Liccione D. Experience with V-STORE: Considerations on Presence in Virtual Environments for Effective Neuropsychological Rehabilitation of Executive Functions. *Cyberpsychol Behav.* juin 2003;6(3):281-7.
 142. Dréan D, Bouilland S, Nadalini D, Baillet A, Lozada J, Wiertelowski M, et al. REACTIVE : développement d'un outil de rééducation pour les accidentés vasculaires cérébraux en réalité virtuelle. */data/revues/19590318/v32i2/S1959031811000388/* [Internet]. 30 mars 2011 [cité 14 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/285283>
 143. De Giglio L, Tona F, De Luca F, Petsas N, Prosperini L, Bianchi V, et al. Multiple Sclerosis: Changes in Thalamic Resting-State Functional Connectivity Induced by a Home-based Cognitive Rehabilitation Program. *Radiology.* 8 mars 2016;280(1):202-11.
 144. Michel C, Cruz R. Prism adaptation power on spatial cognition: adaptation to different optical deviations in healthy individuals. *Neurosci Lett.* 17 mars 2015;590:145-9.
 145. Michel C, Pisella L, Prablanc C, Rode G, Rossetti Y. Enhancing visuomotor adaptation by reducing

- error signals: single-step (aware) versus multiple-step (unaware) exposure to wedge prisms. *J Cogn Neurosci*. févr 2007;19(2):341-50.
146. Tsirlin I, Dupierriex E, Chokron S, Coquillart S, Ohlmann T. Uses of Virtual Reality for Diagnosis, Rehabilitation and Study of Unilateral Spatial Neglect: Review and Analysis. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc*. avr 2009;12(2):175-81.
 147. Rushton S, L Coles K, Wann J. Virtual reality technology in the assessment and rehabilitation of. 1996;
 148. L. Myers R, A. Bierig T. Virtual Reality and Left Hemineglect: A Technology for Assessment and Therapy. *Cyberpsychol Behav*. 1 juin 2000;3.
 149. Gupta V, Knott BA, Kodgi S, Lathan CE. Using the “VREye” System for the Assessment of Unilateral Visual Neglect: Two Case Reports. *Presence Teleoperators Virtual Environ*. 1 juin 2000;9(3):268-86.
 150. Fasotti L, van Kessel M. Novel Insights in the Rehabilitation of Neglect. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 15 nov 2013 [cité 25 août 2019];7. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3828556/>
 151. Broeren J, Samuelsson H, Stibrant-Sunnerhagen K, Blomstrand C, Rydmark M. Neglect assessment as an application of virtual reality. *Acta Neurol Scand*. sept 2007;116(3):157-63.
 152. Buxbaum LJ, Palermo MA, Mastrogiovanni D, Read MS, Rosenberg-Pitonyak E, Rizzo AA, et al. Assessment of spatial attention and neglect with a virtual wheelchair navigation task. *J Clin Exp Neuropsychol*. août 2008;30(6):650-60.
 153. Buxbaum LJ, Dawson AM, Linsley D. Reliability and validity of the Virtual Reality Lateralized Attention Test in assessing hemispatial neglect in right-hemisphere stroke. *Neuropsychology*. juill 2012;26(4):430-41.
 154. Jannink MJA, Aznar M, de Kort AC, van de Vis W, Veltink P, van der Kooij H. Assessment of visuospatial neglect in stroke patients using virtual reality: a pilot study. *Int J Rehabil Res Int Z Rehabil Rev Int Rech Readaptation*. déc 2009;32(4):280-6.
 155. Kim DY, Ku J, Chang WH, Park TH, Lim JY, Han K, et al. Assessment of post-stroke extrapersonal neglect using a three-dimensional immersive virtual street crossing program. *Acta Neurol Scand*. mars 2010;121(3):171-7.
 156. Peskine A, Rosso C, Box N, Galland A, Caron E, Rautureau G, et al. Virtual reality assessment for visuospatial neglect: importance of a dynamic task. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. déc 2011;82(12):1407-9.
 157. Dvorkin AY, Bogey RA, Harvey RL, Patton JL. Mapping the neglected space: gradients of detection revealed by virtual reality. *Neurorehabil Neural Repair*. févr 2012;26(2):120-31.
 158. Fordell H, Bodin K, Bucht G, Malm J. A virtual reality test battery for assessment and screening of spatial neglect. *Acta Neurol Scand*. mars 2011;123(3):167-74.
 159. Potter J, Deighton T, Patel M, Fairhurst M, Guest R, Donnelly N. Computer recording of standard tests of visual neglect in stroke patients. *Clin Rehabil*. août 2000;14(4):441-6.
 160. Tanaka T, Sugihara S, Nara H, Ino S, Ifukube T. A preliminary study of clinical assessment of left unilateral spatial neglect using a head mounted display system (HMD) in rehabilitation engineering technology. *J NeuroEngineering Rehabil*. 5 oct 2005;2(1):31.
 161. Ulm L, Wohlrapp D, Meinzer M, Steinicke R, Schatz A, Denzler P, et al. A circle-monitor for computerised assessment of visual neglect in peripersonal space. *PloS One*. 2013;8(12):e82892.
 162. Glize B, Lunven M, Rossetti Y, Revol P, Jacquin-Courtois S, Klinger E, et al. Improvement of Navigation and Representation in Virtual Reality after Prism Adaptation in Neglect Patients. *Front Psychol*. 2017;8:2019.
 163. Ronchi R, Perez-Marcos D, Giroux A, Thomasson M, Serino A, Saj A, et al. Use of immersive virtual reality to detect unilateral spatial neglect in chronic stroke. *Ann Phys Rehabil Med*. 1 juill 2018;61:e90-1.
 164. Ogourtsova T, Archambault P, Sangani S, Lamontagne A. Ecological Virtual Reality Evaluation of Neglect Symptoms (EVENS): Effects of Virtual Scene Complexity in the Assessment of Poststroke Unilateral Spatial Neglect. *Neurorehabil Neural Repair*. 2018;32(1):46-61.
 165. Kim J, Kim K, Kim DY, Chang WH, Park C-I, Ohn SH, et al. Virtual environment training system for rehabilitation of stroke patients with unilateral neglect: crossing the virtual street. *Cyberpsychology Behav Impact Internet Multimed Virtual Real Behav Soc*. févr 2007;10(1):7-15.
 166. Kim YM, Chun MH, Yun GJ, Song YJ, Young HE. The Effect of Virtual Reality Training on Unilateral Spatial Neglect in Stroke Patients. *Ann Rehabil Med*. juin 2011;35(3):309-15.
 167. Sedda A, Borghese NA, Ronchetti M, Mainetti R, Pasotti F, Beretta G, et al. Using virtual reality to rehabilitate neglect. *Behav Neurol*. 2013;26(3):183-5.
 168. Fordell H, Bodin K, Eklund A, Malm J. RehAtt - scanning training for neglect enhanced by multi-sensory stimulation in Virtual Reality. *Top Stroke Rehabil*. juin 2016;23(3):191-9.

169. Ekman U, Fordell H, Eriksson J, Lenfeldt N, Wählin A, Eklund A, et al. Increase of frontal neuronal activity in chronic neglect after training in virtual reality. *Acta Neurol Scand.* 2018;138(4):284-92.
170. Wählin A, Fordell H, Ekman U, Lenfeldt N, Malm J. Rehabilitation in chronic spatial neglect strengthens resting-state connectivity. *Acta Neurol Scand.* 2019;139(3):254-9.
171. Tobler-Ammann BC, Surer E, de Bruin ED, Rabuffetti M, Borghese NA, Mainetti R, et al. Exergames Encouraging Exploration of Hemineglected Space in Stroke Patients With Visuospatial Neglect: A Feasibility Study. *JMIR Serious Games* [Internet]. 25 août 2017 [cité 18 août 2019];5(3). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5591404/>
172. Tobler-Ammann BC, Surer E, Knols RH, Borghese NA, de Bruin ED. User Perspectives on Exergames Designed to Explore the Hemineglected Space for Stroke Patients With Visuospatial Neglect: Usability Study. *JMIR Serious Games.* 25 août 2017;5(3):e18.
173. Jacquin-Courtois S, Bays PM, Salemme R, Leff AP, Husain M. Rapid compensation of visual search strategy in patients with chronic visual field defects. *Cortex.* 1 avr 2013;49(4):994-1000.
174. Ong Y-H, Jacquin-Courtois S, Gorgoraptis N, Bays PM, Husain M, Leff AP. Eye-Search: A web-based therapy that improves visual search in hemianopia. *Ann Clin Transl Neurol.* janv 2015;2(1):74-8.
175. Yasuda K, Muroi D, Ohira M, Iwata H. Validation of an immersive virtual reality system for training near and far space neglect in individuals with stroke: a pilot study. *Top Stroke Rehabil.* 2017;24(7):533-8.
176. Hagiwara A, Yasuda K, Saichi K, Muroi D, Kawaguchi S, Ohira M, et al. Development of a Visual Cueing System Using Immersive Virtual Reality for Object-Centered Neglect in Stroke Patients. In: 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). 2018. p. 1022-5.
177. Yasuda K, Muroi D, Hirano M, Saichi K, Iwata H. Differing effects of an immersive virtual reality programme on unilateral spatial neglect on activities of daily living. *Case Rep.* 9 mars 2018;2018:bcr-2017-222860.
178. Head Mount Display-based Virtual Reality Rehabilitation of Hemispatial Neglect - Full Text View - ClinicalTrials.gov [Internet]. [cité 30 oct 2018]. Disponible sur: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03463122>
179. Virtual Reality Attention Training in Stroke Patients - Full Text View - ClinicalTrials.gov [Internet]. [cité 30 oct 2018]. Disponible sur: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03458611>
180. Weiss PLT, Naveh Y, Katz N. Design and testing of a virtual environment to train stroke patients with unilateral spatial neglect to cross a street safely. *Occup Ther Int.* 2003;10(1):39-55.
181. Katz N, Ring H, Naveh Y, Kizony R, Feintuch U, Weiss PL. Interactive virtual environment training for safe street crossing of right hemisphere stroke patients with unilateral spatial neglect. *Disabil Rehabil.* 30 oct 2005;27(20):1235-43.
182. Navarro M-D, Lloréns R, Noé E, Ferri J, Alcañiz M. Validation of a low-cost virtual reality system for training street-crossing. A comparative study in healthy, neglected and non-neglected stroke individuals. *Neuropsychol Rehabil.* 2013;23(4):597-618.
183. Webster JS, McFarland PT, Rapport LJ, Morrill B, Roades LA, Abadee PS. Computer-assisted training for improving wheelchair mobility in unilateral neglect patients. *Arch Phys Med Rehabil.* juin 2001;82(6):769-75.
184. Ansuini C, Pierno AC, Lusher D, Castiello U. Virtual reality applications for the remapping of space in neglect patients. *Restor Neurol Neurosci.* 2006;24(4-6):431-41.
185. Castiello U, Lusher D, Burton C, Glover S, Disler P. Improving left hemispatial neglect using virtual reality. *Neurology.* 8 juin 2004;62(11):1958-62.
186. Glover S, Castiello U. Recovering space in unilateral neglect: a neurological dissociation revealed by virtual reality. *J Cogn Neurosci.* mai 2006;18(5):833-43.
187. Gamberi R, Turri F, Ricci R, Ptak R. Adaptation to virtual prisms and its relevance for neglect rehabilitation: a single-blind dose-response study with healthy participants. *Neuropsychol Rehabil.* 24 juill 2018;1-14.
188. 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.* 2019;14(5):e0217074.
189. Veilleux L-N, Proteau L. Prism adaptation in virtual and natural contexts: Evidence for a flexible adaptive process. *Q J Exp Psychol* 2006. 2015;68(6):1168-82.
190. Norris SA, Greger BE, Martin TA, Thach WT. Prism adaptation of reaching is dependent on the type of visual feedback of hand and target position. *Brain Res.* juin 2001;905(1-2):207-19.
191. Ogourtsova T, Souza Silva W, Archambault PS, Lamontagne A. Virtual reality treatment and assessments for post-stroke unilateral spatial neglect: A systematic literature review. *Neuropsychol Rehabil.* avr 2017;27(3):409-54.

192. Pedroli E, Serino S, Cipresso P, Pallavicini F, Riva G. Assessment and rehabilitation of neglect using virtual reality: a systematic review. *Front Behav Neurosci* [Internet]. 25 août 2015;9. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4548208/>
193. Wilms I, Malá H. Indirect versus direct feedback in computer-based Prism Adaptation Therapy. *Neuropsychol Rehabil*. déc 2010;20(6):830-53.
194. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1 mars 1971;9(1):97-113.
195. Mancuso M, Pacini M, Gemignani P, Bartalini B, Agostini B, Ferroni L, et al. Clinical application of prismatic lenses in the rehabilitation of neglect patients. A randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med*. juin 2012;48(2):197-208.
196. Herlihey TA, Black SE, Ferber S. Terminal, but not concurrent prism exposure produces perceptual aftereffects in healthy young adults. *Neuropsychologia*. oct 2012;50(12):2789-95.
197. Colent C, Pisella L, Rossetti Y. Cognitive bias induced by visuo-motor adaptation to prisms: A simulation of unilateral neglect in normal individuals? *NeuroReport Rapid Commun Neurosci Res*. 2000;11(9):1899-902.
198. Girardi M, McIntosh RD, Michel C, Vallar G, Rossetti Y. Sensorimotor effects on central space representation: prism adaptation influences haptic and visual representations in normal subjects. *Neuropsychologia*. 2004;42(11):1477-87.
199. Bultitude JH, Woods JM. Adaptation to leftward-shifting prisms reduces the global processing bias of healthy individuals. *Neuropsychologia*. mai 2010;48(6):1750-6.
200. Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS, Lilienthal MG. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *Int J Aviat Psychol*. 1 juill 1993;3(3):203-20.
201. Perez Garcia M, Godoy Garcia JF, Vera Guerrero N, Laserna Triguero JA, Puente AE. Neuropsychological evaluation of everyday memory. *Neuropsychol Rev*. déc 1998;8(4):203-27.
202. Levick WR. Observer rating of memory in children: A review. *Brain Impair*. 2010;11(2):144-51.
203. Cogné M, Knebel J-F, Klingner E, Bindschaedler C, Rapin P-A, Joseph P-A, et al. The effect of contextual auditory stimuli on virtual spatial navigation in patients with focal hemispheric lesions. *Neuropsychol Rehabil*. janv 2018;28(1):1-16.
204. Shiraishi H, Yamakawa Y, Itou A, Muraki T, Asada T. Long-term effects of prism adaptation on chronic neglect after stroke. *NeuroRehabilitation*. 2008;23(2):137-51.
205. Fortis P, Ronchi R, Velardo V, Calzolari E, Banco E, Algeri L, et al. A home-based prism adaptation training for neglect patients. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav*. 18 sept 2018;
206. Tunik E, Saleh S, Adamovich SV. Visuomotor discordance during visually-guided hand movement in Virtual Reality modulates sensorimotor cortical activity in healthy and hemiparetic subjects. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng Publ IEEE Eng Med Biol Soc*. mars 2013;21(2):198-207.
207. Sayegh PF, Gorbet DJ, Hawkins KM, Hoffman KL, Sergio LE. The Contribution of Different Cortical Regions to the Control of Spatially Decoupled Eye-Hand Coordination. *J Cogn Neurosci*. juill 2017;29(7):1194-211.
208. Clower DM, Boussaoud D. Selective use of perceptual recalibration versus visuomotor skill acquisition. *J Neurophysiol*. 2000;84(5):2703-8.

ANNEXES 1

Fiche de Passation Sujet Sain

Date de passation :

Nom : Prénom : Date de naissance : Age :

Ecart pupillaire : mm

Latéralité (selon l'Edinburgh Handedness Inventory ci joint) :

Présence de troubles moteurs ou visuels ? :

Tests pré exposition

- Test du logiciel de pointage sans déviation prismatique : 10 pointages avec apparition de la main aux 1/10^{ème} puis 10 pointages avec apparition de la main aux 9/10^{ème}.
- Mesure de référence du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure de référence de l'effet d'adaptation par VOL.

Exposition (adaptation prismatique virtuelle)

- 100 pointages en mode aléatoire, 10° de déviation vers la droite, décalage non progressif.
- Mesure immédiate du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure immédiate effet d'adaptation par VOL.

----- 60 secondes de pause -----

Test post exposition

- Mesure retardée du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure retardée de la décroissance de l'effet d'adaptation par VOL.

Recalibrage

- 100 pointages en mode aléatoire, 0° de déviation.
- Mesure après recalibrage, du droit devant subjectif manuel par SSA-m.
- Mesure après recalibrage, de l'effet d'adaptation par VOL.

Questionnaire de tolérance (Simulator Sickness Questionnaire)

ANNEXES 2

Edinburgh Handedness Inventory

Edinburgh Handedness Inventory¹

Your participant ID: _____

Please indicate with a one (1) your preference in using your left or right hand in the following tasks.

Where the preference is so strong you would never use the other hand, unless absolutely forced to, put a two (2).

If you are indifferent, put a one in each column (1 | 1).

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 parentheses.

Task / Object	Left Hand	Right Hand
1. Writing		
2. Drawing		
3. Throwing		
4. Scissors		
5. Toothbrush		
6. Knife (without fork)		
7. Spoon		
8. Broom (upper hand)		
9. Striking a Match (match)		
10. Opening a Box (lid)		
Total checks:	LH =	RH =
Cumulative Total	CT = LH + RH =	
Difference	D = RH - LH =	
Result	R = (D / CT) × 100 =	
Interpretation: (Left Handed: R < -40) (Ambidextrous: -40 ≤ R ≤ +40) (Right Handed: R > +40)		

Please stop here

¹ Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.

Save and email the completed form to a.rawlings@uq.edu.au

ANNEXES 3

Questionnaire du mal des simulateurs (Simulator Sickness Questionnaire)

Développé par Kennedy, Lane, Berbaum et Lilienthal (1993). Ce questionnaire est une auto évaluation concernant 16 symptômes :

Inconfort général-----	Difficulté de concentration--
Fatigue-----	Plénitude de la tête-----
Maux de tête-----	Vision trouble-----
Fatigue visuelle-----	Vertiges yeux ouverts-----
Difficulté d'accommodation-	Vertiges yeux fermés-----
Salivation-----	Étourdissements -----
Sueurs-----	Estomac lourd-----
Nausées-----	Éructation-----

Points (0 = absent, 1 = léger, 2 = modéré, 3 = sévère).

General discomfort	None	Slight	Moderate	Severe
Fatigue	None	Slight	Moderate	Severe
Headache	None	Slight	Moderate	Severe
Eye strain	None	Slight	Moderate	Severe
Difficulty focusing	None	Slight	Moderate	Severe
Increased salivation	None	Slight	Moderate	Severe
Sweating	None	Slight	Moderate	Severe
Nausea	None	Slight	Moderate	Severe
Difficulty concentrating	None	Slight	Moderate	Severe
“Fullness of the head”	None	Slight	Moderate	Severe
Blurred vision	None	Slight	Moderate	Severe
Dizzy (eyes open)	None	Slight	Moderate	Severe
Dizzy (eyes closed)	None	Slight	Moderate	Severe
Vertigo (Giddiness)	None	Slight	Moderate	Severe
Stomach awareness	None	Slight	Moderate	Severe
Burping	None	Slight	Moderate	Severe

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 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 et reconnaissant 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 d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.*

RÉSUMÉ

La négligence spatiale unilatérale est un trouble neuropsychologique de la représentation spatiale fréquent et qui péjore le pronostic fonctionnel des patients victimes d'AVC. Elle est responsable d'un biais attentionnel latéralisé qui réduit la capacité d'une personne à interagir vers la moitié de son environnement. Les tests diagnostic papiers-crayons habituellement utilisés ne permettent pas de correspondre à la vie réelle et ils sont facilement compensés. Le niveau de preuve des différentes approches thérapeutiques est plutôt faible et seule l'adaptation prismatique semble permettre une diminution efficace et potentiellement durable de ce trouble, à condition de sélectionner les patients répondeurs. Cependant cette technique a beaucoup d'inconvénients et de limites techniques inhérentes au matériel utilisé.

Les nouvelles technologies sont en plein essor en rééducation et réadaptation, et notamment les techniques permettant l'immersion la plus fidèle du patient en réalité virtuelle.

Le but de ce travail a été de réaliser un outil de quantification et de rééducation de l'héminégligence en réalité virtuelle immersive, avec tous les avantages qu'il permet par rapport à la rééducation classique. La partie diagnostique comprend une version virtuelle immersive de l'épreuve du SSA-m, SSA-v, VOL, ainsi que du test des cloches. La partie thérapeutique comprend un serious game immersif basé sur l'adaptation prismatique. Après revue de la littérature sur le sujet, nous avons pu y incorporer toutes les caractéristiques que nous jugions nécessaires pour augmenter l'effet thérapeutique d'adaptation.

L'étude pilote sur 7 sujets sains que nous avons réalisée fournit des résultats préliminaires encourageants et indiquent le potentiel des serious game dans le traitement de ce trouble. En induisant une déviation prismatique virtuelle durant une tâche de pointages, les sujets présentaient des effets consécutifs immédiats statistiquement significatifs, et qui semblent congruents avec les données de la littérature sur la technique originale. Il faudra des études complémentaires afin de juger de la supériorité de la technique virtuelle, et pour savoir si elle met en jeu les mêmes mécanismes cérébraux.

Mots-clés : *Négligence spatiale unilatérale, adaptation prismatique, réalité virtuelle, serious game.*