



HAL
open science

Modifications hémodynamiques du cortex préfrontal induite par la réalité virtuelle chez le sujet lombalgique chronique en situation d'exercice physique

Duong-Minh Nguyen

► **To cite this version:**

Duong-Minh Nguyen. Modifications hémodynamiques du cortex préfrontal induite par la réalité virtuelle chez le sujet lombalgique chronique en situation d'exercice physique. Médecine humaine et pathologie. 2019. dumas-02967222

HAL Id: dumas-02967222

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02967222>

Submitted on 14 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
Duong-Minh NGUYEN

Le 18/11/2019

MODIFICATIONS HEMODYNAMIQUES DU CORTEX
PREFRONTAL INDUITE PAR LA REALITE VIRTUELLE CHEZ LE
SUJET LOMBALGIQUE CHRONIQUE EN SITUATION D'EXERCICE
PHYSIQUE

Directeur de thèse : Pr Arnaud Dupeyron

JURY

Président : Pr Arnaud Dupeyron

Assesseurs :

- Pr Anne Ducros
- Pr Cédric Lukas
- Pr Stéphane Perrey
- Dr Matthieu Vaucher

**UNIVERSITE DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-
NIMES**

THESE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR EN MEDECINE
Présentée et soutenue publiquement
Par
Duong-Minh NGUYEN

Le 18/11/2019

MODIFICATIONS HEMODYNAMIQUES DU CORTEX
PREFRONTAL INDUITE PAR LA REALITE VIRTUELLE CHEZ LE
SUJET LOMBALGIQUE CHRONIQUE EN SITUATION D'EXERCICE
PHYSIQUE

Directeur de thèse : Pr Arnaud Dupeyron

JURY

Président : Pr Arnaud Dupeyron

Assesseurs :

- Pr Anne Ducros
- Pr Cédric Lukas
- Pr Stéphane Perrey
- Dr Matthieu Vaucher

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 Hélène
BRUNEL Michel	LOPEZ François Michel	SANY Jacques
CALLIS Albert	LORIOT Jean	SEGNARBIEUX François
CANAUD Bernard	LOUBATIERES Marie Madeleine	SENAC Jean-Paul
CASTELNAU Didier	MAGNAN DE BORNIER Bernard	SERRE Arlette
CHAPTAL Paul-André	MARY Henri	SIMON Lucien
CIURANA Albert-Jean	MATHIEU-DAUDE Pierre	SOLASSOL Claude
CLOT Jacques	MEYNADIER Jean	THEVENET André
D'ATHIS Françoise	MICHEL François- Bernard	VIDAL Jacques
DEMAILLE Jacques	MICHEL Henri	VISIÉ Jean Pierre
DESCOMPS Bernard		
DIMEGLIO Alain		

Professeurs Emérites

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

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 – Anesthésie-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
PELISSIER 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-Génétiq ue
TRAN Tu-Anh-Pédiatrie
VERNHET Hélène-Radiologie et imagerie médicale

PU-PH de 2ème 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 Oliver-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-Ophtalmologie
VINCENT Denis -Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
VINCENT Thierry-Immunologie
WOJTUSCISZYN Anne-Endocrinologie-diabétologie-nutrition

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

1^{re} classe :

COLINGE Jacques - Cancérologie, Signalisation cellulaire et systèmes complexes

2^{ème} classe :

LAOUDJ 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^{ère} 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 conférences de 1^{ère} classe

COSTA David

Maîtres de conférences 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

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Maîtres de Conférences hors classe

BADIA Eric - Sciences biologiques fondamentales et cliniques

Maîtres de Conférences de classe normale

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

PRATICIENS HOSPITALIERS UNIVERSITAIRES

CLAIRE DAIEN-Rhumatologie
BASTIDE Sophie-Epidémiologie, économie de la santé et prévention
GATINOIS Vincent-Histologie, embryologie et cytogénétique
PINETON DE CHAMBRUN Guillaume-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
SOUCHE François-Régis – Chirurgie générale
TORRE Antoine-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale

Remerciements

Aux membres du Jury

Au **Professeur Arnaud Dupeyron**, président de jury et directeur de thèse,

Votre engagement pour notre discipline est un exemple pour nous tous. Je vous remercie pour votre soutien et votre confiance à toutes les étapes de mon parcours d'interne : les initiations aux arts-martiaux aux patients du PAL, la bourse de recherche, le DIU de médecine manuelle et ostéopathie. Votre impact sur ma pratique médicale est énorme. Merci de m'avoir accompagné sur mes travaux universitaires. En connaissant toutes les responsabilités que vous portez, je suis reconnaissant du temps que vous m'avez accordé. Je suis fier de dire que j'ai été formé au CHU de Nîmes.

Au **Professeur Anne Ducros**,

Je suis reconnaissant et honoré de votre présence dans mon jury de thèse. Vos visites à l'USINV de Gui de Chauliac ont été une source de connaissance importante pour la gestion de mes patients en rééducation neurologique. Avoir bénéficié de votre expérience est une chance.

Au **Professeur Cédric Lukas**,

C'est un plaisir et un honneur que vous me faites de prendre part à mon jury de thèse. Merci pour votre accueil lors de mon passage dans le service de Rhumatologie de Lapeyronie. Votre intérêt pour les bibliographies hebdomadaires des internes et votre engagement dans leur formation est une bouffée d'air frais dans la formation médicale en général.

Au **Docteur Matthieu Vaucher**,

Merci d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse malgré ton départ du giron universitaire. Merci pour d'avoir partagé tes compétences en médecine manuelle : ton traitement à participé activement au bien-être et à l'efficacité de l'investigateur du protocole de recherche décrit ci-après.

Au **Professeur Stéphane Perrey**,

Merci d'être présent dans mon jury de thèse en tant que membre invité. Merci de m'avoir accueilli au sein d'Euromov et de m'avoir apporté toute l'aide matérielle et intellectuelle sans lesquelles ce travail n'aurait pas eu lieu.

Aux personnes qui ont contribué dans la réalisation de ce travail :

Merci au **Pr Gérard Dray** et à **Sarah Jean-Gilles** pour le traitement et la mise en forme des données NIRS.

Merci à **NGUYEN Dinh-Phong** pour son aide efficace pour la réalisation des analyses statistiques

Merci au **Dr Guillaume CHORON** et **Marika Urbanski** pour la relecture attentive dans le temps imparti.

Thank you to **Martin Jansen** and **Ian Burnett** from APDM, OR, USA for the technical assistance on the retrieval of my gait data.

Merci aux enseignants de la faculté de STAPS de Montpellier en Master 2 de sciences du mouvement humain et laboratoire Euromov dans sa globalité : **Zaini al Murad** et **Simon Pla** pour votre assistance matérielle, **Ludovic Molle** et **Léna Borot** d'avoir partagé votre expérience dans la recherche universitaire.

Merci à **Jean-Baptiste Bonnet** d'avoir validé ma dispo et à la DCRI du CHU de Nîmes d'avoir validé mon projet !

A ma famille :

A **mes parents**, « Con hơn cha là nhà có phúc » - Proverbe vietnamien.

J'essaie de me rendre digne de cette maxime maintes fois entendue. Merci pour votre soutien infaillible pour qu'elle devienne réalité et de m'avoir catapulté jusqu'ici. Merci d'avoir pris le parti d'être présent avec moi pour ma thèse. Je vous aime et je ne vous le dis pas assez.

A **Son**, « We didn't realize we were making memories, we just knew we were having fun. » - Winnie the Pooh.

Tu es mon premier compagnon de jeu aka « the real Bro ». Entre Azeroth, Sanctuary, Auir, Spira en passant par des circuits de karting parsemés de nitro, merci de me supporter dans tous les sens du terme et de me rappeler souvent à l'ordre avec Lise (« MAIS anh MIIIIINH !!! »). Même si les choses changent beaucoup de choses changent en ce moment, je suis toujours là si tu as besoin. Surtout, continuons à nous amuser.

A **Thuy**, « Tre già măng mọc. » - Proverbe vietnamien.

Non je suis pas si vieux que ça... Mais toi tu as grandi, et on peut désormais partager bien plus. Ta bonne humeur et ta « goofiness » sont une source inépuisable de rires et de joie pour moi. Tu es une excellente ostéo et ce n'est que le début. Mikey (et Smokey) est une addition géniale à la famille et je suis content qu'il continue à sculpter !

A **ông bà ngoại**, « Vãn võ song toàn. » - Maxime vietnamienne.

Grâce à vous j'ai les 2 ! Merci d'avoir bâti les fondations de notre vie en France. Notre réussite est votre réussite.

A **Tatiana**, « I'm going on an adventure! » - Bilbo the Hobbit

Ma Chérie.... Je n'aurai jamais imaginé qu'en te rencontrant je me serai retrouvé en Occitanie. Chaque instant que je vis avec toi est une aventure pleine de rires et de bonheur. Ces instants ont été en compte-goutte pendant presque plus de 5 ans nous sommes à l'aube d'une aventure qui aura lieu 7j/7. C'est une perspective palpitante et je suis heureux que ce soit avec toi. Je t'aime.

A **ông bà ĐỘ** : Con thành bác sĩ xong rồi !!

A **mes oncles, tantes, cousins, cousines**, merci pour votre bonne humeur, pour notre solidarité. Peu de famille peuvent s'en vanter.

A mes amis :

A **Raphael** et **Mathieu**. Amis de toujours, nous avons pris des chemins bien différents pour finalement nous retrouver au bois de Vincennes. Je suis content de vous avoir retrouvé.

A Goverwatch, ou plutôt Broverwatch : **Son, Sylvain, Vuong, Trung, Mongkoll, Lolo, Longuy**, passer des soirées à être votre bouclier (ou pas) m'a permis de rester un peu près de Paris.

A la P1 team !

Sylvain dit Sysy, dit Princesse. Devenir amis avec quelqu'un juste parce que tu as le même nom de famille est assez improbable surtout quand on s'appelle NGUYEN ! Que de chemin parcouru en soirée, sur les tatamis, lors de discussions à n'en pas dormir. Comme elles le disent toutes, c'est bon et faut que ça continue ! Tu es mon 1st bro offline et online même si c'est pas tous les jours facile !

Bao-Long dit Mickael, dit Oab, dit Bao-chan. Des soirées de grèves SNCF hébergé chez toi en P1, au live feed de la réa Chastre et à l'HDJ de onco-hémato ped de Troussal, tu m'as fatigué tout le long de mes études à la Tiep. Merci d'être là même si la Terre va toujours mal et que tu es pas mal occupé par ta petite famille !

Manu « Léo » Pardo, dit Pardal. Un gars solide qui n'a pas peur de s'approprier le mobilier urbain. Major en anat de Médisup, t'es toujours dans les bons plans. Quand est-ce que je filme ta prochaine chute légendaire sur les pistes ??

Clément, dit Cléclé, dit Mouchi. Notre liaison est de nature anti-liante depuis le départ ! Esprit génial et tordu, tu as créé Viet-man. N'oublie pas que le Minotaure à tentacules compte envahir Im'shyr à la demi éclipse de Mars et t'es de garde avec moi ce soir-là !

Flo, Marie, Olivia, BH, Romain, Pauline vous êtes plus ou moins loin mais je ne vous oublie pas.

Poulpy team :

Edouard, dit Doudou Galak, dit Ger-man. Tu es l'homme providentiel. Merci à toi sans qui je ne serai pas MPR. Tu es un bon ami et maintenant tu vas pouvoir bronzer en faisant des AMS 700 !

Adrien, dit Tonton. Toujours un plaisir de se croiser ce que soit online ou à Rennes, je suis content que tu aies trouvé l'épanouissement professionnel.

Julien et Maud : je ne vous oublie pas !

A mes sous-colleurs :

Marie, tu es partie t'isoler dans ta montagne. Tu n'es plus le rat des villes d'antan. Les dîners dans ton placard d'apparts et nos sous-colles à Starbucks (sais-tu encore ce que c'est ??) font partie de mes meilleurs souvenirs de la fac !

Duy, de la réa à la gynécal en passant par l'uro, ton flair naturel et tes talents de pâtissiers me manquent. Troisième frère Tang avec Bao, la fin de l'externat n'en a été que plus drôle en ta compagnie.

Jean-Edern, dit Juan, dit Juanito, merci d'avoir été là pour une 2^{ème} D4 qui t'as été profitable. Tu as réalisé ton rêve et maintenant tu vas pouvoir construire les autres. Continue à faire les choses passionnément comme tu en as l'habitude.

Christopher aka GI Chris. On ne se parle qu'une fois l'an mais t'es mon favorite French American ! Hate de retourner barouder avec toi !

Aux copains de la fac

Jojo, Chacha, Juju, Caro, on ne se voit pas plus depuis que je suis rentré à Paris... Faut remettre le couvert avant de vous disperser !

Paul et Elo, vous avez pris de l'avance en tant que parents, ou plutôt vous êtes dans les temps et ça vous réussit. Entre racisme ordinaire et contention physique des patients dans les bas-côtés en attendant la police, merci d'être les amis que vous êtes.

Aux co-internes

Ceux d'Alès : **Lucile** et **Laura** mes colocs entre séances de sport le matin et les soirées à la coloc, je ne pouvais pas être mieux accompagné pour mon arrivée dans le sud. Les **Matthieu, Jordan, Romain, Mathilde, Coline, Lucille, Isaure, Greg, Bilal**, merci à tous pour l'accueil et le déchargement de ma voiture !

Ceux de MPR :

- **Adel**. Merci de m'avoir accueilli à Montpellier et de m'avoir suivi dans mes délires avec Paul, t'es le seul à vraiment pouvoir étrangler des gens. Tu es un geek notoire, un intolérant marrant et un vrai ami. J'aurai été perdu dans le Sud sans toi ! Prends soin d'Anna !
- **Fanny, dit Nyfa**, merci à toi pour ces apéros et sortie en bateau, de m'avoir aidé à naviguer l'internat. Tu es un vrai cap'tain et un modèle pour moi (pas pendant les soirées hein ? Je meurs avant de t'arriver à la cheville).
- **Sylvain** le techguy débrouillard. Je n'ai toujours pas vu ton nouvel appart avec **Pauline** !
- **Alexis, Hélène, Justine et Oriane** vous êtes les premiers de ma famille MeuPREux !
- Les promos du dessus : merci pour votre bonne humeur et votre guidance. **François** avec tes trails de maso, **Juliette** avec ton rire qu'on entend à travers les murs, **Clacla** mention spéciale pour m'avoir soutenu pendant mon dernier semestre à Nîmes
- Les petits : **Constance**, merci pour ces trajets entre Montpellier et Nîmes pester sur les automobilistes, les cours de MMO à supporter mon hypotonie et le partage de notre penchant pour la médecine du sport. **Aurélien** le cool guy mondialement connu pour les manipulations à cheval en bout de table et baroudeur de l'extrême. **Papa Vince** (et **maman Poup's**) pour les soirées endiablées des EMPR. **Seb** et **Olivier**.
- Les pioupious : **Ariane** passe ton tour pour le moment. **Lulu** pour les cafés sur le toit du Grau du Roi et les footings à la lumière de la lune. **Florence**, tu m'as appris les diagnostics différentiels en médecine manuelle, **Carole L, Carole B** et **Jeremy** le pouvoir de la MMO est en vous, **Julien** avec ton expérience du PAL.

- Les pichounes : **Max** partager avec toi est toujours un plaisir, **Julien, Eva, Clément, Guillaume** Pavillon 3 et 3bis représente et **Agathe** qui a pris ma suite en RCV !

A **Pierre-Olivier Porte aka « POP »**, merci pour ces quelques mois de colocation avec qui m'ont permis d'être plus pragmatiques dans mes déplacements à l'intérieur de mon appartement tout en musclant mon dos et mes bras. Ces discussions complètement décalées sur les films que nous apprécions resterons gravés !

A **Guillaume (et Marine)**, merci encore pour la relecture. Merci pour ces repas passés chez toi avec ces épiques parties musicales de Ray-man et soirées jeux de société. Merci d'avoir participé à mes séances de Jiu Jitsu.

A **Alexandre** et **Arthur** pour le séminaires d'ostéo à se faire « crack-crack » et les sessions grimpe.

Aux amis de Montpellier :

Chi Thao : merci à toi m'avoir permis d'entrer à la FFK ! Notre rencontre totalement due au hasard s'est transformée en une vraie amitié. Merci à toi, à **Julien** et **Mai Linh** de m'avoir ouvert les bras. Vous êtes quelques part ma famille Montpelliéraine.

Merci au **Dr Mohamed E Habchi (Momo)** de m'avoir accueilli pour la surveillance des compétitions de karaté et de me faire bénéficier de ton expérience médicale et fédérale.

Merci à **Manu Colliot** et à toute l'équipe des gradés (**Cyril, Matthieu, Médéric, Franck**) et tous les pratiquants du club de Ju-Jitsu Montpellier. Grâce à vous, j'ai progressé humainement et techniquement sur et en dehors du tapis. Vous êtes ma famille martiale à Montpellier.

Aux équipes médicales qui m'ont construit en tant que médecin :

L'onco-hémato-pédiatrique de Trousseau : merci au Pr Guy Leverger et au Dr Sandra Ploussard pour leur accueil en HDJ et l'enseignement. Votre environnement de travail est parfois dur mais l'équipe soudée

L'urologie de la Pitié, le service où j'ai passé plus de temps durant mon externat. Merci aux Pr Bitker, Dr Véronique Phé, Dr Greg Chevreau, Dr Jérôme Parra, Dr Sarah Drouhin et Dr Claire Billault de m'avoir permis d'être chirurgien durant un été. Merci au Pr Morgan Rouperet et Emmanuel Chartier-Kasler de m'avoir soutenu dans mon redoublement de D4 et de devenir médecin MPR. Les compétences que j'ai acquies chez vous m'ont sorti maintes de situations épineuses.

Le service de cardiologie du CHU Ales-Cévennes Merci au Dr Pezzano, Dr Talic, Dr Bru et **Dr Broussous** pour votre accueil pour mon premier semestre. Merci **Amélie** et **Lise**, mes premières co-internes et à toute l'équipe soignante.

La rééducation gériatrique du CHU de Nîmes. Au **Dr Florence Dischler**, merci de m'avoir accompagné dans mes premiers pas en MPR. Ton franc parler et feedback régulier m'ont poussé à la rigueur et requis un travail sur moi duquel je suis sorti grandi. Ton enseignement m'accompagne encore aujourd'hui. Merci de m'avoir initié à l'écho et à la toxine. Je garde un bon souvenir de nos discussions extra-médicales du midi sur la danse et GoT (que j'ai rattrapé depuis). Au **Dr Emilie Galano**, merci de m'avoir accompagné sur les quelques semaines d'absences de Florence. Ta gentillesse et ta personnalité mesurée est un exemple à suivre. A **Marie**, ma co-interne de l'étage du dessous. Tu ne sais que trop bien que les internes qui passent au 3 bis sont une variété particulière capables de danser au milieu de la tempête ! Appelle-moi quand t'as besoin de faire des gaz du sang !

Le service de rhumatologie du CHU de Montpellier : merci aux Prs Combe, Morel et Lukas pour votre accueil. Merci aux Dr Che, Hua, Daien, Thomas et Cohen pour leur supervision et leur feedback. Merci à mes co-internes **Claire, Paulina, Marion, Hind, Gisèle et Guillaume** qui m'ont aidé à naviguer la rhumatologie. J'ai appris à travailler vite grâce à vous.

Le service de Neurologie du CHU de Montpellier : merci aux Pr Labauge et Ducros pour votre accueil. A L'équipe de neurovasculaire avec les Dr Mourand, Ayrignac, Gaillard et Arquizan pour l'expérience transmis à l'USINIV. Merci aux médecins de l'équipe d'HC et HDS les Dr Charrif, Cara, Corti, Hourrègue pour votre supervision et aux Dr Morales et Taieb pour leur savoir-faire qu'ils ont pu m'enseigner pendant les gardes. Merci à mes co-internes **Olivier, Axel, Florence, Elsa** (Block'out !!), **Anaïs et Elodie**.

Au service de rééducation neurologique du Grau du Roi : merci au Drs **Jérôme Froger, Huei-Yune Bonnin**, et **Marine Strasman** pour votre accueil et les visites, les

cafés, le feedback et l'enseignement que vous m'avez dispensé. La pratique de la rééducation neurologique que j'ai appris avec vous sera mise à profit pendant mon assistantat aux Hôpitaux de Saint Maurice et au Kremlin Bicêtre. Merci à toute l'équipe des secrétaires, aux soignants et aux rééducateurs ! Merci à mes co-internes... Que dire sur vous... Que vous êtes les meilleurs ? Qu'on faisait la team ? Que vous expérimentiez sur moi ? Qu'il n'y a que moi qui porte du ZÉRO ?? **Ariane**, tu es arrivée bébé interne et regardes toi maintenant ! Tu gères toute seule ! Tu es maintenant une grande (au sens propre et figuré) amie et je suis curieux de voir où te mènera ta carrière. Les footings avec Lucile ont été une expérience... intéressante. Tu n'es pas seule puisque grâce à toi **Kevin** à fait irruption dans ma vie et apprend à étrangler des gens maintenant ! Vous êtes une chouette paire ! **Marina**, merci pour ton expérience de la diabétologie, pour ton franc parler, pour nos discussions enflammées sur des sujets divers et variés, pour les après-midis de boulot à siroter du thé. **Blaise** s'est aussi ajouté à mes amis grâce à toi ! Je vous souhaite de bien préparer le voyage aux US. J'ai eu de la chance de vous avoir comme co-internes et j'ai de la chance de vous avoir comme amies.

Au service de MPR du CHU de Montpellier : merci au Pr Isabelle Laffont pour votre accueil. Arrivé dans le service tard dans mon internat, j'ai appris énormément. Votre pédagogie et votre gentillesse permettent à tous de progresser rapidement et sereinement. Merci **Dr Claire Jourdan** pour les visites et les débriefs post-consultation. Merci au **Dr Claire Palayer**, je suis admiratif de tes compétences et ton franc parler permet à ceux qui te croisent d'être meilleurs. Merci au **Dr Camille Cortez** de m'avoir fait confiance pour les avis MPR en rhumatologie. Merci au **Dr Isabel Tavares** : merci de m'avoir tant appris, de t'observer interroger et guider les patients a été d'un énorme apport pour moi, merci de m'avoir fait confiance pour les interventions que j'ai pu faire pour l'école du mouvement. Merci à mes co-internes **Alexis, Hassan, Sylvain, Elsa** pour les échanges et le semestre passé ensemble.

Au service de rééducation cardio-vasculaire du CHU de Nîmes : littéralement mon équipe de cœur ! Merci au **Dr Monique Loscos** de m'avoir fait confiance et laissé en autonomie relative tout en partageant leur expérience. Merci au cardiologues **Dr Bertrand Ledermann** et **Christelle Robert** pour leur collaboration. Le binôme cardio-MPR est une énorme force et modèle à reproduire ! Merci au **Dr Iris Schuster**, au **Dr Olivier Mares** et à **M Laurent Grenier** de m'avoir accueilli au sein du CEMAPS et m'avoir permis de pratiquer la médecine du sport. Merci à toute l'équipe d'HDJ de la RCV ! **Nathalie** et **Christelle**, vous êtes la plaque tournante de cette machine bien huilée. Les

kinés **Pierre** et **Agnes**, les ergos **Alison** et **Marie**, les APA **Hiêu** et **Laura** et les diet **Marine** et **Virginie** pour votre bonne humeur, les échanges et la collaboration professionnel.

Au service du Service de Rééducation et de Réadaptation de l'Appareil Locomoteur et des Pathologies du Rachis de l'hôpital Cochin : merci au Pr Rannou de m'avoir accueilli en inter-CHU. Merci à toute l'équipe médicale, au Pr Rannou, aux Drs Lefèvre-Collau, Nguyen, Couraud, Zauderer, Boisson, Couzi, Daste et Meyer-Jamy pour sa supervision et son expertise. Votre empreinte collective et individuelle sur ma pratique est significative. Je suis reconnaissant d'avoir pu collaborer avec vous tous et garde précieusement vos conseils pour la suite de mon exercice de la science médicale. Merci **Jennifer** pour la confiance que tu m'as accordé en me confiant les cours au BTS d'orthoprothèse. Merci à mes co-internes parisiens **Vanina, Isabelle, Emilie** et **Quentin**. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec vous et espère vous revoir bientôt !

A l'équipe enseignante du DIU de médecine manuelle et ostéopathie : Merci au Pr Dupeyron, au Drs Savelli, Dumay, Bonneau, Chevallier, Denais, Agounizera, Vaucher, Catalan, Fievet, Soulier, Bruniquel, Rey, Malafosse, Marthan et Duivon. Vos enseignements théoriques et pratiques sont la manière dont j'aurai aimé apprendre la médecine et j'en ferai bon usage.

Aux contributeurs à ma formation humaine : **Maitres Amar et Mai Guerrib**, Ryron et Renér Gracie, Jordan Harbinger, Antonio Centeno, Aaron Moreno, Brett McKay, Mickael Ferrari.

Sommaire

Liste du corps enseignant.....	3
Remerciements	10
1. Introduction	21
1.1. La lombalgie chronique	21
1.2. Comment la lombalgie chronique affecte le cortex préfrontal	22
1.3. La prise en charge de la lombalgie chronique.....	24
1.4. La réalité virtuelle	25
1.5. Hypothèse et but	26
2. Matériel et Méthode	27
2.1. Participants	27
2.2. Matériel.....	27
2.3. Protocole expérimental.....	31
2.3.1. Pré-test (J1).....	31
2.3.2. L'intervention	31
2.4. Critères de jugement	32
2.4.1. L'activité hémodynamique du cortex préfrontal.....	32
2.4.1.1. Acquisition hémodynamique par la fNIRS.....	32
2.4.1.2. Traitement des données NIRS	33
2.4.2. Douleur	35
2.4.3. Effort	35
2.4.4. Présence.....	35
2.4.5. Fréquence du pas.....	36
2.5. Analyses statiques.....	36
2.5.1. Description de la population incluse et des paramètres étudiés	36
2.5.2. Analyse des critères de jugements principaux	37
2.5.3. Analyse des critères de jugement secondaires.....	37
3. Résultats	37
3.1. Population d'étude	37
3.2. L'oxygénation du cortex préfrontal	38
3.3. Critères de jugement secondaires.....	41
3.4. Présence.....	41
4. Discussion.....	41
5. Conclusion	43
6. Références.....	44
7. Annexes	51
7.1. Descriptif des variables dépendantes	51
7.2. Cahier d'observation.....	52
7.3. Echelle de Borg modifiée.....	55
7.4. Igroup Presence Questionnaire.....	56
Serment	597
PERMIS D'IMPRIMER	59
Résumé	60

1. Introduction

1.1. La lombalgie chronique

La lombalgie chronique tient le premier rang des troubles musculosquelettiques dans le monde avec une prévalence moyenne de 18,3%. Elle est la première cause d'années vécues en situation de handicap (Hoy et al., 2012). Cette pathologie est définie par la persistance de douleurs rachidiennes basses au-delà de 3 mois d'évolution. Concernant l'étiologie, 90% sont des formes non spécifiques, ce qui signifie que ces douleurs sont sans rapport avec une pathologie définie (Koes et al., 2006). Le tableau clinique de la lombalgie chronique non spécifique (LCNS) associe un état douloureux d'évolution torpide à des conséquences multidimensionnelles de degré variable comprenant des limitations des capacités et des restrictions de participation (Waddell, 1996). Les conséquences physiques chroniques liées à la LCNS peuvent être expliquées par le modèle de peur-évitement (Leeuw et al., 2007), défini par l'évitement du mouvement et des activités dues à la peur de la douleur, duquel découlent des altérations motrices, sensibles et comportementales. Les altérations motrices comprennent le syndrome de déconditionnement avec une baisse des capacités physiques en endurance (WAGENMAKERS et al., 1988) et de la force musculaire en général (Lee et al., 1995). Il existe également une altération des schémas moteurs avec une moindre dissociation des épaules et du bassin lors de la marche expliquée par une contraction quasi permanente des muscles érecteurs du tronc (Arendt-Nielsen et al., 1996) et la perte des réflexes flexion relaxation (Shirado et al., 1995).

Il existe dans la littérature de fortes preuves qu'il y a peu de rapport entre la LCNS et les modifications structurales du rachis observables à l'imagerie (Bogduk, 2004; Kleinstück et al., 2006; Koes et al., 2006). Cette discordance remet en cause ce que Robinson et Apkarian (2009) nomment la « dysfonction d'organe distal », c'est-à-dire que la douleur est due à une anomalie structurelle et fonctionnelle périphérique du système musculosquelettique. Selon ce paradigme, la prise en charge des troubles musculosquelettiques repose sur la recherche de cette anomalie et la traiter par des moyens physiques (kinésithérapie, chirurgie, anesthésie). Cette stratégie s'avère peu efficace dans la prise en charge de la LNCS, à l'instar d'autres pathologies douloureuses chroniques telles que la fibromyalgie. Dans le même temps, de nombreuses études en imagerie cérébrale fonctionnelle ont mis en évidence des

modifications structurales et fonctionnelles du cerveau (Apkarian et al., 2004; Baliki et al., 2006; Apkarian et al., 2011; Kucyi et al., 2014) chez les patients atteints de LCNS. Ces modifications pourraient être en partie responsables du développement et de la chronicisation de la douleur. Par conséquent, des stratégies ciblant ces altérations pourraient contribuer à une meilleure prise en charge de cette pathologie.

1.2. Comment la lombalgie chronique affecte le cortex préfrontal

La LCNS induit avec le temps des réorganisations fonctionnelles du cortex cérébral, avec par exemple au niveau du cortex somatosensoriel une expansion de la zone de représentation du dos au dépend de celle des jambes, qui est d'autant plus importante que la douleur est ancienne (Flor et al., 1997). Ces réorganisation fonctionnelles s'accompagnent de modifications structurales du cortex avec entre autres la réduction de l'épaisseur des cortex préfrontal dorsolatéral (Apkarian et al., 2004, 2011; Schmidt-wilcke et al., 2006). Dans la LCNS, il a été observé en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) une modification d'activité du cortex préfrontal, en particulier dans ses régions médiales et dorsolatérales. Le cortex préfrontal médian a un rôle établi dans la rumination douloureuse définie comme la persévération des pensées négatives associées à la douleur et ses conséquences possibles (Kucyi et al., 2014). Le cortex préfrontal dorsolatéral est activé dans la régulation de l'intensité de la douleur perçue mais aussi dans les tâches impliquant la mémoire de travail, l'analgésie endogène dans la prise de placebo (Wager et al., 2004; Wand et al., 2011), les tâches attentionnelles (Peyron et al., 1999) et de modulation « top-down » de la douleur (Lorenz et al., 2003). Baliki et al. (2006) ont montré que l'activation du cortex préfrontal médial était d'autant plus importante que la douleur était forte (Figure 1). Ils ont aussi comparé l'activité du cortex préfrontal médial dans les douleurs spontanées à celles provoquées par des stimulations thermiques et concluent à une activation uniquement lors les douleurs spontanées de la LCNS. La douleur expérimentales thermique n'activant que l'insula.

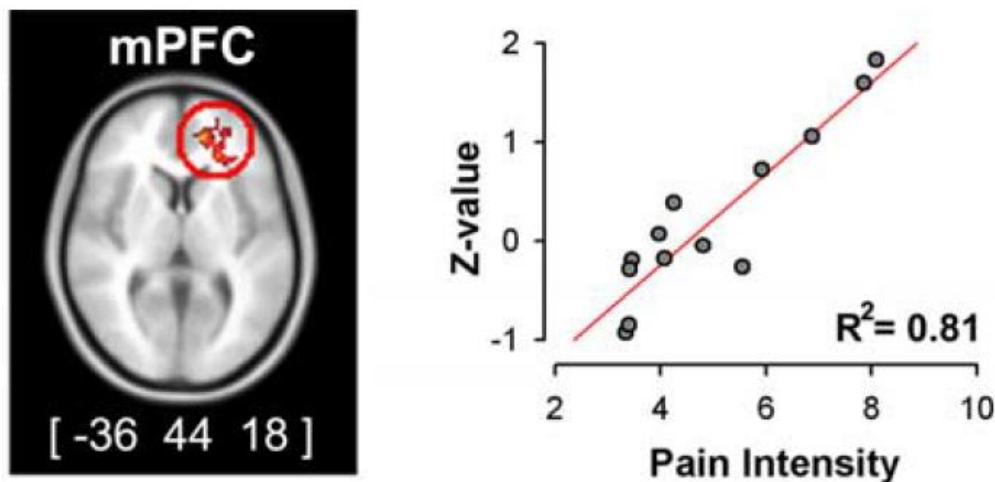


Figure 1 Analyse covariante entre l'intensité douloureuse moyenne (durant l'IRM) et l'activité cérébrale pendant les phases de douleurs spontanées montrant une activation d'un cluster unique du cortex préfrontal médial Baliki et al, 2006.

A l'inverse, l'activité du cortex préfrontal dorsolatéral est diminuée lors des pics de douleur spontanée. Ce même article démontre que ces 2 régions exercent entre elles un rétrocontrôle négatif (figure 2.). Ce dernier a également été observé dans le raisonnement émotionnel comparé au raisonnement non-émotionnel (Goel and Dolan, 2003; Northoff et al., 2004).

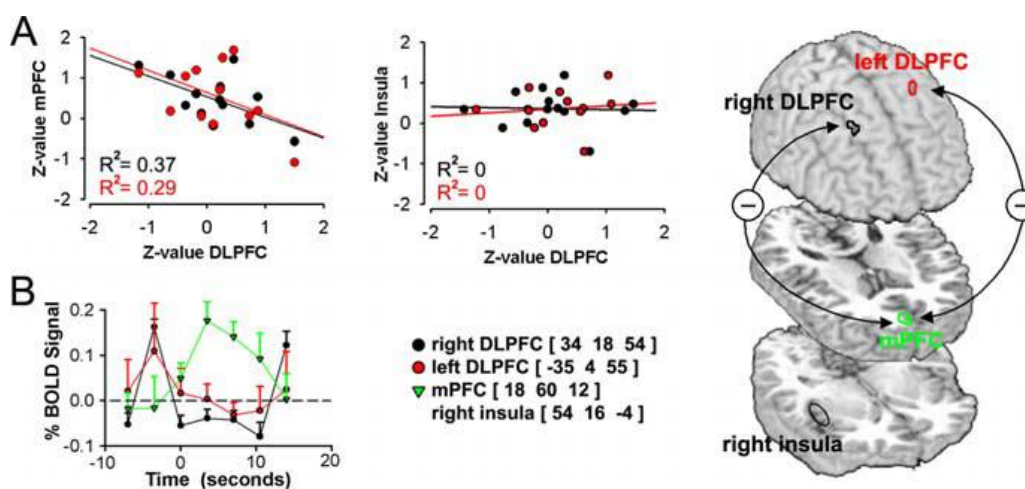


Figure 2 A, Corrélation inter-individuelle entre l'activité cérébrale pour les cortex préfrontaux dorso-latéraux droit et gauche. L'atrophie maximale dans la lombalgie chronique est inversement proportionnelle à l'activité du cortex préfrontal dorso-latéral ($p=0.01$), et non corrélée à l'activité de l'insula ($p=0.64$), lorsque la douleur spontanée est de haute intensité. B, réponses BOLD montrant une réponse rapide et transitoire du cortex préfrontal dorso-latéral qui se désactive lors que l'activité du cortex préfrontal médial augmente. Baliki et al, 2006.

Sur la base de ces résultats, Wand et O'Connell (2008) ont proposé un modèle de développement et de pérennisation de la LCNS qui ne serait pas expliquée par des facteurs périphériques mécaniques du système musculosquelettique mais par un fonctionnement altéré du cortex préfrontal (figure 3).

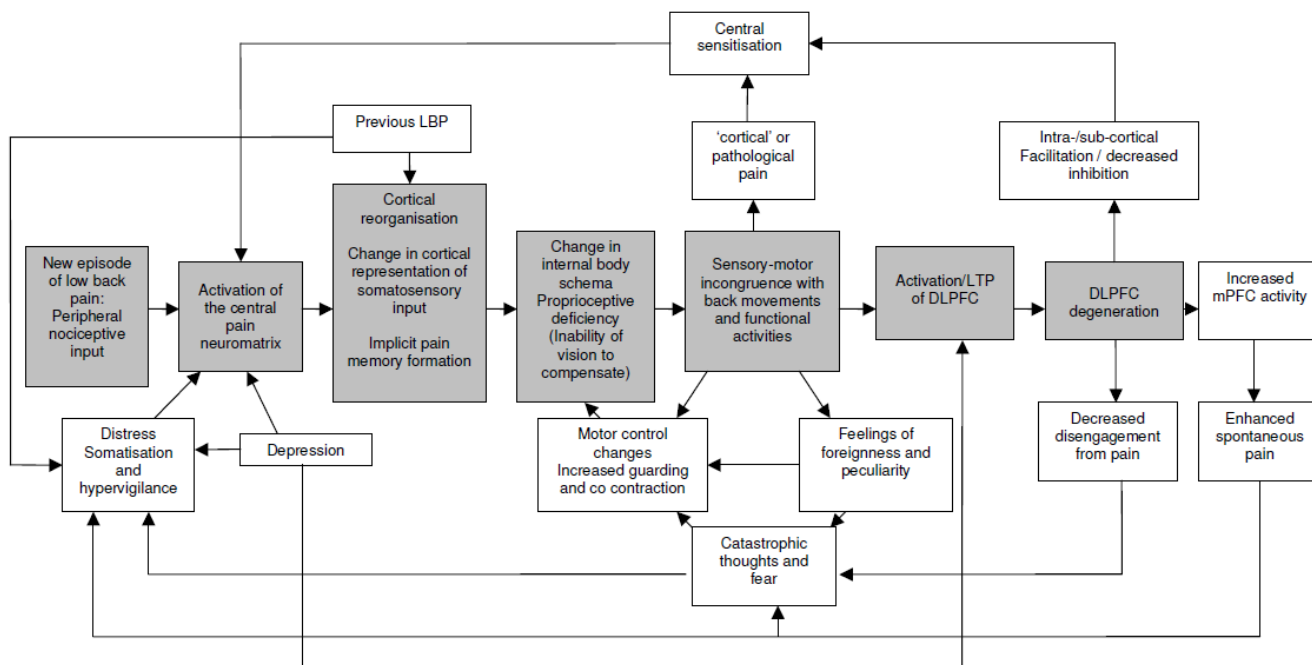


Figure 3 Modèle de la dysfonction corticale dans la LCNS selon Wand et O'Connell (2008). La lombalgie diminue l'activité du cortex préfrontal dorsolatéral. Le cortex préfrontal médial n'est pas inhibé. Son activité accrue majore la douleur spontanée et le catastrophisme favorisant la chronicisation.

Par ailleurs, les altérations fonctionnelles cérébrales observées dans la LCNS sont similaires à celles observées dans le syndrome douloureux régional complexe ou les douleurs de membre fantôme qui sont efficacement traitées par les thérapies cognitives (Wand et al., 2011). Cependant ces résultats ne sont pas pour autant directement généralisables à la LCNS dont les conséquences corticales n'ont pas été autant étudiées.

1.3. La prise en charge de la lombalgie chronique

La LCNS a été considérée comme « l'énigme de la santé publique » (Waddell, 1996) devant le fait constaté qu'aucun traitement médicamenteux n'est capable de la guérir. On sait désormais qu'il existe un large panel d'option thérapeutiques capables de réduire la douleur, le handicap et les conséquences de la douleur chronique (Maher et al., 2017). Parmi les thérapies non médicamenteuses, ce sont les programmes d'exercice

physique qui possèdent un haut niveau de preuve en termes d'efficacité comparé aux autres traitement conservateur (hors chirurgie). Il a été démontré que ces programmes ont un effet favorable durable sur la douleur et le handicap professionnel (Hayden et al., 2005; Oesch et al., 2010; Pillastrini et al., 2012; Geneen et al., 2017). Cependant, les sujets atteints de LCNS présentent un ressenti accru de la douleur et des difficultés à se désengager de la douleur qui sont les signes du catastrophisme (Seminowicz and Davis, 2006). Ce dernier est responsable des comportements d'évitement de la douleur menant à l'inactivité physique avec pour conséquences le déconditionnement à l'effort et la chronicisation de la douleur (Vlaeyen et al., 1995; Vlaeyen and Linton, 2000). Or il est recommandé que la pratique d'activités physiques d'intensité graduelle se fasse malgré la présence de la douleur (Turk D, Okifuji A, Sherman J, 2000; Vlaeyen et al., 2001) et il a été décrit deux types de programmes bien distincts : (i) L'activité graduelle qui s'articule autour de l'étalonnage des performances du sujet pour des exercices imposés suivis d'une progression au cours du temps imposé par un contrat entre ce dernier et le thérapeute; (ii) L'exposition graduelle comporte plusieurs étapes. Dans un premier temps, le sujet bénéficie d'une période d'éducation thérapeutique sur la fréquence de sa maladie et sa capacité à l'auto-gérer ainsi que sur le modèle peur-évitement. Le sujet liste ensuite des situations causant catastrophisme et comportements d'évitement pour ensuite s'y confronter graduellement durant la période de soins avec l'aide des rééducateurs jusqu'à ce que l'anxiété de la confrontation diminue (Vlaeyen et al., 2001). Il existe 3 méthodes d'exposition graduelle: *in vivo*, imaginée et *in virtuo* c'est-à-dire avec l'utilisation de la réalité virtuelle. La thérapie d'exposition *in virtuo* est une alternative viable lorsque la celle *in vivo* est trop coûteuse ou lorsque l'imagination du patient est un frein à son utilisation (Parsons and Rizzo, 2008; Powers and Emmelkamp, 2008).

1.4. La réalité virtuelle

La réalité virtuelle est définie comme une interface informatique de pointe mettant en jeu une simulation en temps réel et des interactions impliquant des modalités sensorielles multiples (Burdea and Coiffet, 2003). Elle permet à l'individu de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et/ou de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique (Fuchs et al., 2006). Son application est possible selon des interfaces techniques diverses pouvant être combinées, dont les casques de réalité virtuelle, les projections sur écrans, les capteurs de mouvements et les jeux vidéo

interactifs. Cette technologie a déjà montré son efficacité dans la prise en charge des douleurs aiguës (Mahrer and Gold, 2009; Malloy and Milling, 2010; Li et al., 2011) telles que la douleur nociceptive (chaleur, froid, piquûre), celles des soins de brûlures graves et des prélèvements sanguins veineux. Son utilisation dans la prise en charge des douleurs chroniques n'en est qu'à ses début mais avec des résultats prometteurs à court et moyen termes (Wiederhold et al., 2014; Morris et al., 2015; Kim et al., 2014; Thomas et al., 2016). La modulation des processus attentionnels en particulier la distraction est un mécanisme évoqué pour expliquer l'effet antalgique de la réalité virtuelle (Gold et al., 2007; Malloy and Milling, 2010; Trost et al., 2015). La distraction est définie comme tout processus éloignant l'attention de la douleur par la compétition d'une tâche (Van Ryckeghem et al., 2018). Il s'agit d'une méthode de prise en charge des douleurs chroniques fréquemment étudiée (Leventhal, 1992; Elomaa et al., 2009; Schreiber et al., 2014). Au niveau cortical, la distraction par réalité virtuelle cause une activation des régions corticales associées aux processus attentionnels couplée à une désactivation des régions corticales associées à la perception de la douleur (Bantick et al., 2002; Lorenz et al., 2003; Hoffman et al., 2006).

1.5. Hypothèse et but

La LCNS est donc une pathologie dont les mécanismes sont encore largement débattus mais l'hypothèse d'un dysfonctionnement du cortex cérébral lié à la douleur chronique est une piste de recherche d'intérêt. Il a été décrit i) la suractivation du cortex préfrontal médial lors des pics douloureux spontanés et ii) l'atteinte structurelle et fonctionnelle du cortex préfrontal dorsolatéral avec un rétrocontrôle réciproquement négatif connu. Dans le même temps, la pratique d'une activité physique est reconnue bénéfique pour le traitement de la lombalgie chronique mais les comportements d'évitement et de catastrophisme la limitent. Or, ces derniers peuvent être pris en charge par les thérapies cognitivo-comportementales, et plus précisément les thérapies d'exposition. On formule donc l'hypothèse que lors de l'activité physique en thérapie d'exposition *in virtuo*, la mobilisation des ressources attentionnelles d'un sujet lombalgique chronique est susceptible d'activer le cortex préfrontal dorsolatéral qui désactivera le cortex préfrontal médial, diminuant ainsi l'intensité de la douleur et permettant la prolongation de l'exercice physique. Le but de la recherche est donc de montrer un effet de la réalité virtuelle sur l'activité bilatérale des cortex préfrontaux médiaux et dorsolatéraux lors d'un exercice physique.

2. Matériel et Méthode

2.1. Participants

Il s'agit d'une étude monocentrique randomisée, en cross-over réalisée chez des sujets atteints de LCNS recrutés lors de leur prise en charge en rééducation au sein de la filière rachis du centre investigateur : le service de Médecine Physique et Réadaptation du CHU de Nîmes, France entre le 27/09/2018 et 31/10/2018 par un seul investigateur, interne de médecine physique (NDM) lors des consultations des médecins titulaires du service. Le critère d'inclusion est la présence d'une LCNS de plus de 3 mois chez des sujets ayant donné leur consentement libre et éclairé signé, affiliés ou bénéficiaire d'un régime d'assurance maladie, âgés entre 18 et 75 ans. Les critères d'exclusion comprennent une perte de poids récente non volontaire, des douleurs d'horaire inflammatoire (prédominance nocturne, nécessitant un dérouillage matinal, améliorées par l'activité physique), une fièvre associée, une anesthésie en selle, des troubles vésico-sphinctériens, une symptomatologie radiculaire typique, un antécédent de cancer, un antécédent de traumatisme du rachis, un antécédent d'usage de drogues intra veineuses, une intervention chirurgicale du rachis, une pathologie douloureuse des membres inférieurs (coxarthrose, gonarthrose, claudication vasculaire ou neurogène à la marche), l'existence d'une maladie mentale rendant impossible le remplissage du questionnaire, la non compréhension du français ou des consignes, l'impossibilité de réaliser l'expérience, un diagnostic tardif de cause secondaires de lombalgie. Lors de la visite d'inclusion, il a été effectué lors d'un interrogatoire un recueil de antécédents médicaux, du mode de vie et l'anamnèse de la maladie des sujets. Ils ont ensuite bénéficié d'un examen physique du rachis, des plans sous-pelviens et sensitivo-moteurs des membres inférieurs. Les comptes-rendus d'imagerie du rachis ont été également recueillis. Les sujets ont rempli les auto-questionnaires suivants : l'évaluation individuelle face à la douleur (version française du Fear Avoidance Belief Questionnaire, FABQ), l'échelle de dorso-lombalgie de Québec, l'auto-questionnaire de Dallas. Il s'agit d'une étude pilote.

2.2. Matériel

Le tapis roulant inclinable utilisé était le EN Motion, ENRAF NONIUS S.A., France, dont la vitesse est réglable de 0,4 - 18 km/h (par incrément de 0,1 km/h) ainsi que la pente de 0 % à +15 % (par incrément de 0,5 %).



Figure 4 EN Motion, ENRAF NONIUS S.A., France

L'enregistrement des modifications hémodynamiques du cortex préfrontal médian et du cortex préfrontal dorsolatéral sont effectuées grâce à un dispositif NIRS miniaturisé sans fil (Octamon, Artinis Medical System, Pays-Bas) et multicanaux (8 optodes) disposé en regard sur le lobe frontal du patient. Les variations de HbO₂ et HHb étaient mesurées par le système NIRS Octamon à ondes continues (760 et 850 nm) à une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz pendant toutes les sessions de tests. Les optodes émetteurs-récepteurs (canal de mesure à mi-distance) d'une distance de 3 cm étaient disposées à la surface du scalp. Pour la localisation spatiale et le positionnement des optodes NIRS, une correspondance a été établie entre les aires cérébrales ciblées et les repères EEG 10-20 (Koessler et al., 2009). La localisation spatiale était appréciée pour chaque optode sur les axes X, Y et Z grâce au système Fastrak Polhemus 3D en prenant en compte quatre points de référence : le Nasion (Nz), les lobes des oreilles gauches et droites et le vertex (Cz). Les données recueillies étaient ensuite analysées grâce au logiciel matlab et la toolbox NIRS-SPM (Ye et al., 2009), permettant l'obtention des coordonnées MNI (repère spatial standard du Montréal Neurological Institute) pour chaque canal et chaque optode mais aussi les MRICro Brodant Area (pourcentage de surface d'aire couvert pour un canal).

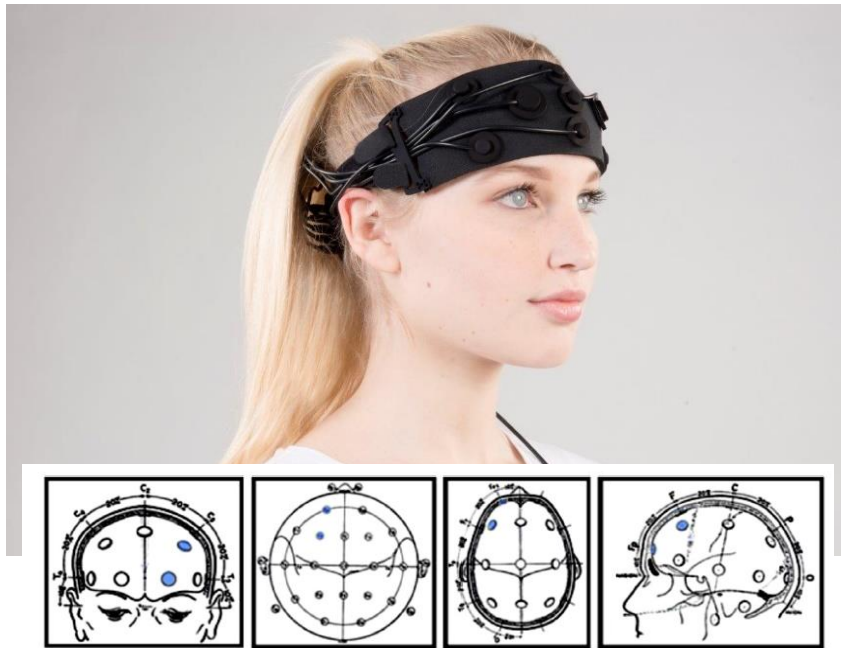


Figure 5 Octamon, Artinis Medical System, Pays-Bas

La fréquence de pas était obtenue grâce au logiciel Mobility Lab (APDM, INC., OR, USA) auquel était synchronisées 2 centrales inertielles OPAL (APDM inc., OR, USA) synchronisées à un ordinateur grâce à une station d'accueil. Un OPAL était attaché à chaque cheville du sujet par une lanière élastique. Les mesures étaient transmises au logiciel par l'utilisation d'un point d'accès également relié à l'ordinateur



Figure 6 Mobility Lab v.1 par APDM inc., OR, USA. De gauche à droite : point d'accès, station d'accueil avec OPAL et ordinateur



Figure 7 Centrale inertielle OPAL v.1 avec lanière élastique par APDM inc., OR, USA

La distraction par réalité virtuelle a été réalisée au moyen de l'application Bitgym développée par activetheory inc. Il s'agit d'une application de réentraînement cardiovasculaire utilisable sur tablette mettant en scène des trajets pédestres ou à vélo. Le sujet interagit avec la vitesse de défilement de la simulation grâce à la fréquence de ses mouvements lors de la marche captés par la caméra de la tablette. Pour améliorer l'immersion du sujet, la tablette est reliée par un câble HDMI à un écran de télévision.



Figure 9 Montage expérimental

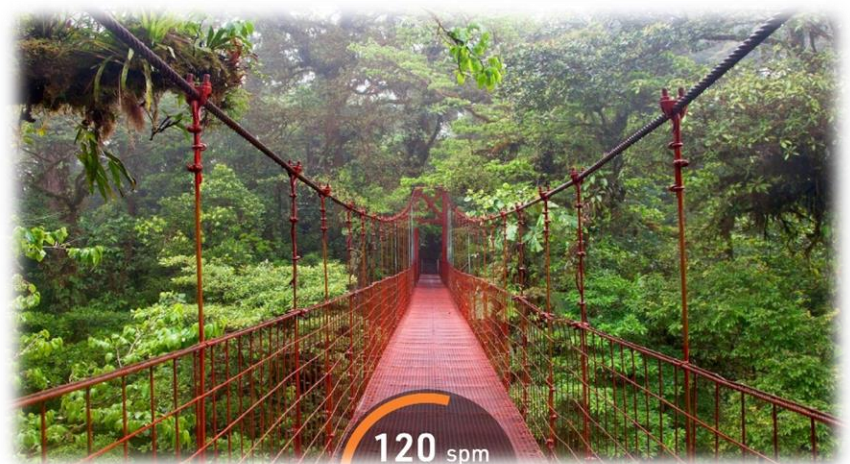


Figure 8 capture d'écran de Bitgym, activetheory inc.

2.3. Protocole expérimental

2.3.1. Pré-test (J1)

Après la visite de recrutement, les patients passent individuellement à J1 un pré-test d'inclusion réalisé par un seul investigateur (NDM). Il s'agit d'une séance de réentraînement physique par marche sur tapis roulant situé au plateau technique du centre investigateur. On trouve d'abord la vitesse de marche préférentielle du patient en commençant par une vitesse de 8 km/h, la vitesse est alors diminuée par incréments de 0,5 km/h par l'investigateur jusqu'à ce que le patient signale que la vitesse de marche est confortable. Cette vitesse est alors maintenue une minute et réajustée de la même manière jusqu'à ce que le sujet donne son accord définitif sur la vitesse. Le même processus est répété en augmentant la vitesse à partir de 5 km/h, pour trouver la vitesse confortable inférieure. On appelle vitesse préférentielle la moyenne des 2 vitesses jugées confortables par le sujet. L'investigateur augmente alors l'inclinaison du tapis par tranches de 0,5% jusqu'à ce que le sujet décrive l'apparition de douleurs lombaires. Si tel est le cas, le sujet est inclus s'il est capable de marcher 20 minutes dans ces conditions. On appelle alors les conditions individuelles la vitesse préférentielle et la pente individuellement déterminées pour chaque sujet.

2.3.2. L'intervention

Elle a lieu dans le centre investigateur. L'investigateur (NDM) fait réaliser individuellement les tests aux sujets inclus à J2 et J3 dans 2 situations différentes selon un ordre randomisé obtenu par table de randomisation fournie par le Laboratoire de Biostatistique, Épidémiologie clinique, Santé Publique Innovation et Méthodologie (BESPIM, Nîmes, France). Pour chaque test, le sujet commence par une période d'échauffement de 1 min à sa vitesse préférentielle puis il règle l'inclinaison du tapis de marche pour atteindre ses conditions individuelles. La mesure du niveau d'oxyhémoglobine bilatéral des cortex préfrontaux médiaux et dorsolatéraux par casque NIRS et celle de la fréquence de pas par centrales inertielles débute quand les conditions individuelles sont réunies et se termine 20 minutes après. Le sujet dispose ensuite d'une minute de récupération active à la vitesse de marche de son choix sur une pente nulle.

Dans la situation « sans RV », le sujet marche sur le tapis dans les conditions de son pré-test sans distraction par simulation de réalité virtuelle. Dans la situation « avec RV »,

on ajoute aux conditions de la situation « sans RV » la simulation de réalité virtuelle donc l'environnement virtuel est librement choisi par le sujet. Au terme de chaque test, il est recueilli auprès du patient l'intensité moyenne de la douleur au cours du test sur une EVA et une mesure de la perception de l'effort par l'échelle de Borg modifiée. Pour la condition « avec VR », la présence vécue par le patient est évaluée par l'auto-questionnaire igroup presence questionnaire (IPQ).

L'intervalle de temps entre chaque test est d'un jour minimum pour limiter les fluctuations de la douleur chez les sujets ainsi qu'un potentiel effet rémanent de la réalité virtuelle.

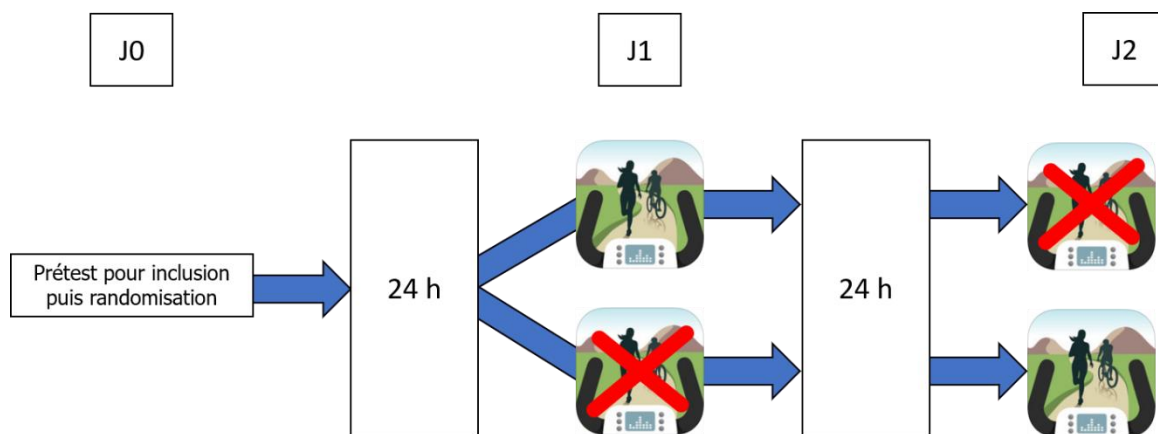


Figure 10 Design de l'étude en cross-over

2.4. Critères de jugement

2.4.1. L'activité hémodynamique du cortex préfrontal

2.4.1.1. Acquisition hémodynamique par la fNIRS

Les réponses d'oxygénation cérébrale ont été mesurées par l'utilisation de la méthode de spectroscopie dans le proche infra-rouge (NIRS) fonctionnant sur les principes suivants : les tissus humains sont relativement transparents aux rayons lumineux du spectre proche de l'infrarouge (NIR) (650-1000 nm). Après avoir traversé les tissus, ces rayons sont soit absorbés par les chromophores (molécules ayant des propriétés de réfraction de la lumière) soit diffusés dans les tissus, ces rayons sont surtout diffusés dans les tissus humains et le principal chromophore absorbant les rayons NIR est l'hémoglobine (Hb) contenue dans la microcirculation (capillaires, artérioles, veinules ; les vaisseaux sanguins de plus gros calibre ne sont pas visibles en NIRS de par leur

absorption totale des rayons NIR). Sur la base du même fonctionnement que l'IRMf, la NIRS fonctionnelle (fNIRS) se base sur l'utilisation du principe du couplage neurovasculaire sauf qu'elle détecte à l'aide de 2 longueurs d'ondes au minimum dans le spectre NIR des changements de propriétés de l'hémoglobine pour un site de mesure selon sa forme oxygénée ou non (Perrey and Ferrari, 2018). La fNIRS permet de quantifier simultanément les variations d'oxyhémoglobine (HbO₂) et de désoxyhémoglobine (HHb). Au cours d'une tâche cognitive et/ou motrice, l'augmentation de HbO₂ et la légère décroissance ou stabilité de HHb reflètent la vasodilatation du lit artériolaire et par conséquent un afflux sanguin causant une augmentation du débit et du volume sanguin cérébral pour alimenter les régions cérébrales actives (Scholkmann et al., 2014). La mesure par fNIRS correspond donc à une réponse hémodynamique reflétant indirectement l'activité cérébrale. La mesure de l'activité cérébrale par fNIRS est corrélée avec les mesures en IRMf et électroencéphalographie (Anwar et al., 2016). Un facteur correcteur du trajet différentiel en fonction de l'âge (DPF, Duncan et al., 1996) a été implémenté au début du protocole expérimental pour toutes les personnes. La qualité du signal NIRS était évaluée en temps réel lors du positionnement des optodes, grâce au logiciel Oxysoft (V2.1.6, Artinis, Pays Bas) en prenant en compte le pourcentage de lumière reçu selon le gain utilisé, puis en visualisant la réponse hémodynamique cérébrale optode par optode lors des tâches fonctionnelles subséquentes. Cette première phase permettait d'agir immédiatement si nécessaire pour améliorer la qualité du signal. Durant l'acquisition du signal NIRS, l'utilisation du logiciel Oxysoft permettait l'insertion d'évènements en début de chaque répétition de tâche, avec représentation sur le graphique de la série temporelle par des traits verticaux indicés par une lettre correspondant à l'évènement inséré.

2.4.1.2. Traitement des données NIRS

Il est réalisé par une étudiante en M1 STAPS (SJG) (Faculté de STAPS de Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier, FRANCE) et un professeur (GD) de l'IMT Mines-Alès (Alès, France). Pour les 8 canaux du cortex préfrontal, le traitement des signaux temporels bruts a été réalisé à l'aide du logiciel Oxysoft. Tout d'abord, une étape de « pre-processing » simple, à l'oeil nu, était effectuée avec élimination de certaines répétitions ou de certains canaux présentant des artefacts de différentes natures trop importants. Cette phase initiale était suivie par une phase de traitement ayant recours à un filtrage (filtre passe bas à une fréquence de coupure de 0,08 Hz pour minimiser les

influences systémiques telles que les fréquences cardiaque et respiratoire, ou encore les ondes de Mayer (Fekete et al., 2011). Après repérage du début de chaque tâche motrice, une opération de « detrending » (redressement du signal par suppression de la tendance de dérive) a été réalisée sur la base de cet événement. Le signal a été corrigé à une valeur de référence zéro au début des tests afin de permettre des comparaisons normalisées (Wagner et al., 2011). Les valeurs de HbO₂ et HHb ont été extraites (fonction intégrée au logiciel Oxysoft) puis moyennées sur une fenêtre centrée de 10 sec pour 5 blocs de 20% du temps d'exercice total. Seules les variations de O₂Hb reconnues pour être sensibles au flux sanguin cérébral (Strangman et al., 2002) ont été considérées dans notre étude en prenant en compte uniquement les valeurs des canaux sus cités de la région d'intérêt. Les variables d'intérêt retenues pour quantifier l'ordre de grandeur de l'activité hémodynamique cérébrale au cours de chaque test sur tapis de marche était la valeur moyenne de concentration HbO₂ en $\mu\text{mol}/\text{cm}$ et aire sous la courbe d'HbO₂ en unité d'aire.

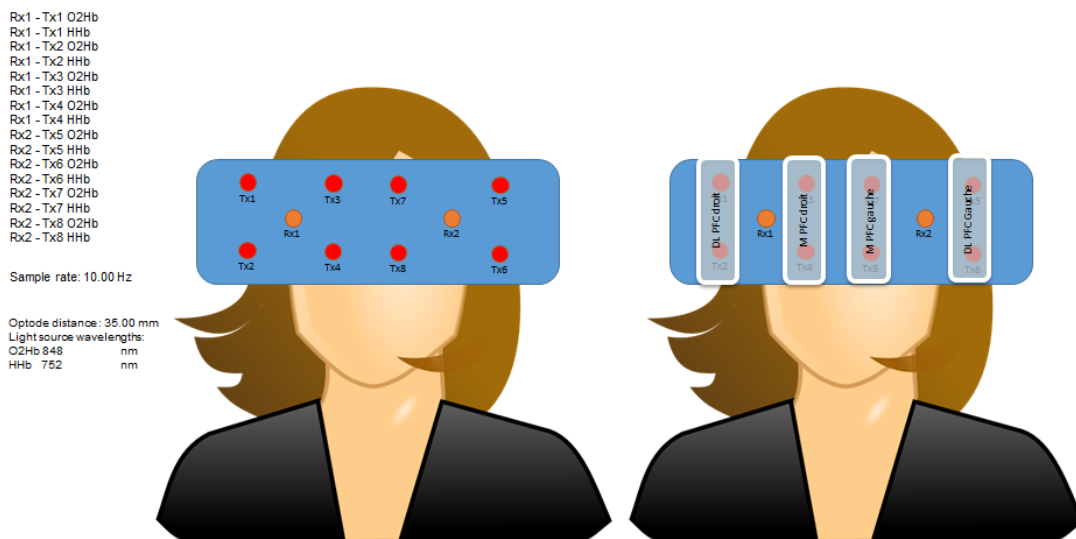


Figure 11 Répartition des canaux NIRS

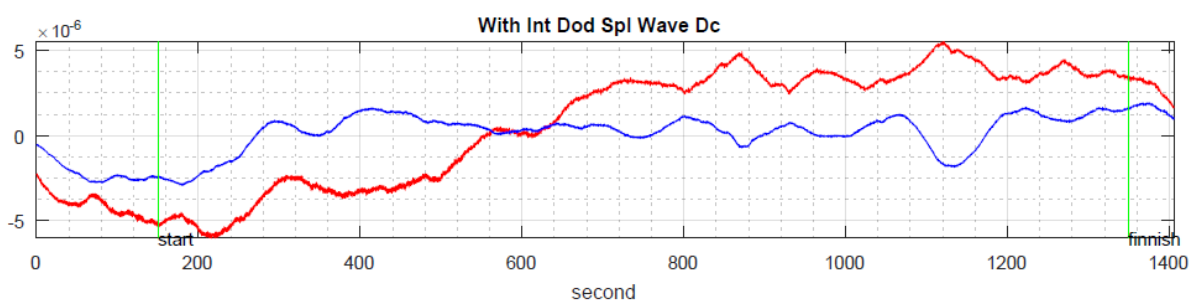


Figure 12 Exemple de mesure des niveaux d'HbO₂ et Hhb par NIRS. Tiré d'Oxysoft, Artinis Medical System, Pays-Bas

2.4.2. Douleur

La douleur moyenne durant l'effort sera auto-évaluée par le sujet par une échelle numérique de 0 à 10, zéro étant l'absence de douleur et dix la pire douleur imaginable par le sujet. La reproductibilité et la facilité d'utilisation de l'échelle numérique sont bien établies (Joos et al., 1991; Hjermstad et al., 2011). Elle est recueillie immédiatement à la suite des tests.

2.4.3. Effort

La mesure de l'effort perçu s'effectuera par l'échelle de Borg (1970, 1982) CR-10. Elle est recueillie immédiatement à la suite des tests (Pageaux, 2016).

2.4.4. Présence

La présence est définie comme l'ensemble des comportements, allant de rapports verbaux à des comportements complexes, en passant par des réactions physiologiques, observé lorsque l'utilisateur est confronté à un environnement virtuel (Fuchs et al., 2006). Elle est mesurée à l'aide de l'Group Presence Questionnaire (IPQ) (Schubert et al., 2001) dont la traduction en français a été effectuée par Isabelle Viaud-Delmon. L'IPQ se compose de 14 questions directes sur des échelles en 7 points divisées en 3 catégories. Chaque item est coté sur une échelle allant de 1 à 7, sachant que plus le score est élevé, plus la sensation de présence est élevée. Le questionnaire peut être utilisé comme mesure composite de la présence de valeur entre 7 et 98, ou être divisé en 3 sous-échelles mesurant les 3 composantes de la présence (la présence spatiale, l'implication et le réalisme de l'environnement virtuel). La présence spatiale comporte 5 questions évaluant la sensation du sujet d'être présent à l'intérieur de l'environnement virtuel. L'implication se mesure par 4 questions évaluant l'attention portée à l'environnement virtuel. Le réalisme de l'environnement est évalué par 4 questions. L'IPQ a de bonnes qualités psychométriques et une structure à facteurs qui ont été reproductibles dans de nombreux échantillons de population de sujets sains. Pour cette étude, il est choisi d'utiliser ce questionnaire pour évaluer la sensation de présence. Le questionnaire est rempli par le sujet immédiatement après le test en condition « avec RV ».

2.4.5. Fréquence du pas

La fréquence du pas est mesurée à J2 et J3 par des centrales inertielles OPAL couplées au logiciel Mobility Lab, qui sont fixées aux chevilles du sujet. L'enregistrement de ces données débute et se termine en même temps que la mesure en fNIRS de l'oxygénation du cortex préfrontal. A priori, le sujet atteint de LCNS marche avec des pas de longueur plus courte que le sujet sain, et cette longueur n'est pas altérée par l'exécution d'une tâche modifiant l'attention (Lamoth et al., 2008; Sloot et al., 2014).

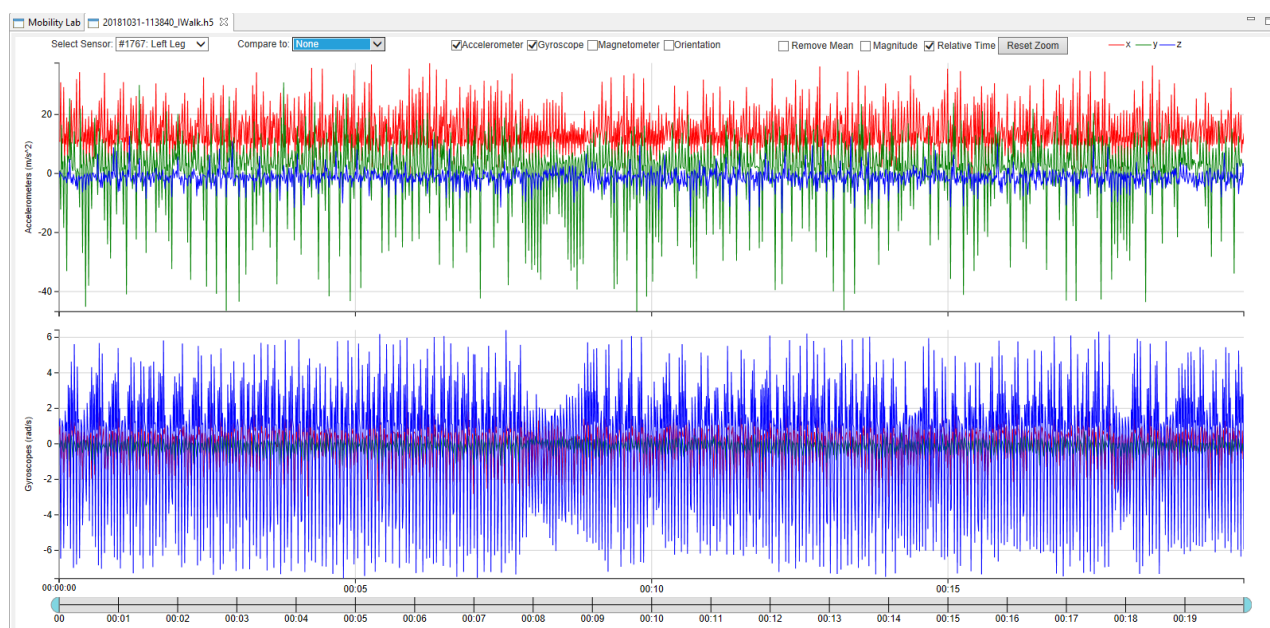


Figure 13 Enregistrement des paramètres de la marche par le logiciel Mobilitylab, APDM, OR, USA

2.5. Analyses statiques

2.5.1. Description de la population incluse et des paramètres étudiés

Les résultats statistiques seront présentés sous forme de moyennes \pm écarts-types pour les variables quantitatives dont la distribution est gaussienne, et médianes et intervalles dans le cas contraire. Pour les variables qualitatives, les effectifs et les pourcentages associés seront présentés.

2.5.2. Analyse des critères de jugements principaux

Tout patient randomisé dans l'étude sera également inclus dans les analyses qui seront réalisées en intention de traiter. Concernant l'hypothèse principale comprenant l'évolution des variables dépendantes (moyenne de concentration HbO₂ en $\mu\text{mol}/\text{cm}$ et aire sous la courbe d'HbO₂ en unité d'aire) pour deux conditions (avec ou sans distraction) d'exercice, il sera effectué une ANOVA à 1 facteur c'est-à-dire l'utilisation de la réalité virtuelle à mesures répétées pour un même sujet. Pour toutes les analyses, le seuil de significativité est fixé à 0,05. Concernant la prise en compte des données manquantes, inutilisées ou non valides si un patient est perdu de vue sans avoir présenté l'évènement, il sera considéré comme censuré à la date des dernières nouvelles. L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel R version 3.6.1. par un interne de Santé Publique et Médecine Sociale (NDP) titulaire du M2 Data Science (École Polytechnique/Université Paris-Saclay, France).

2.5.3. Analyse des critères de jugement secondaires

Les analyses des critères de jugement secondaires seront effectuées de la même manière que le critère de jugement principal. Les variables quantitatives seront décrites avec leur moyenne et leur déviation standard en cas de distribution Gaussienne. Dans le cas contraire elles seront décrites par leur médiane et leur intervalle interquartile. Une différence sera considérée comme statistiquement significative lorsque le degré de signification du test sera inférieur ou égal à 0,05. Il n'y avait pas de critère statistique d'arrêt de la recherche. Il n'était pas prévu de méthode de remplacement des données manquantes.

3. Résultats

3.1. Population d'étude

Le nombre total de participants recrutés était de 15 pour 12 inclus, 1 ayant retiré son consentement et 2 pour lesquels il existait des données manquantes. L'effectif était composé de 7 hommes et 5 femmes. Sept sujets n'étaient pas traités par médicaments antalgiques, 3 consommaient un antalgique de pallier 3 et un 1 a déclaré consommer un antalgique de pallier 1. Neuf sujets (75%) exerçaient une activité professionnelle.

Tableau 1 Description de la population d'étude

Sujets lombalgiques chroniques (n=12)	
Age (années)	43 (8,78)
Poids (kg)	81,08 (16,88)
Taille (cm)	174,75 (12,08)
IMC (kg/m ²)	26,51 (3,08)
Durée d'arrêt de travail (mois)	1 (0 ; 12)
Activité physique hebdomadaire (h)	0 (0 ; 15)
Vitesse préférentielle (km/h)	5,58 (1,69)
Pente (en % d'inclinaison)	5,17 (2,42)

moyenne (écart-type) ou médiane (min ; max)

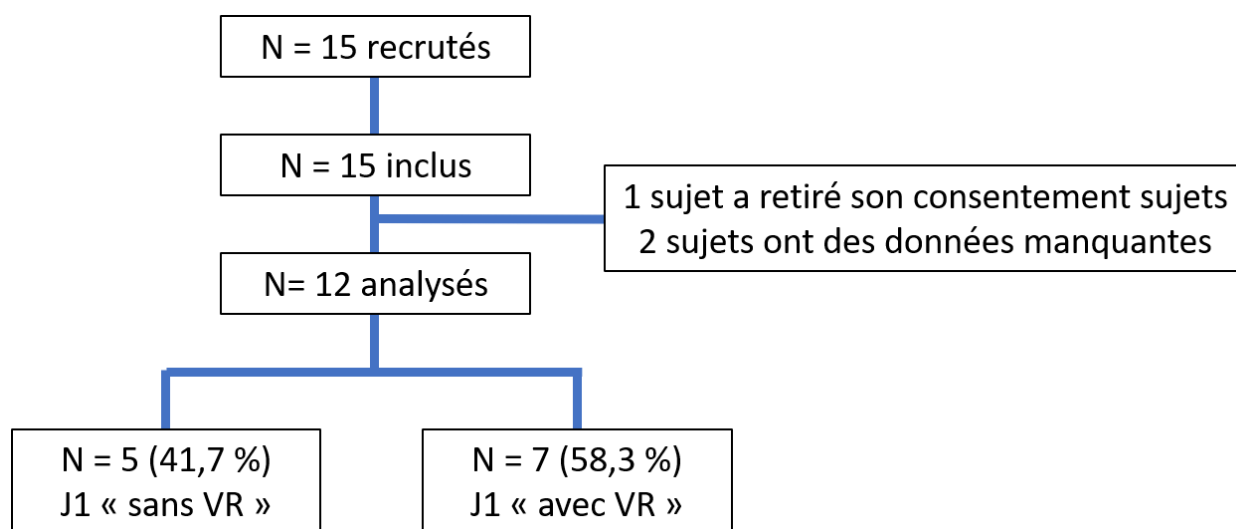


Figure 14 Flowchart

3.2. L'oxygénation du cortex préfrontal

Les résultats de mesure des niveaux d'HbO₂ sont disponibles en annexe 7.1.

Aucun effet significatif de la condition RV n'a pu être mise en évidence pour aucune des variables mesurées (Tableau 2).

Tableau 2

	F value	p value
Moyenne HbO2 DLPFC droit	0.4242874	0.5281790
Moyenne HbO2 DLPFC gauche	0.0322696	0.8607036
Moyenne HbO2 MPFC droit	0.0009967	0.9753801
Moyenne HbO2 MPFC gauche	1.4320037	0.2565926
AUC HbO2 DLPFC droit	0.1687880	0.6890808
AUC HbO2 DLPFC gauche	0.9951723	0.3399204
AUC HbO2 MPFC droit	0.2675946	0.6151926
AUC HbO2 MPFC gauche	0.0167705	0.8992990

AUC : aire sous la courbe

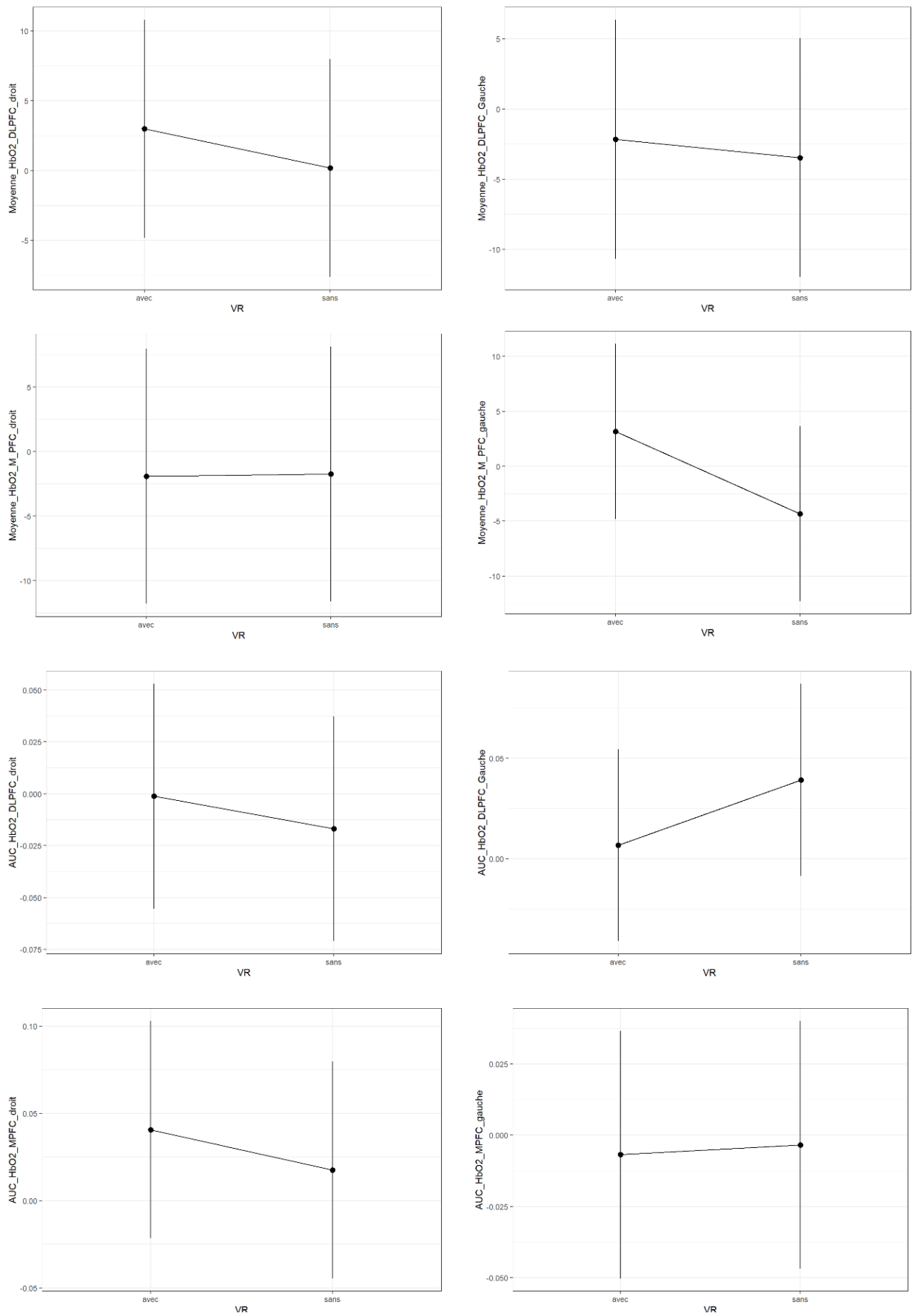


Figure 15 Comparaison 2 à 2 avec moyennes et écart-types des niveaux d'HbO2 aux cortex préfrontaux médiaux et dorsolatéraux avec et sans VR. Valeurs sont e-10.

3.3. Critères de jugement secondaires

Les mesures de la fréquence de pas, de l'effort perçu par échelle de Borg et de la douleur par EVA sont disponibles en annexe 7.1. Aucun effet significatif de la condition RV n'a pu être mise en évidence pour les variables mesurées (Tableau 3).

Tableau 3 effet de la réalité virtuelle sur les critères de jugements secondaires

	F value	p value
Fréquence de pas (pas/min)	0.4345010	0.5233481
Borg (EVA)	0.0541872	0.8202057
Douleur moyenne (EVA)	0.0082645	0.9291992

3.4. Présence

Tableau 4 résultats du questionnaire IPQ

	Moyenne (écart-type)
Sensation d'y être	3.42 (1.98)
Présence spatiale	18.83 (4.28)
Implication spatiale	3.42 (1.98)
Réalisme	18.00 (3.46)
Total	55.50 (12.24)

4. Discussion

L'objectif de notre étude était de montrer qu'en utilisant une stimulation audio-visuelle par réalité virtuelle lors d'un exercice physique (marche sur tapis incliné), l'activité bilatérale du cortex préfrontal, indirectement montrée par les variations hémodynamiques tendra vers une augmentation de l'activité du cortex préfrontal dorsolatéral et une diminution de l'activité du cortex préfrontal médial. Nos résultats n'ont pas montré d'effet de l'utilisation de la réalité virtuelle sur l'oxygénation des cortex préfrontaux dorsolatéraux. Ce résultat s'accompagne d'une stabilité de l'oxygénation des cortex préfrontaux médiaux. Durant l'expérience, l'utilisation de la réalité virtuelle n'a pas eu

d'effet sur la douleur ou le niveau d'effort perçu. La fréquence de pas n'a pas été modifiée avec l'utilisation de la réalité virtuelle. La présence mesurée des sujets durant le test avec réalité virtuelle est en moyenne de 55.50 (SD = 12.24).

Il a été démontré que la distraction par une tâche de tapping peut réduire le niveau d'HbO₂ du cortex préfrontal médial (Ozawa and Hiraki, 2017). La réalité virtuelle est une forme de stimulation audio-visuelle qui ne demande pas une implication cognitive aussi importante qu'une tâche de distraction. Cela pourrait expliquer l'absence d'effet de la réalité virtuelle sur le niveau d'HbO₂ au cortex préfrontal médial dans notre étude. La RV n'a pas eu d'effet sur le niveau d'oxygénation du cortex préfrontal dorsolatéral, ce qui n'est pas concordant avec le fonctionnement de cette région dans l'étude de Jones and Ekkekakis (2019). Cette étude a un design similaire à la nôtre mais étudiait les variations hémodynamiques du cortex préfrontal chez des sujets en surpoids lors d'un effort physique porté au seuil ventilatoire. Cette étude montre une diminution du niveau d'HbO₂ du cortex préfrontal dorsolatéral avec l'utilisation d'une stimulation visuo-auditive par clip musicaux. Selon les auteurs, ce résultat s'explique par une action concurrente de la vidéo avec le rôle de régulation d'une expérience désagréable du cortex préfrontal dorsolatéral. Cette découverte est en contradiction avec notre hypothèse que l'activité du cortex préfrontal dorsolatéral augmente avec l'utilisation de la réalité virtuelle. Il a été découvert dans le même temps qu'il existe un gradient dans la réduction du niveau d'HbO₂ en fonction des modalités de stimulation par réalité virtuelle. L'effet est d'autant plus important qu'elle est immersive, le casque de réalité virtuelle ayant un effet supérieur à l'écran de télévision. Concernant nos résultats, l'absence d'effet de la réalité virtuelle sur le niveau HbO₂ préfrontal dorsolatéral peut donc être expliqué par le faible niveau d'immersion d'un environnement virtuel projeté sur un écran de télévision comparé une simulation à l'aide d'un casque de réalité virtuelle.

Concernant la marche, le niveau d'HbO₂ est resté globalement stable avec l'utilisation ou non de la réalité virtuelle à une vitesse de marche constante. Ce résultat est concordant avec l'expérience de Suzuki et al. (2004) qui a montré que le niveau d'HbO₂ du cortex préfrontal n'augmentait uniquement que lors des phases d'accélération de la marche sur tapis. L'absence d'effet de la réalité virtuelle sur les niveaux d'HbO₂ du cortex préfrontal dans notre étude laisse donc supposer que celle-ci n'affecte pas l'activité du cortex préfrontal dû à la variation de la vitesse de marche. L'absence d'effet de la réalité virtuelle sur la fréquence de la marche est concordant avec la littérature (Lamoth et al., 2008).

Il n'a pas été constaté d'effet de la réalité virtuelle sur la douleur et l'effort perçu entre les 2 conditions. Cela peut s'expliquer par le fait que la condition réalité virtuelle ne se faisant qu'avec une télévision qui est moins immersive qu'un casque de réalité virtuelle (Jones and Ekkekakis, 2019), les conditions d'effort physique, à savoir une marche sur tapis roulant relevé à vitesse préférentielle, ne sont probablement pas suffisamment intenses pour qu'une différence entre les 2 conditions puisse être mise en évidence.

Cette étude comporte plusieurs biais pouvant influencer la significativité des résultats. Le faible effectif ne permet pas une puissance suffisante pour montrer un effet de la réalité virtuelle sur l'activité hémodynamique du cortex préfrontal. Il n'a pas été vérifié que les sujets inclus avaient une activité corticale préfrontale perturbée (suractivation médiale et sous-activation dorsolatérale) par IRM fonctionnelle. Il peut également exister un effet d'ordre, du fait du cross-over. En effet, il est possible que pour les sujets ayant débuté par la situation « sans VR » une augmentation du catastrophisme. Cela pourrait avoir pour conséquence une augmentation de l'activité du cortex préfrontal médial durant la séance d'exercice physique avec un effet rémanent lors du test « avec VR » si les 24h d'intervalle libre est trop court. L'inverse peut être supposé pour les patients ayant commencé avec le test « avec VR ». L'effet mesuré de la réalité virtuelle sur la douleur et l'effort perçu n'est pas significatif, mais le choix de ne recueillir ce paramètre qu'à la fin de l'intervention a été motivé par la volonté de ne pas influencer sur les effets de la réalité virtuelle et donc ne pas perturber ses effets potentiels. L'étude ayant eu lieu au CHU de Nîmes dans un contexte de soins, les sujets n'ont pas été évalués dans un environnement expérimental clos. L'interaction avec l'environnement de soins et du personnel peut en effet diminuer la sensation de présence dans l'environnement virtuel. Cela étant, nous avons testé la réalité virtuelle dans le contexte réel de son utilisation future et les résultats retrouvés seront donc les plus proches de la réalité de la prise en charge des sujets lombalgiques chroniques.

5. Conclusion

La distraction induite par réalité virtuelle sur écran ne semble pas avoir d'effet sur le métabolisme des cortex préfrontaux médiaux et dorsolatéraux mesurés par spectroscopie dans le proche infrarouge lors d'un test de marche sur tapis chez des patients lombalgiques chroniques. La modalité utilisée n'est probablement pas assez immersive pour montrer un effet.

6. Références

- Anwar, A.R., Muthalib, M., Perrey, S., Galka, A., Granert, O., Wolff, S., Heute, U., Deuschl, G., Raethjen, J., Muthuraman, M., 2016. Effective Connectivity of Cortical Sensorimotor Networks During Finger Movement Tasks: A Simultaneous fNIRS, fMRI, EEG Study. *Brain Topogr.* 29, 645–660.
<https://doi.org/10.1007/s10548-016-0507-1>
- Apkarian, A.V., Hashmi, J.A., Baliki, M.N., 2011. Pain and the brain: Specificity and plasticity of the brain in clinical chronic pain. *Pain* 152, S49–S64.
<https://doi.org/10.1016/j.pain.2010.11.010>
- Apkarian, A.V., Sosa, Y., Sonty, S., Levy, R.M., Harden, R.N., Parrish, T.B., Gitelman, D.R., 2004. Chronic Back Pain Is Associated with Decreased Prefrontal and Thalamic Gray Matter Density. *J. Neurosci.* 24, 10410–10415.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2541-04.2004>
- Arendt-Nielsen, L., Graven-Nielsen, T., Sværre, H., Svensson, P., 1996. The influence of low back pain on muscle activity and coordination during gait: a clinical and experimental study. *PAIN* 64, 231. [https://doi.org/10.1016/0304-3959\(95\)00115-8](https://doi.org/10.1016/0304-3959(95)00115-8)
- Baliki, M.N., Chialvo, D.R., Geha, P.Y., Levy, R.M., Harden, R.N., Parrish, T.B., Apkarian, A.V., 2006. Chronic Pain and the Emotional Brain: Specific Brain Activity Associated with Spontaneous Fluctuations of Intensity of Chronic Back Pain. *J. Neurosci.* 26, 12165–12173. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3576-06.2006>
- Bantick, S.J., Wise, R.G., Ploghaus, A., Clare, S., Smith, S.M., Tracey, I., 2002. Imaging how attention modulates pain in humans using functional MRI. *Brain J. Neurol.* 125, 310–319.
- Bogduk, N., 2004. Management of chronic low back pain. *Med. J. Aust.* 180, 79–83.
- Borg, G., 1970. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand. J. Rehabil. Med.* 2, 92–98.
- Borg, G.A., 1982. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14, 377–381.
- Burdea, G.C., Coiffet, P., 2003. *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons.
- Duncan, A., Meek, J.H., Clemence, M., Elwell, C.E., Fallon, P., Tyszczuk, L., Cope, M., Delpy, D.T., 1996. Measurement of cranial optical path length as a function of age using phase resolved near infrared spectroscopy. *Pediatr. Res.* 39, 889–894.
<https://doi.org/10.1203/00006450-199605000-00025>

- Elomaa, M.M., de C Williams, A.C., Kalso, E.A., 2009. Attention management as a treatment for chronic pain. *Eur. J. Pain Lond. Engl.* 13, 1062–1067.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpain.2008.12.002>
- Fekete, T., Rubin, D., Carlson, J.M., Mujica-Parodi, L.R., 2011. The NIRS Analysis Package: noise reduction and statistical inference. *PloS One* 6, e24322.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024322>
- Flor, H., Braun, C., Elbert, T., Birbaumer, N., 1997. Extensive reorganization of primary somatosensory cortex in chronic back pain patients. *Neurosci. Lett.* 224, 5–8.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(97\)13441-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(97)13441-3)
- Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., 2006. *Le traité de la réalité virtuelle volume 1 : L'Homme et l'environnement virtuel*, 3rd ed, Mathématique et informatique. Presse des Mines.
- Geneen, L.J., Moore, R.A., Clarke, C., Martin, D., Colvin, L.A., Smith, B.H., 2017. Physical activity and exercise for chronic pain in adults: an overview of Cochrane Reviews. *Cochrane Database Syst. Rev.* 4, CD011279.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD011279.pub3>
- Goel, V., Dolan, R.J., 2003. Reciprocal neural response within lateral and ventral medial prefrontal cortex during hot and cold reasoning. *NeuroImage* 20, 2314–2321.
- Gold, J.I., Belmont, K.A., Thomas, D.A., 2007. The neurobiology of virtual reality pain attenuation. *Cyberpsychology Behav. Impact Internet Multimed. Virtual Real. Behav. Soc.* 10, 536–544. <https://doi.org/10.1089/cpb.2007.9993>
- Hayden, J.A., van Tulder, M.W., Malmivaara, A., Koes, B.W., 2005. Exercise therapy for treatment of non-specific low back pain. *Cochrane Database Syst. Rev.* CD000335. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000335.pub2>
- Hjermstad, M.J., Fayers, P.M., Haugen, D.F., Caraceni, A., Hanks, G.W., Loge, J.H., Fainsinger, R., Aass, N., Kaasa, S., 2011. Studies Comparing Numerical Rating Scales, Verbal Rating Scales, and Visual Analogue Scales for Assessment of Pain Intensity in Adults: A Systematic Literature Review. *J. Pain Symptom Manage.* 41, 1073–1093. <https://doi.org/10.1016/j.jpainsymman.2010.08.016>
- Hoffman, H.G., Richards, T.L., Bills, A.R., Van Oostrom, T., Magula, J., Seibel, E.J., Sharar, S.R., 2006. Using FMRI to study the neural correlates of virtual reality analgesia. *CNS Spectr.* 11, 45–51.
- Hoy, D., Bain, C., Williams, G., March, L., Brooks, P., Blyth, F., Woolf, A., Vos, T., Buchbinder, R., 2012. A systematic review of the global prevalence of low back pain. *Arthritis Rheum.* 64, 2028–2037. <https://doi.org/10.1002/art.34347>

- Jones, L., Ekkekakis, P., 2019. Affect and prefrontal hemodynamics during exercise under immersive audiovisual stimulation: Improving the experience of exercise for overweight adults. *J. Sport Health Sci.* 8, 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2019.03.003>
- Joos, E., Peretz, A., Beguin, S., Famaey, J.P., 1991. Reliability and reproducibility of visual analogue scale and numeric rating scale for therapeutic evaluation of pain in rheumatic patients. *J. Rheumatol.* 18, 1269–1270.
- Kim, S.-S., Min, W.-K., Kim, J.-H., Lee, B.-H., 2014. The Effects of VR-based Wii Fit Yoga on Physical Function in Middle-aged Female LBP Patients. *J. Phys. Ther. Sci.* 26, 549–552. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.549>
- Kleinstück, F., Dvorak, J., Mannion, A.F., 2006. Are “structural abnormalities” on magnetic resonance imaging a contraindication to the successful conservative treatment of chronic nonspecific low back pain? *Spine* 31, 2250–2257. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000232802.95773.89>
- Koes, B.W., van Tulder, M.W., Thomas, S., 2006. Diagnosis and treatment of low back pain. *BMJ* 332, 1430–1434. <https://doi.org/10.1136/bmj.332.7555.1430>
- Koessler, L., Maillard, L., Benhadid, A., Vignal, J.P., Felblinger, J., Vespignani, H., Braun, M., 2009. Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10-10 system. *NeuroImage* 46, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.02.006>
- Kucyi, A., Moayedi, M., Weissman-Fogel, I., Goldberg, M.B., Freeman, B.V., Tenenbaum, H.C., Davis, K.D., 2014. Enhanced Medial Prefrontal-Default Mode Network Functional Connectivity in Chronic Pain and Its Association with Pain Rumination. *J. Neurosci.* 34, 3969–3975. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5055-13.2014>
- Lamoth, C.J.C., Stins, J.F., Pont, M., Kerckhoff, F., Beek, P.J., 2008. Effects of attention on the control of locomotion in individuals with chronic low back pain. *J. Neuroengineering Rehabil.* 5, 13. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-13>
- Lee, J.H., Ooi, Y., Nakamura, K., 1995. Measurement of muscle strength of the trunk and the lower extremities in subjects with history of low back pain. *Spine* 20, 1994–1996. <https://doi.org/10.1097/00007632-199509150-00006>
- Leeuw, M., Goossens, M.E.J.B., Linton, S.J., Crombez, G., Boersma, K., Vlaeyen, J.W.S., 2007. The Fear-Avoidance Model of Musculoskeletal Pain: Current State of Scientific Evidence. *J. Behav. Med.* 30, 77–94. <https://doi.org/10.1007/s10865-006-9085-0>

- Leventhal, H., 1992. I know distraction works even though it doesn't! *Health Psychol. Off. J. Div. Health Psychol. Am. Psychol. Assoc.* 11, 208–209.
- Li, A., Montaña, Z., Chen, V.J., Gold, J.I., 2011. Virtual reality and pain management: current trends and future directions. *Pain Manag.* 1, 147–157.
<https://doi.org/10.2217/pmt.10.15>
- Lorenz, J., Minoshima, S., Casey, K.L., 2003. Keeping pain out of mind: the role of the dorsolateral prefrontal cortex in pain modulation. *Brain* 126, 1079–1091.
<https://doi.org/10.1093/brain/awg102>
- Maher, C., Underwood, M., Buchbinder, R., 2017. Non-specific low back pain. *Lancet Lond. Engl.* 389, 736–747. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30970-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30970-9)
- Mahrer, N.E., Gold, J.I., 2009. The use of virtual reality for pain control: a review. *Curr. Pain Headache Rep.* 13, 100–109.
- Malloy, K.M., Milling, L.S., 2010. The effectiveness of virtual reality distraction for pain reduction: A systematic review. *Clin. Psychol. Rev.* 30, 1011–1018.
<https://doi.org/10.1016/j.cpr.2010.07.001>
- Morris, L.D., Louw, Q.A., Grimmer, K.A., Meintjes, E., 2015. Targeting pain catastrophization in patients with fibromyalgia using virtual reality exposure therapy: a proof-of-concept study. *J. Phys. Ther. Sci.* 27, 3461–3467.
<https://doi.org/10.1589/jpts.27.3461>
- Northoff, G., Heinzl, A., Bermpohl, F., Niese, R., Pfennig, A., Pascual-Leone, A., Schlaug, G., 2004. Reciprocal modulation and attenuation in the prefrontal cortex: an fMRI study on emotional-cognitive interaction. *Hum. Brain Mapp.* 21, 202–212. <https://doi.org/10.1002/hbm.20002>
- Oesch, P., Kool, J., Hagen, K.B., Bachmann, S., 2010. Effectiveness of exercise on work disability in patients with non-acute non-specific low back pain: Systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *J. Rehabil. Med.* 42, 193–205. <https://doi.org/10.2340/16501977-0524>
- Ozawa, S., Hiraki, K., 2017. Distraction decreases prefrontal oxygenation: A NIRS study. *Brain Cogn.* 113, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.02.003>
- Pageaux, B., 2016. Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. *Eur. J. Sport Sci.* 16, 885–894.
<https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1188992>
- Parsons, T.D., Rizzo, A.A., 2008. Affective outcomes of virtual reality exposure therapy for anxiety and specific phobias: A meta-analysis. *J. Behav. Ther. Exp. Psychiatry* 39, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jbtep.2007.07.007>

- Perrey, S., Ferrari, M., 2018. Muscle Oximetry in Sports Science: A Systematic Review. *Sports Med. Auckl. NZ* 48, 597–616. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0820-1>
- Peyron, R., García-Larrea, L., Grégoire, M.C., Costes, N., Convers, P., Lavenne, F., Mauguière, F., Michel, D., Laurent, B., 1999. Haemodynamic brain responses to acute pain in humans: sensory and attentional networks. *Brain J. Neurol.* 122 (Pt 9), 1765–1780.
- Pillastrini, P., Gardenghi, I., Bonetti, F., Capra, F., Guccione, A., Mugnai, R., Violante, F.S., 2012. An updated overview of clinical guidelines for chronic low back pain management in primary care. *Jt. Bone Spine Rev. Rhum.* 79, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2011.03.019>
- Powers, M.B., Emmelkamp, P.M.G., 2008. Virtual reality exposure therapy for anxiety disorders: A meta-analysis. *J. Anxiety Disord.* 22, 561–569. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2007.04.006>
- Robinson, J., Apkarian, A., 2009. Low Back Pain, in: *Functional Pain Syndromes: Presentation and Pathophysiology*. IASP; 1 edition (April 28, 2009), pp. 23–53.
- Schmidt-wilcke, T., Leinisch, E., Gänbauer, S., Draganski, B., Bogdahn, U., Altmepfen, J., May, A., 2006. Affective components and intensity of pain correlate with structural differences in gray matter in chronic back pain patients. *Pain* 125, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2006.05.004>
- Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A.J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., Wolf, M., 2014. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *NeuroImage* 85 Pt 1, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004>
- Schreiber, K.L., Campbell, C., Martel, M.O., Greenbaum, S., Wasan, A.D., Borsook, D., Jamison, R.N., Edwards, R.R., 2014. Distraction analgesia in chronic pain patients: the impact of catastrophizing. *Anesthesiology* 121, 1292–1301. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000465>
- Schubert, T., Friedmann, F., Regenbrecht, H., 2001. The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 10, 266–281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- Seminowicz, D.A., Davis, K.D., 2006. Cortical responses to pain in healthy individuals depends on pain catastrophizing. *Pain* 120, 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2005.11.008>

- Shirado, O., Ito, T., Kaneda, K., Strax, T.E., 1995. Flexion-relaxation phenomenon in the back muscles. A comparative study between healthy subjects and patients with chronic low back pain. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 74, 139–144.
- Sloot, L.H., van der Krogt, M.M., Harlaar, J., 2014. Effects of adding a virtual reality environment to different modes of treadmill walking. *Gait Posture* 39, 939–945. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.12.005>
- Strangman, G., Culver, J.P., Thompson, J.H., Boas, D.A., 2002. A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *NeuroImage* 17, 719–731.
- Thomas, J.S., France, C.R., Applegate, M.E., Leitkam, S.T., Walkowski, S., 2016. Feasibility and Safety of a Virtual Reality Dodgeball Intervention for Chronic Low Back Pain: A Randomized Clinical Trial. *J. Pain Off. J. Am. Pain Soc.* 17, 1302–1317. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2016.08.011>
- Trost, Z., Zielke, M., Guck, A., Nowlin, L., Zakhidov, D., France, C.R., Keefe, F., 2015. The promise and challenge of virtual gaming technologies for chronic pain: the case of graded exposure for low back pain. *Pain Manag.* 5, 197–206. <https://doi.org/10.2217/pmt.15.6>
- Turk D, Okifuji A, Sherman J, 2000. Psychological aspects of back pain: implications for physical therapists. In *Physical Therapy of the Low Back* 3rd edition. Edited by : Twomey LT, Taylor JR. Edinburgh: Churchill Livingstone.
- Van Ryckeghem, D.M., Van Damme, S., Eccleston, C., Crombez, G., 2018. The efficacy of attentional distraction and sensory monitoring in chronic pain patients: A meta-analysis. *Clin. Psychol. Rev.* 59, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2017.10.008>
- Vlaeyen, J.W., de Jong, J., Geilen, M., Heuts, P.H., van Breukelen, G., 2001. Graded exposure in vivo in the treatment of pain-related fear: a replicated single-case experimental design in four patients with chronic low back pain. *Behav. Res. Ther.* 39, 151–166.
- Vlaeyen, J.W., Kole-Snijders, A.M., Rotteveel, A.M., Ruesink, R., Heuts, P.H., 1995. The role of fear of movement/(re)injury in pain disability. *J. Occup. Rehabil.* 5, 235–252. <https://doi.org/10.1007/BF02109988>
- Vlaeyen, J.W., Linton, S.J., 2000. Fear-avoidance and its consequences in chronic musculoskeletal pain: a state of the art. *Pain* 85, 317–332.
- Waddell, G., 1996. Low back pain: a twentieth century health care enigma. *Spine* 21, 2820–2825.

- WAGENMAKERS, A.J.M., COAKLEY, J.H., EDWARDS, R.H.T., 1988. The metabolic consequences of reduced habitual activities in patients with muscle pain and disease. *Ergonomics* 31, 1519–1527.
<https://doi.org/10.1080/00140138808966801>
- Wager, T.D., Rilling, J.K., Smith, E.E., Sokolik, A., Casey, K.L., Davidson, R.J., Kosslyn, S.M., Rose, R.M., Cohen, J.D., 2004. Placebo-induced changes in fMRI in the anticipation and experience of pain. *Science* 303, 1162–1167.
<https://doi.org/10.1126/science.1093065>
- Wagner, B.P., Ammann, R.A., Bachmann, D.C.G., Born, S., Schibler, A., 2011. Rapid assessment of cerebral autoregulation by near-infrared spectroscopy and a single dose of phenylephrine. *Pediatr. Res.* 69, 436–441.
<https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182110177>
- Wand, B.M., O’Connell, N.E., 2008. Chronic non-specific low back pain - sub-groups or a single mechanism? *BMC Musculoskelet. Disord.* 9, 11.
<https://doi.org/10.1186/1471-2474-9-11>
- Wand, B.M., Parkitny, L., O’Connell, N.E., Luomajoki, H., McAuley, J.H., Thacker, M., Moseley, G.L., 2011. Cortical changes in chronic low back pain: current state of the art and implications for clinical practice. *Man. Ther.* 16, 15–20.
<https://doi.org/10.1016/j.math.2010.06.008>
- Wiederhold, B.K., Gao, K., Sulea, C., Wiederhold, M.D., 2014. Virtual Reality as a Distraction Technique in Chronic Pain Patients. *Cyberpsychology Behav. Soc. Netw.* 17, 346–352. <https://doi.org/10.1089/cyber.2014.0207>
- Ye, J.C., Tak, S., Jang, K.E., Jung, J., Jang, J., 2009. NIRS-SPM: statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy. *NeuroImage* 44, 428–447.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.036>

7. Annexes

7.1. Descriptif des variables dépendantes

			Moyenne avec VR	Moyenne sans VR
HbO2	DLPFC	droit	2.9897 (-4.825 ; 10.804)	0.1873 (-7.627 ; 8.002)
(µmol/cm)				
HbO2	DLPFC	gauche	-2.161 (-10.67 ; 6.352)	-3.467 (-11.98 ; 5.046)
(µmol/cm)				
HbO2 MPFC droit (µmol/cm)			-1.916 (-11.79 ; 7.957)	-1.735 (-11.61 ; 8.137)
HbO2	MPFC	gauche	3.171 (-4.803 ; 11.15)	-4.315 (-12.289 ; 3.66)
(µmol/cm)				
AUC HbO2 DLPFC droit (UA)			-0.001255 (-0.05543 ; 0.05292)	-0.016898 (-0.07108 ; 0.03728)
AUC HbO2 DLPFC gauche (UA)			0.006733 (-0.041004 ; 0.05447)	0.039222 (-0.008516 ; 0.08696)
AUC HbO2 MPFC droit (UA)			0.04056 (-0.02158 ; 0.1027)	0.01745 (-0.04469 ; 0.0796)
AUC HbO2 MPFC gauche (UA)			-0.006814 (-0.05032 ; 0.03669)	-0.003442 (-0.04695 ; 0.04006)
Valeur (min-max)				
			Moyenne avec VR	Moyenne sans VR
Fréquence de pas (pas/min)			115.2 (106.5 - 124.0)	115.7 (107.0 - 124.5)
Borg (EVA)			3.667 (2.639 - 4.694)	3.750 (2.723 - 4.777)
Douleur moyenne (EVA)			2.708 (1.500 - 3.917)	2.750 (1.542 - 3.958)
Valeur (min-max)				

7.2. Cahier d'observation

Evaluation du patient lombalgique

IDENTITE

ANTECEDENTS

INTEROGATOIRE

1) Situation socio-professionnelle

a. Statut familial et personnes à charge

b. Activité professionnelle

i. Activité

ii. Arrêt de travail nombre : durée dans l'année passée :

iii. Accident de travail date : / /

iv. Aménagement de poste

v. Reclassement professionnel

vi. Invalidité

vii. Reprise envisagée du travail

Satisfaction au travail

Niveau d'études

c. Activité physique (type et nombre d'heure par semaine) :

d. Tabagisme en paquets-années :

2) Histoire de la maladie

a. Date de début des symptômes

i. Facteur déclenchant

ii. Caractéristiques

Topographie

Facteurs aggravants

Rythme

Facteurs calmants

iii. Antécédent rachidien :

iv. Autres localisations douloureuses :

b. Evolution des douleurs (nombre d'épisode, durée), traitements entrepris :

i. Médical : antalgiques de pallier 1 2 3, AINS, myorelaxants, anti-épileptiques autres

ii. Rééducation (nombre de séances les 6 derniers mois) : physiothérapie/massage, étirements, renforcement musculaire, auto-rééducation, Cure thermale

- iii. Contention : type durée
- iv. Ostéopathie
- v. Infiltrations (localisation, sous scopie ou à l'aveugle, produit, effet, durée)
- vi. Contexte dépressif
- vii. EVA lombaire
- viii. Orthèse plantaire

EXAMEN CLINIQUE

Poids : kg Taille : m IMC : kg/m²

Bilan morphostatique du rachis

Plan frontal : différence de hauteur des épaules épines iliaques antéro-supérieures

Scoliose : équilibrée,

Gibbosité lombaire dorsolombaire dorsale droite
gauche

Plan sagittal : flèche cervicale flèche lombaire

Lombaire : hyperlordose délordose

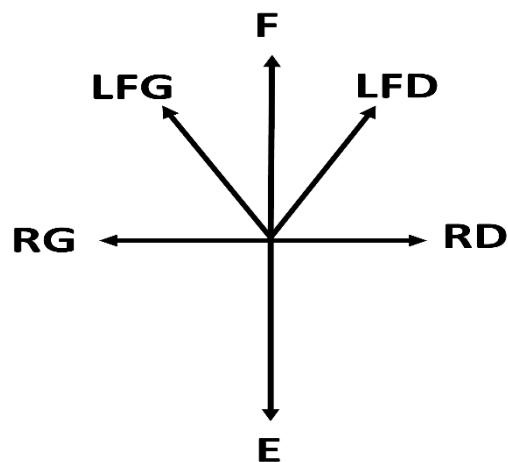
Dorsal : hypercyphose dos plat

Anté-projection cervicale oui non

Douleur à la palpation du rachis épineuse inter épineuse articulaire
postérieure

Contracture para vertébrale

Etoile de Maigne :



Schöber 10 + cm Schöber modifié 15 + cm Distance
doigt-sol

Plans sous-pelviens :

Angle poplité (au goniomètre) : droit ° gauche °
Distance talon fesse (en décubitus ventral) : droite cm gauche
cm

Inégalité de longueur de membre (ombilic malléole interne)

Lasèque Leri

Examen neurologique :

Troubles vésico-sphinctériens :

Réflexes ostéotendineux rotulien droit gauche
Achilléen droit gauche

Déficit sensitif :

Déficit moteur :

Imagerie (compte rendu) BILAN

Questionnaire :

- FABQ : /24 pour les activités physiques, /42 pour les activités professionnelles.
- QUEBEC : /100.
- DALLAS : % de retentissement sur les activités de la vie quotidienne, % sur les activités professionnelles et de loisirs, % sur l'anxiété et la dépression, % sur la sociabilité.
- Echelle de Borg : pré-test /10, J1 /10, J2 /10
- EVA douleur moyenne durant l'exercice : pré-test /10, J1 /10, J2 /10

7.3. Echelle de Borg modifiée

ÉCHELLE DE BORG MODIFIÉE

Cote	Perception
0	Rien du tout
0,5	Très très facile
1	Très facile
2	Facile
3	Moyen
4	Un peu difficile
5	Difficile
6	
7	Très difficile
8	
9	
10	Très très difficile (presque maximal)

LÉGENDE :

	Intensité faible
	Intensité modérée
	Intensité élevée

7.4. Igroup Presence Questionnaire

Voici plusieurs propositions qui peuvent s'appliquer à l'expérience que vous venez d'avoir. Indiquez, s'il vous plait, si chacune de ces propositions s'applique ou non à votre expérience. Vous pouvez utiliser n'importe quelle graduation. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, seule votre opinion est importante. Vous remarquerez que certaines questions se ressemblent. Ceci est nécessaire pour des raisons statistiques. Rappelez-vous que vous devez répondre à ces questions en vous référant seulement à l'expérience que vous venez juste d'avoir.

A quel point étiez-vous conscient du monde réel environnant alors que vous étiez en train de naviguer dans le monde virtuel ? (par exemple : sons, température de la pièce, présence d'autres gens, etc.) ?

Extrêmement conscient Pas conscient du tout
1 2 3 4 5 6 7
Modérément conscient

Comment le monde virtuel vous a-t-il semblé ?

Complètement réel Pas du tout réel
1 2 3 4 5 6 7

J'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel plutôt que d'agir sur un quelconque mécanisme à l'extérieur de celui-ci.

Pas du tout d'accord Complètement d'accord
1 2 3 4 5 6 7

A quel point votre expérience dans l'environnement virtuel vous a-t-elle semblée cohérente avec votre expérience dans le monde réel ?

Pas cohérente Très cohérente
1 2 3 4 5 6 7
Modérément cohérente

A quel point le monde virtuel vous a-t-il semblé réel ?

A peu près aussi réel qu'un monde Indistinguable du monde réel
maginé
1 2 3 4 5 6 7

Je ne me suis pas senti présent dans l'espace virtuel.

Pas senti présent Senti présent
1 2 3 4 5 6 7

Je n'étais pas conscient de mon environnement réel.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être".

Pas du tout Beaucoup
1 2 3 4 5 6 7

D'une certaine façon, j'ai eu l'impression que le monde virtuel m'entourait.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

Je me suis senti présent dans l'espace virtuel.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

Je faisais toujours attention à l'environnement réel.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

Le monde virtuel semblait plus réaliste que le monde réel.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

J'avais l'impression que j'étais juste en train de percevoir des images.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

J'étais complètement captivé par le monde virtuel.

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord
1 2 3 4 5 6 7

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

Modifications hémodynamiques du cortex préfrontal induite par la réalité virtuelle chez le sujet lombalgique chronique en situation d'exercice physique.

La Lombalgie chronique non spécifique est responsable de schéma d'activation pathologiques du cortex préfrontal augmentant le ressenti de la douleur, ce qui empêche l'exercice physique prolongé et donc le traitement rééducatif. La distraction est connue pour diminuer le ressenti de la douleur dans les pathologies douloureuses chroniques. L'objectif est de rechercher l'effet de la distraction par réalité virtuelle sur les schémas d'activation des cortex préfrontaux dorsolatéraux et médiaux chez des sujets atteints de lombalgie chronique non spécifique à l'aide de la spectroscopie dans le proche infrarouge durant une séance d'exercice physique (marche sur tapis roulant incliné). La spectroscopie dans le proche infrarouge est une méthode d'imagerie fonctionnelle cérébrale utilisant le couplage neuro-vasculaire par la mesure des niveaux d'oxyhémoglobine au niveau cortical. Douze sujets prise en charge dans un programme de restauration fonctionnelle du rachis recrutés au CHU de Nîmes ont été inclus. Ils ont effectué deux séances de marche sur tapis roulant incliné avec et sans distraction par simulation de réalité virtuelle (Bitgym). L'activité du cortex préfrontal était mesurée avec un casque de spectroscopie dans le proche infrarouge. Les niveaux d'oxyhémoglobine ont été mesurés aux cortex préfrontaux et médiaux durant les 2 séances puis l'effet de la réalité virtuelle a été recherché. Aucun effet de la réalité virtuelle diffusé par écran de télévision n'a été démontré, probablement dû à un manque d'immersivité.

Mots-clés : lombalgie chronique, cortex préfrontal, réalité virtuelle, distraction, NIRS, exercices physiques

Haemodynamic modifications of prefrontal cortex activation by virtual reality distraction in chronic low back pain subjects during physical exercises.

Chronic low back pain is responsible for pathological patterns of prefrontal cortex activation enhancing pain perception and preventing prolonged physical exercise and therefore rehabilitation itself. Distraction is known to diminish pain intensity in chronic pain syndromes. The objective is to research the effect of virtual reality on dorsolateral and medial prefrontal cortex activation patterns using near infrared spectroscopy in chronic low back pain subjects during a physical exercise task (walking on a tilted treadmill) with and without distraction by a virtual reality simulation (BitGym). fNIRS is a brain imaging method using neuro-vascular coupling by measuring levels of oxyhemoglobin within brain cortex. Twelve subjects with non-specific chronic low back pain undergoing a physical rehabilitation program within the Nîmes city hospital were included in the study. Subjects underwent two identical sessions treadmill walk with and without distraction by a virtual reality simulation (BitGym) wearing functional near infrared spectroscopy (fNIRS) equipment in a random order. Oxyhemoglobin concentrations were measured in the dorsolateral and medial prefrontal cortex regions during each treadmill sessions and then compared. No effect of TV-broadcasted virtual reality distraction was demonstrated during this experiment, possibly due to a lack of immersion.

Key-words: chronic low back pain, prefrontal cortex, virtual reality, distraction, NIRS, physical exercise