



HAL
open science

Stratégies perceptive-motrices durant la locomotion des patients atteints d'une lombalgie chronique non-spécifique : vers de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi

Agathe Bilhaut

► **To cite this version:**

Agathe Bilhaut. Stratégies perceptive-motrices durant la locomotion des patients atteints d'une lombalgie chronique non-spécifique : vers de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi. Education. Université Rennes 2, 2024. Français. NNT : 2024REN20004 . tel-04526717

HAL Id: tel-04526717

<https://theses.hal.science/tel-04526717v1>

Submitted on 29 Mar 2024

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.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ RENNES 2

ÉCOLE DOCTORALE N° 646

Éducation, Langages, Interactions, Cognition, Clinique, Expertise

Spécialité : STAPS

Par

Agathe BILHAUT

Stratégies perceptivo-motrices durant la locomotion des patients atteints d'une lombalgie chronique non-spécifique : vers de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi.

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 21 février 2024

Unité de recherche : Laboratoire Mouvement, Sport, Santé - M2S (Rennes 2)

Rapporteurs avant soutenance :

Anouk LAMONTAGNE Professeure à l'Université de McGill (Montréal, Canada)

Véronique FEIPEL Professeure à l'Université Libre de Bruxelles (Bruxelles, Belgique)

Composition du Jury :

Président :

Examineurs :

Anouk LAMONTAGNE

Véronique FEIPEL

Jerry DRAPER-RODI

Michel AUDIFFREN

Professeure à l'Université de McGill (Montréal, Canada)

Professeure à l'Université Libre de Bruxelles (Bruxelles, Belgique)

Professeur associé à University College of Osteopathy (Londres, Royaume-Uni)

Professeur à l'Université de Poitiers (Poitiers, France)

Dir. de thèse : Armel CRETUAL

Co-dir. de thèse : Anne-Hélène OLIVIER

Mathieu MENARD

Maitre de conférences, HDR à l'Université Rennes 2 (Rennes, France)

Maitre de conférences, HDR à l'Université Rennes 2 (Rennes, France)

Docteur à l'Institut d'Ostéopathie de Rennes-Bretagne (Bruz, France)

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ RENNES 2

ÉCOLE DOCTORALE N° 646

Éducation, Langages, Interactions, Cognition, Clinique, Expertise

Spécialité : STAPS

Par

Agathe BILHAUT

Stratégies perceptivo-motrices durant la locomotion des patients atteints d'une lombalgie chronique non-spécifique : vers de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi.

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 21 février 2024

Unité de recherche : Laboratoire Mouvement, Sport, Santé - M2S (Rennes 2)

Rapporteurs avant soutenance :

Anouk LAMONTAGNE Professeure à l'Université de McGill (Montréal, Canada)

Véronique FEIPEL Professeure à l'Université Libre de Bruxelles (Bruxelles, Belgique)

Composition du Jury :

Président :

Examineurs :

Anouk LAMONTAGNE

Véronique FEIPEL

Jerry DRAPER-RODI

Michel AUDIFFREN

Professeure à l'Université de McGill (Montréal, Canada)

Professeure à l'Université Libre de Bruxelles (Bruxelles, Belgique)

Professeur associé à University College of Osteopathy (Londres, Royaume-Uni)

Professeur à l'Université de Poitiers (Poitiers, France)

Dir. de thèse : Armel CRETUAL

Co-dir. de thèse : Anne-Hélène OLIVIER

Mathieu MENARD

Maitre de conférences, HDR à l'Université Rennes 2 (Rennes, France)

Maitre de conférences, HDR à l'Université Rennes 2 (Rennes, France)

Docteur à l'Institut d'Ostéopathie de Rennes-Bretagne (Bruz, France)

REMERCIEMENTS

Je tenais à remercier en tout premier lieu mes directeurs de thèse, Anne-Hélène, Mathieu et Armel. Je me sens vraiment chanceuse d'avoir pu mener ce projet encadrée par cette équipe (et quelle équipe!). Réaliser une thèse était un objectif mûri depuis plusieurs années et cela n'aurait été possible sans la confiance que vous m'avez accordée. Un grand merci d'avoir décidé de créer ce projet de recherche en alliant science du mouvement, thérapies manuelles et science cognitive, qui me permettait de mettre à profit mes connaissances dans vos thématiques de recherche. Merci pour votre disponibilité avec ces réunions hebdomadaires qui, au fil du temps, ont construit de plus en plus clairement ma pensée scientifique et qui étaient des vrais moments de partage scientifiques et humains. Merci pour les nombreux projets que vous m'avez proposés (congrès, collaborations, etc.) qui m'ont montré comment mener une recherche et savoir s'entourer. Enfin merci pour vos qualités humaines aussi bien dans mon encadrement mais également dans vos interactions qui font que je souhaite à tous les prochains doctorants d'être sous votre direction.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté de lire et de réviser mon travail.

Cette thèse n'aurait pas été la même sans le laboratoire M2S et tous ses membres. Je tenais à remercier chaleureusement l'équipe administrative qui, grâce à leur disponibilité, rendent les à côté de la thèse très facile. Merci également au directeur du laboratoire, Benoit Bideau, de m'avoir accueillie. Merci à l'ED ELICCE d'avoir soutenu financièrement ce travail avec l'obtention d'une bourse de thèse de doctorat de 3 ans mais également à l'Institut d'Ostéopathie de Rennes-Bretagne pour la prolongation de six mois.

Merci à tous mes collègues doctorants qui, en plus de battre tous les records en course à pied et à vélo, m'ont permis de découvrir un nouveau monde qui est le sport. Merci pour toutes nos pauses déjeuner endiablées sur tous les sujets possibles et imaginables qui créaient des débats dont certains ne sont toujours pas résolus mais qui j'espère resteront ouverts encore quelques années. Un énorme merci pour votre aide lors de mes passations d'expériences, votre bonne humeur et les gâteaux du lundi qui entretenaient cette si belle ambiance.

Mes pensées vont également à ma famille, mes tantes, mes oncles et mes cousins qui ont écouté chaque Noël parler de largeur d'ouverture de porte ou de contournement d'obstacle dynamique. Merci à mes amis et leur soutien sans faille, vous m'avez encouragé tout au long de ce travail de thèse et je ne vous en remercierai jamais assez.

Enfin merci à mes parents et à mon compagnon, qui m'ont soutenu à toutes les étapes de cette thèse. Cette thèse était mon rêve et je vous la dédie.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
I Revue de la littérature	11
1 Lombalgie chronique non-spécifique	12
1.1 Définition de la lombalgie chronique non spécifique	12
1.2 Facteurs biologiques accompagnant la lombalgie chronique non spécifique .	14
1.2.1 Voies neurophysiologiques de la douleur : modèle théorique	14
1.2.2 Mécanisme de la modulation de la douleur et lombalgie chronique non spécifique	16
1.3 Facteurs psychologiques et lombalgie chronique non spécifique	18
1.3.1 Facteurs cognitifs et lombalgie chronique non spécifique	18
1.3.2 Facteurs émotionnels et lombalgie chronique non spécifique	30
1.4 Modèles psychologiques de la chronicisation de la douleur	33
1.4.1 Modèle de peur et d'évitement	33
1.4.2 Modèle d'acceptation et d'engagement	35
1.4.3 Modèle de résolution de problèmes mal orientée	36
1.4.4 Modèle d'auto-efficacité	37
1.4.5 Modèle stress-diathèse	38
2 Prise en charge et évaluation de la lombalgie chronique non spécifique	39
2.1 Prise en charge de la lombalgie chronique non-spécifique	39
2.1.1 Recommandations portant sur la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique	39
2.1.2 Modèle biopsychosocial et lombalgie chronique non spécifique . . .	41
2.1.3 Paramètres et outils d'évaluation mesurant l'efficacité de la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique	43
2.2 Revue systématique : Domaines d'évaluation et outils de mesure utilisés pour évaluer la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique en thérapie manuelle	45
2.2.1 Approches et objectifs	45
2.2.2 Méthodologie	45
2.2.3 Résultats	49
2.2.4 Risque de biais des études	53

2.2.5	Synthèse des résultats	54
2.2.6	Discussion	59
3	Vers de nouvelles méthodes d'analyse de la lombalgie chronique non spécifique : analyse du mouvement	66
3.1	Marqueurs biomécaniques de la lombalgie chronique non spécifique	66
3.1.1	Contrôle postural et lombalgie chronique non spécifique	66
3.1.2	Contrôle de la mobilité et lombalgie chronique non spécifique	70
3.1.3	Implication des facteurs psychologiques de la lombalgie chronique non spécifique sur le contrôle postural et le contrôle de la mobilité	74
3.2	Navigation dans un environnement encombré	77
3.2.1	Concept d'affordance	78
3.2.2	Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique : tâche de passage à travers des ouvertures horizontales	82
3.2.3	Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux : tâche de passage à travers des ouvertures horizontales	89
3.2.4	Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement dynamique : tâche de croisement entre deux marcheurs	95
4	Synthèse et objectifs	105
II	Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique	109
1	Approches et objectifs	110
2	Méthodologie	112
2.1	Schéma de l'étude	112
2.2	Population	112
2.2.1	Critères d'inclusion	112
2.2.2	Critères de non-inclusion	112
2.2.3	Moyens de recrutements	113
2.2.4	Lieu de l'expérimentation	113
2.2.5	Agrément et autorisation	113
2.3	Schéma expérimental	114
2.4	Procédure	115
2.4.1	Visite d'inclusion	115
2.4.2	Visite pour l'expérimentation	115
2.5	Analyse des données	116

2.5.1	Échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs accompagnant la douleur	117
2.5.2	Données cinématiques	119
2.6	Analyse statistique	121
3	Résultats	123
3.1	Caractéristiques des participants	123
3.2	Seuil critique	124
3.3	Caractéristiques cinématiques de la marche	124
3.3.1	Comparaison entre les groupes et les essais expérimentaux et les essais sans obstacle sur la trajectoire pendant la phase d'approche	124
3.3.2	Comparaison entre les groupes et entre les ratios SA à tcross	125
3.4	Variables liées à la perception douloureuse	125
4	Discussion	127
III	Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux	131
1	Approches et objectifs	132
2	Méthodologie	134
2.1	Schéma de l'étude	134
2.2	Population	134
2.2.1	Critères d'inclusion	134
2.2.2	Critères de non-inclusion	134
2.2.3	Moyens de recrutements	135
2.2.4	Lieu de l'expérimentation	135
2.2.5	Agrément et autorisation	135
2.3	Schéma expérimental	136
2.4	Procédure	136
2.4.1	Visite d'inclusion	137
2.4.2	Visite pour l'expérimentation	137
2.5	Analyse des données	140
2.5.1	Échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs accompagnant la douleur	140
2.5.2	Variable décisionnelle	140
2.5.3	Données cinématiques	140
2.6	Analyse statistique	141

3	Résultats	143
3.1	Caractéristiques des participants	143
3.2	Variable décisionnelle	144
3.2.1	Condition <i>Sym</i>	144
3.2.2	Condition <i>Asym</i>	144
3.2.3	Condition <i>HumEtroite</i>	145
3.2.4	Condition <i>HumLarge</i>	145
3.2.5	Comparaison entre les conditions <i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i> .	147
3.3	Caractéristiques de la marche au moment du franchissement de l'ouverture	149
3.3.1	Vitesse de marche	151
3.3.2	Zone de dégagement	155
3.3.3	Angle de rotation des épaules	165
3.3.4	Déphasage entre les angles scapulaire et pelvien	167
3.4	Variables liées à la perception douloureuse	168
4	Discussion	169
IV	Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement dynamique	177
1	Approches et objectifs	178
2	Méthodologie	180
2.1	Schéma de l'étude	180
2.2	Population	180
2.2.1	Critères d'inclusion	180
2.2.2	Critères de non-inclusion	180
2.2.3	Moyens de recrutements	181
2.2.4	Lieu de l'expérimentation	181
2.2.5	Agrément et autorisation	181
2.3	Schéma expérimental	182
2.4	Protocole	183
2.4.1	Visite d'inclusion	183
2.4.2	Visite pour l'expérimentation	183
2.5	Analyse des données	185
2.5.1	Échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs accompagnant la douleur	185
2.5.2	Données cinématiques	185
2.6	Analyse statistique	188

3 Résultats	190
3.1 Caractéristiques des participants	190
3.2 Variables cinématiques	191
3.2.1 Vitesse de marche	191
3.2.2 Inversion de l'ordre de passage	191
3.2.3 Seuil d'adaptation du mouvement	192
3.2.4 Distance minimale prédite (mpd)	192
3.2.5 Contribution à l'évitement des collisions durant l'interaction	194
3.3 Variables liées à la perception douloureuse	197
4 Discussion	198
Discussion générale	203
Conclusion	219
Bibliographie	225
Liste des abréviations	I
Liste des tableaux	II
Table des figures	VII

Introduction

Historiquement, le soulagement de la douleur était une préoccupation secondaire où la douleur était perçue comme le symptôme d'une blessure ou d'une maladie et les traitements se concentraient sur la prise en charge de cette cause [Johnson, 2019]. Actuellement, l'importance du soulagement de la douleur est largement reconnue, comme en atteste l'évolution de sa définition mise à jour en juillet 2020 par l' *International Association Study of Pain* (IASP). La définition de la douleur était à l'origine celle adoptée en 1979 par l'IASP : *une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable associée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle ou décrite en ces termes* [IASP, 1979]. Dans la version mise à jour, la douleur est définie comme " *une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable associée à, ou ressemblant à, celle associée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle* " [Raja *et al.*, 2020]. La douleur est ainsi un phénomène perceptif subjectif complexe impliquant un traitement cognitif et émotionnel du phénomène sensoriel, dont le but est de notifier au mécanisme de défense de l'organisme de réagir à un stimulus afin d'éviter d'autres lésions tissulaires [Yam *et al.*, 2018, Khera et Rangasamy, 2021]. Cette définition témoigne autant de la nature subjective de la douleur que de sa complexité, ce qui la rend difficile à qualifier et à quantifier. De nombreux champs disciplinaires se sont intéressés aux mécanismes qui modulent la perception douloureuse ; ils décrivent des facteurs biologiques, psychologiques et sociaux [Treede *et al.*, 2019].

La douleur chronique se distingue de la douleur aiguë par sa durée [Treede *et al.*, 2019]. En effet, la douleur aiguë est une douleur d'installation récente, c'est-à-dire inférieure à trois mois, le terme " *aiguë* " caractérisant la période et non l'intensité douloureuse [Treede *et al.*, 2019]. Elle se manifeste par une sensation désagréable et a une fonction d'alarme qui permet à l'organisme de réagir et de se protéger face aux stimuli nociceptifs qui menacent son intégrité [Treede *et al.*, 2019]. La douleur aiguë est censée s'atténuer et s'éteindre avec la guérison, la cicatrisation ou la disparition du stimulus qui est à son origine [Treede *et al.*, 2019]. La douleur devient chronique, c'est-à-dire persistante et récurrente, lorsqu'elle évolue depuis plus de 3 à 6 mois selon la symptomatologie douloureuse [Treede *et al.*, 2019], qu'elle répond mal à la prise en charge et est accompagnée d'une altération significative et durable du statut fonctionnel [Treede *et al.*, 2019]. La douleur est alors généralement associée à un ensemble de perturbations plus ou moins sévères, comme par exemple des troubles de l'humeur [HAS, 2008, Mills *et al.*, 2019]. Elle retentit alors sur les activités de la vie quotidienne (physiques, professionnelles, sociales et familiales), sur le comportement et la qualité de vie du patient [HAS, 2008, Mills *et al.*, 2019, Agnus Tom *et al.*, 2022].

En Europe, une étude épidémiologique datée de 2006 montre que la prévalence de la douleur chronique est estimée à 19 % (figure 1) [Breivik *et al.*, 2006]. La douleur touche toutes les populations, indépendamment de l'âge, du sexe, du revenu ou de la géographie, avec cependant une répartition inégale [Gureje *et al.*, 1998]. L'âge moyen des

personnes présentant une douleur chronique est de 49,9 ($\pm 17,4$) ans [Breivik *et al.*, 2006]. La répartition en fonction de l'âge rapporte que sont concernés 16 % des 18-30 ans, 18 % des 31-41 ans, 21 % des 41-50 ans, 18 % des 51-60 ans, 14 % des 61-70 ans, 10 % des 71-80 ans et 4 % des 81 ans et plus [Breivik *et al.*, 2006]. La douleur chronique touche aussi majoritairement les femmes (55,6 %) [Breivik *et al.*, 2006].

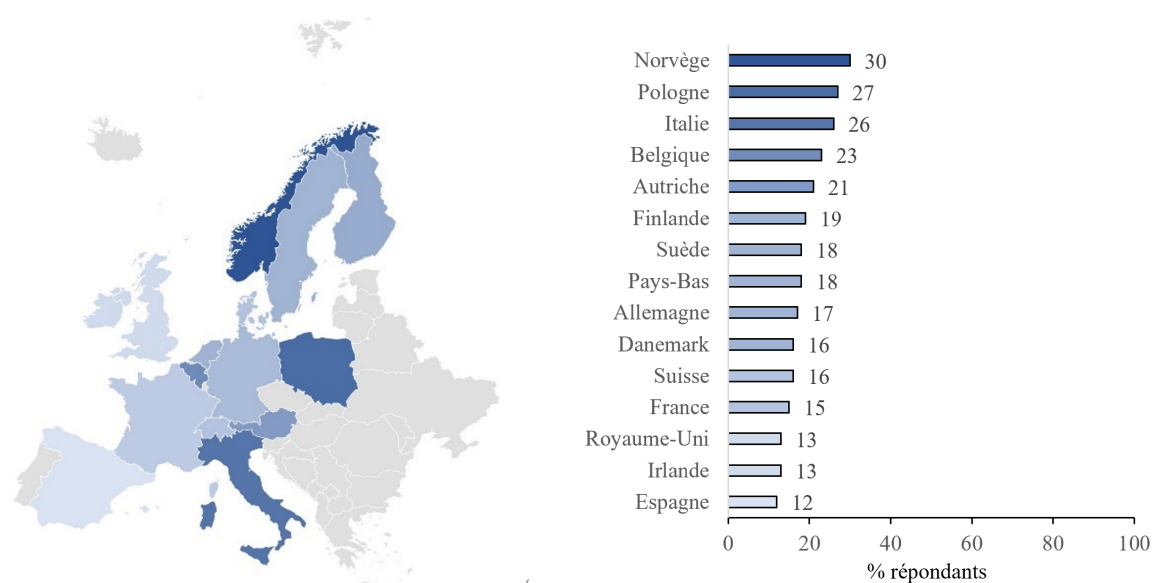


FIGURE 1 – Prévalence de la douleur chronique en Europe d'après Breivik et al. [Breivik *et al.*, 2006].

La répartition de la durée moyenne de la douleur est de 12 % pour les douleurs de moins de deux ans, 22 % entre 2 et 5 ans, 20 % entre 5 et 10 ans, 17 % entre 10 et 15 ans, 8 % entre 15 et 20 ans et 21 % depuis plus de 20 ans [Breivik *et al.*, 2006]. La majorité des douleurs sont situées au niveau du bas du corps (bas du dos et membres inférieurs) (24 %) et au niveau du bas du dos uniquement (18 %) [Breivik *et al.*, 2006].

En France, la douleur chronique est devenue un enjeu de santé publique à partir des années 90 qui ont marqué le début de la prise de conscience politique et médicale de la nécessité d'organiser sa prise en charge [Perrot, 2017]. Trois plans douleurs ont été mis en place (figure 2), le premier initié en 1998 et comprenant quatre points : (1) prise en compte de la demande du patient, (2) développement de la lutte contre la douleur dans les structures de santé et les réseaux de soins, (3) information et formation des professionnels de santé, notamment pour mieux évaluer et traiter la douleur et (4) information du public¹. Entre 2002 et 2005 est lancé le second plan douleur qui concernait les pratiques sur la douleur provoquée par les soins et la chirurgie, les lombalgies, les céphalées chroniques

1. <https://www.sfetd-douleur.org/plans-douleur/>

et les migraines, les douleurs cancéreuses, la douleur de l'enfant et la souffrance en fin de vie¹. Entre 2006 et 2010, le troisième plan d'amélioration de la prise en charge de la douleur est mis en place et comporte quatre objectifs : (1) améliorer la prise en charge des personnes les plus vulnérables, (2) améliorer la formation pratique initiale et continue, (3) améliorer les modalités des traitements médicamenteux et l'utilisation des méthodes non pharmacologiques pour une prise en charge de qualité et (4) structurer la filière de soins de la douleur. Plusieurs évolutions juridiques voient également le jour¹. Tout d'abord, l'application de la loi de santé publique du 4 mars 2002², relative aux droits des malades, reconnaît le soulagement de la douleur comme un droit fondamental du patient. Puis la loi de santé publique du 9 août 2004³ qui inscrit la lutte contre la douleur dans ses 100 objectifs de santé publique. Ainsi, pour la première fois, la responsabilité de l'État dans la prise en charge de la douleur est reconnue. Enfin, la Loi du 22 avril 2005⁴, autorise l'utilisation de médicaments permettant de limiter la souffrance des patients en fin de vie même s'il existe un risque d'abrégé leur existence. En 2011, le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) a été saisi par la Direction Générale de l'Offre de Soins (DGOS) en vue d'évaluer et de désigner certains points d'amélioration, et recommande la mise en place d'un quatrième plan quadriennal dans lequel doivent être priorisés : la formation initiale des professionnels de santé, le développement professionnel continu, ainsi que la sensibilisation et l'information des citoyens. Ce plan ne verra cependant pas le jour¹.

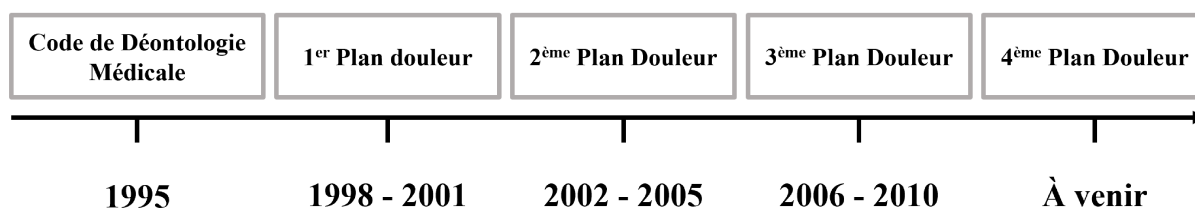


FIGURE 2 – Plans douleur : 30 ans d'avancées¹

En 2017, le livre blanc de la douleur rédigé par la Société Française d'Étude et de Traitement de la Douleur (SFETD) propose quatre objectifs pour répondre au mieux au défi majeur que représente la douleur en France pour le système de santé du XXI^e siècle [Perrot, 2017]. Le premier objectif concerne le phénomène de société qui entoure la douleur, tant par le nombre de personnes concernées que par l'importance des enjeux économiques, sociaux et moraux [Perrot, 2017]. En effet, la douleur chronique touche au moins 12 millions de Français et est le premier motif de consultation dans les services d'urgences et chez les médecins généralistes [Perrot, 2017]. Elle touche en particulier les populations les plus vulnérables, notamment les personnes d'âge avancé [Breivik *et al.*, 2006, Perrot, 2015,

2. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000227015/>

3. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000787078/>

4. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000446240/>

Perrot, 2017, HAS, 2008]. Cependant, plus de 70 % des patients douloureux chroniques ne reçoivent pas un traitement approprié et moins de 3 % d'entre eux bénéficient d'une prise en charge dans un centre spécialisé [Perrot, 2017]. Pourtant, plus de 60 % des patients admis aux urgences ont une douleur modérée à sévère [Perrot, 2017]. C'est également un enjeu économique, car la douleur induit une forte consommation de soins : une fréquence de consultation chez un professionnel de santé environ deux fois plus élevée que dans la population générale et un important absentéisme professionnel avec des arrêts de travail cinq fois plus fréquents que dans la population générale [Perrot, 2017, Breivik *et al.*, 2006]. Pour finir, la douleur est un enjeu moral, car elle est aussi synonyme de souffrance : près d'un patient douloureux sur trois estime que la douleur est parfois tellement forte qu'il ressent l'envie de mourir [Breivik *et al.*, 2006]. Le deuxième objectif concerne la stratégie de prise en charge. Selon la Haute Autorité de Santé [HAS, 2008], plus de la moitié des patients adressés à une structure spécialisée souffrent de douleurs chroniques depuis au moins deux ans. Or, plus la prise en charge est tardive, plus le traitement risque d'être difficile et les douleurs de se pérenniser [HAS, 2008]. Le troisième objectif, concernant la formation du personnel soignant, propose d'augmenter le nombre d'heures de cours allouées à l'étude de la douleur et d'en faire une authentique spécialité [Perrot, 2017]. Pour finir, le quatrième objectif concerne le développement de la recherche dans cette thématique, qui doit être soutenue et valorisée [Perrot, 2017]. En France, il existe une trentaine d'équipes labellisées par l'INSERM et/ou le CNRS réparties sur l'ensemble du territoire dont la thématique exclusive ou principale est la douleur, mais aussi des laboratoires de champs disciplinaires variés (physiologie, biomécanique, sciences humaines, etc.) qui mènent des projets de recherche visant à approfondir les connaissances sur la douleur [Perrot, 2017].

Actuellement, les douleurs chroniques du dos sont la principale cause d'invalidité dans le monde [Vos *et al.*, 2015]. Une récente étude portant sur la prévalence des douleurs du dos dans la population générale en France [Husky *et al.*, 2018] montre que 38,3 % des Français souffrent de mal de dos chronique. Celui-ci est plus fréquent chez les femmes que chez les hommes (41,3 % contre 34,3 %) et augmente avec l'âge, passant de 26,4 % dans le groupe des 18-29 ans à 47,1 % dans le groupe des 70-79 ans [Husky *et al.*, 2018]. En complément, plus le niveau d'éducation est élevé, plus la prévalence des maux de dos est faible, passant de 28,4 % pour les personnes avec un diplôme universitaire à 44,4 % pour les personnes sans diplôme [Husky *et al.*, 2018]. Le statut professionnel est également associé à la prévalence du mal de dos chronique, avec une prévalence plus élevée dans la catégorie des personnes sans emploi (47,7 %), chez les agriculteurs (46,4 %), suivis par les personnes à la retraite (45,0 %), et une prévalence plus faible chez les cadres (29,6 %) [Husky *et al.*, 2018]. Les personnes vivant dans des zones rurales ou des petites villes présentent un taux légèrement plus élevé de douleurs du dos chroniques que celles

vivant dans des villes moyennes ou grandes [Husky *et al.*, 2018]. Pour finir, la majorité des adultes souffrant de maux de dos chroniques (66,6 %) déclarent souffrir d'une autre forme de douleur chronique et près de la moitié (43,6 %) déclarent un autre problème de santé [Husky *et al.*, 2018].

La 11^e révision de la Classification Internationale des Maladies (CIM-11) de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) classe les douleurs chroniques comme étant secondaires à une autre affection (par exemple les douleurs chroniques liées au cancer, les douleurs neuropathiques chroniques, les douleurs viscérales secondaires chroniques, les douleurs post-traumatiques et post-chirurgicales chroniques, les céphalées secondaires chroniques, les douleurs orofaciales et les douleurs musculo-squelettiques secondaires chroniques) [Treede *et al.*, 2019]. Ces douleurs sont alors considérées comme un système d'alarme [Johnson, 2019]. L'hypersensibilité prolongée du système nerveux contribue au processus de guérison en amplifiant et en prolongeant la douleur pour décourager l'utilisation et le contact avec les tissus blessés [Johnson, 2019]. Cependant, certaines douleurs ne peuvent pas s'expliquer par la présence d'une autre affection et sont classées parmi les douleurs chroniques primaires. Elles sont décrites comme *une douleur qui constitue la plainte principale dans une ou plusieurs régions du corps et qui provoque une détresse émotionnelle significative ou une incapacité fonctionnelle* [Treede *et al.*, 2019]. C'est le cas de la lombalgie chronique non spécifique (LCNS) [Treede *et al.*, 2019] ou lombalgie chronique commune qui est le terme utilisé dans la prise en charge des patients [HAS, 2019], considérée comme une maladie à part entière [Clauw *et al.*, 2019].

La LCNS est définie comme une "*douleur ou une gêne localisée sous la marge costale et au-dessus des plis fessiers inférieurs, avec ou sans douleur dans l'une ou l'autre des jambes*" [Hartvigsen *et al.*, 2018]. Les recommandations actuelles françaises proposent d'utiliser les termes suivants pour décrire les différentes évolutions de la lombalgie [HAS, 2019] :

- "*Poussée aiguë de lombalgie*" plutôt que lombalgie aiguë afin d'englober les douleurs aiguës avec ou sans douleur de fond préexistante, nécessitant une intensification temporaire des traitements ou entraînant une diminution temporaire des capacités fonctionnelles ;
- "*Lombalgie à risque de chronicité*" pour les patients ayant une durée d'évolution de la lombalgie inférieure à 3 mois et présentant un risque élevé d'absence de résolution de la lombalgie ;
- "*Lombalgie récidivante*" en cas de récurrence de lombalgie dans les 12 mois. Elle doit être considérée comme une lombalgie à risque de chronicité.

Ces termes, même s'ils sont de plus en plus utilisés dans la littérature, sont encore à la marge selon les domaines étudiés pour évaluer les effets de la lombalgie. Pour essayer d'uniformiser au mieux les résultats recueillis auprès des études des différents champs disciplinaires, nous utiliserons les termes suivants dans le manuscrit de thèse, tout en gardant à l'esprit que cette approche est réductionniste :

- Le terme "*aigüe*" sera utilisé pour qualifier les douleurs récentes inférieures à deux semaines ;
- Le terme "*sub-aigüe*" sera utilisé pour qualifier les douleurs d'une durée supérieure à deux semaines et inférieure à trois mois ;
- Le terme "*chronique*" sera utilisé pour qualifier les douleurs d'une durée supérieure à trois mois.

Nous veillerons cependant à présenter tout au long du manuscrit, si les études l'ont mis en avant, la nouvelle classification de la lombalgie permettant de prendre en compte un élément central de cette maladie qui est la chronicisation de la douleur. En effet, la recherche actuelle vise à identifier les indicateurs de risque de guérison tardive chez les patients souffrant de lombalgie sub-aiguë afin d'optimiser le traitement et d'éviter la chronicisation [HAS, 2019] : des interventions ciblées et opportunes chez les patients présentant un risque de douleur chronique facilitent la guérison et peuvent réduire les coûts des soins de santé [Wertli *et al.*, 2014].

Les recommandations décrites par la Haute Autorité de Santé (HAS) dans un récent rapport préconisent une prise en charge centrée sur le patient en prenant en compte son vécu et le retentissement de sa douleur (dimensions physiques, psychologiques, et socioprofessionnelles), nommée BioPsychoSociale (BPS) et s'appuyant sur une décision médicale partagée [HAS, 2019]. Les recommandations se basent sur quatre niveaux de preuves : le grade A correspond aux preuves scientifiques établies, c'est-à-dire fondées sur des études de fort niveau de preuve (essais comparatifs randomisés de forte puissance et sans biais majeur ou méta-analyse d'essais comparatifs randomisés), le grade B sur la présomption scientifique fournie par des études de niveau intermédiaire de preuve (essais comparatifs randomisés de faible puissance, études comparatives non randomisées bien menées, études de cohorte, etc.), le grade C correspond à un faible niveau de preuve fondé sur des études de moindre niveau de preuve (études de cas témoins, rétrospectives, etc.) et pour finir le grade AE correspond à un accord d'experts, c'est-à-dire qu'en l'absence d'études, les recommandations sont fondées sur un accord entre experts du groupe de travail, après consultation du groupe de lecture [HAS, 2019]. Ainsi, la recommandation principale actuelle pour la prise en charge en première intention de la lombalgie non spécifique est l'exercice physique (B) qui comprend l'autogestion et la reprise des activités quotidiennes, y compris la reprise de l'activité professionnelle si possible (B), les activités

physiques adaptées et les activités sportives (B) et la physiothérapie (ou kinésithérapie) (B) [HAS, 2019]. D'autres prises en charge sont proposées en seconde intention, comprenant notamment les techniques manuelles (manipulations, mobilisations) dans le cadre d'une combinaison multimodale de traitements incluant un programme d'exercices supervisés (B) [HAS, 2019]. Ces techniques manuelles sont appliquées par exemple dans les pratiques en physiothérapie, en chiropraxie et en ostéopathie.

En France, d'après l'Institut de Recherche et Documentation en Economie de la Santé (IRDES), dans un sondage du "Baromètre santé 360" Odoxa, l'ostéopathie est plébiscitée par 85 % des sondés⁵. Dans le cas de la lombalgie, elle peut être pratiquée par des ostéopathes, des médecins ostéopathes et des kinésithérapeutes ostéopathes⁵. Une récente enquête européenne, initiée par la Fondation COME Collaboration, appelée projet OPERA [Ellwood et Carnes, 2021, Wagner *et al.*, 2023] a dressé le profil de la profession d'ostéopathe dans toute l'Europe et rapporte que les affections musculo-squelettiques représentent la plus grande proportion des plaintes : 10 à 20 % des patients déclarent comme cause principale de leur douleur la lombalgie, la cervicalgie et des problèmes spécifiques aux membres inférieurs [Ellwood et Carnes, 2021]. Cependant, le niveau de preuve du succès des soins quant à l'utilisation des techniques manuelles en soin ostéopathique est controversée suite au large éventail des techniques utilisées [Ellwood et Carnes, 2021], au nombre insuffisant d'études de haute qualité [Hong *et al.*, 2022] et parce que ses mécanismes d'action font l'objet de nombreux débats [Rubinstein *et al.*, 2011, Rubinstein *et al.*, 2019, Evans et Lucas, 2023, Franke *et al.*, 2014]. Cette profession, en croissance continue, tend vers une standardisation des pratiques depuis la loi Kouchner de 2002⁶, loi sur le droit des malades et la qualité du système de santé. En 2007, un décret stipule que les ostéopathes peuvent manipuler sans que soit effectué au préalable de bilan d'imagerie⁷. En 2016, un autre décret intègre les ostéopathes dans la liste des professionnels de soins⁸ : ils sont alors habilités à échanger et partager les informations nécessaires à la prise en charge des patients. Suite à ces grandes avancées, mener davantage de recherches sur son efficacité, en proposant des modèles sur les phénomènes qui la sous-tendent, permettra de soutenir et pérenniser la profession d'ostéopathe [Esteves *et al.*, 2020, Ménard *et al.*, 2020, Alvarez *et al.*, 2020].

L'évaluation de la LCNS dans les essais cliniques est réalisée majoritairement au moyen d'échelles ou de questionnaires auto-administrés soit unidimensionnels mesurant l'intensité de la douleur perçue (échelle visuelle analogique, échelle numérique, échelle verbale),

5. [https://www.odoxa.fr/sondage/homeopathie – autres – medecines – alternatives – complementaires – patients – medecins – a – front – renverse/](https://www.odoxa.fr/sondage/homeopathie%20-%20autres%20-%20medecines%20-%20alternatives%20-%20complementaires%20-%20patients%20-%20medecins%20-%20a%20-%20front%20-%20renverse/)

6. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/LEGIARTI000031549014

7. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000462001>

8. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032922455>

soit multidimensionnels appréciant qualitativement et quantitativement différents aspects de la douleur tels qu'émotionnel (anxiété et dépression), cognitif (croyance, interprétation, représentation), et les perturbations sur la vie quotidienne [Chiarotto *et al.*, 2016b, Chiarotto *et al.*, 2018a]. Cependant, les patients rapportent également des limites fonctionnelles identifiées à l'aide d'auto-questionnaires, portant sur leurs difficultés à effectuer une activité physique quotidienne directement en rapport avec la douleur lombaire [Chiarotto *et al.*, 2018a] et identifiées par l'étude biomécanique des patients [Moissenet *et al.*, 2021]. Cependant, très peu d'études à notre connaissance évaluent la LCNS dans des situations de la vie quotidienne. Dans le cas particulier de la locomotion, la littérature s'est concentrée à ce jour sur la marche en ligne droite et les auteurs ont alors mis en avant des altérations des paramètres cinématiques et cinétiques chez les patients LCNS [Koch et Hänsel, 2018].

L'objectif principal de ce travail de thèse a été d'évaluer l'influence de la LCNS sur la locomotion dans des situations se rapprochant de la vie quotidienne. Les paradigmes expérimentaux largement utilisés pour étudier la locomotion dans ces situations se sont intéressés à des tâches de marche dans un environnement encombré, i.e. avec un obstacle sur la trajectoire [Warren, 1984, Warren Jr et Whang, 1987, Cinelli *et al.*, 2008]. Les études antérieures ont par exemple exploré comment un individu franchit un pas de porte de différentes largeurs [Warren Jr et Whang, 1987] et contourne un autre individu sur sa trajectoire, que celui-ci soit statique [Bourgaize *et al.*, 2021] ou en mouvement [Olivier *et al.*, 2013]. Ces paradigmes permettent notamment d'étudier les coordinations perceptivo-motrices mises en jeu durant la locomotion en présence d'obstacles [Warren, 1984] et font appel au concept d'affordances [Gibson, 1979]. Les affordances décrivent les possibilités d'action offertes par l'environnement à un individu [Gibson, 1979, Gibson, 1986]. L'objectif secondaire de ce travail de thèse est de proposer de nouveaux moyens d'évaluation de la LCNS pour la prise en charge clinique et notamment dans le cadre de la prise en charge en thérapie manuelle.

Ce manuscrit s'articulera autour de cinq parties : la première partie sera consacrée à la revue de la littérature, portant dans un premier chapitre sur la définition de la LCNS en prenant en compte les facteurs biologiques et psychologiques qui accompagnent la douleur. Le second chapitre de la revue de la littérature sera consacré aux différentes prises en charge et l'accent sera mis sur la prise en charge en thérapie manuelle à travers une revue systématique, actuellement sous presse. Dans un troisième chapitre, nous présenterons les méthodes d'analyses appliquées à la LCNS sur l'étude du mouvement, puis nous présenterons les paradigmes expérimentaux s'intéressant aux stratégies de marche dans des environnements encombrés permettant d'étudier les stratégies perceptivo-motrices des individus. Dans les 2ème, 3ème et 4ème parties nous présenterons trois études portant

sur l'influence de la LCNS sur les stratégies perceptivo-motrices mises en jeu durant la locomotion dans trois environnements différents : la partie 2 sera consacrée au paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique dans une tâche de passage à travers des ouvertures horizontales, à l'image du passage d'une porte, publiée dans *Gait and Posture* en août 2023 ; la partie 3 s'intéressera au paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux dans une tâche de passage à travers des ouvertures horizontales ; la partie 4 utilisera le paradigme de locomotion en interaction avec un environnement dynamique dans une tâche de croisement de piétons. Pour finir, la dernière partie du manuscrit permettra de discuter les résultats de l'ensemble de ces études en mettant en avant les perspectives actuelles sur de nouveaux moyens d'évaluation de la LCNS.

PREMIÈRE PARTIE

Revue de la littérature

LOMBALGIE CHRONIQUE NON-SPÉCIFIQUE

Dans ce chapitre, nous proposons dans une première section de définir la lombalgie chronique non spécifique (LCNS) puis nous présenterons les facteurs associés : biologiques et psychologiques. Pour finir, nous présenterons les modèles décrits à ce jour pour comprendre la chronicisation de la douleur, mais également le maintien d’une douleur chronique dans le temps et son impact sur les comportements des patients.

1.1 Définition de la lombalgie chronique non spécifique

La LCNS est définie comme une “*douleur ou une gêne localisée sous la marge costale et au-dessus des plis fessiers inférieurs, avec ou sans douleur dans l’une ou l’autre des jambes*” [Hartvigsen *et al.*, 2018]. Les lombalgies peuvent être classées selon trois catégories : les lombalgies (1) spécifiques, provoquées par un trouble affectant la colonne lombaire (cancer, infection, etc.), (2) neuropathiques, causées par un trouble affectant un nerf ou la moelle épinière, et (3) non spécifiques, sans cause patho-anatomique déterminée [Maher *et al.*, 2017]. La majorité des lombalgies (70%) sont de courte durée et disparaissent dans une période de quatre semaines [Krismer *et al.*, 2007, Chiarotto et Koes, 2022]. Cependant, si elles persistent au-delà de 12 semaines, ces lombalgies sont définies comme chroniques [Krismer *et al.*, 2007]. 85 % des lombalgies chroniques sont classées parmi les lombalgies non-spécifiques, également appelées douleurs nociplastiques [O’Sullivan, 2005].

La 11ème révision de la Classification Internationale des Maladies (CIM-11) de l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS) classe la LCNS parmi les douleurs chroniques primaires qui sont des douleurs ne pouvant être expliquées par la présence d’une autre affection. Elles sont décrites comme *une douleur qui constitue la plainte principale dans une ou plusieurs régions du corps et qui provoque une détresse émotionnelle significative ou une incapacité fonctionnelle* [Treede *et al.*, 2019]. La LCNS est ainsi considérée comme une maladie à part entière [Clauw *et al.*, 2019, Treede *et al.*, 2019]. Les connaissances actuelles tendent à considérer les épisodes douloureux de la LCNS comme une affection de

longue durée avec une évolution continue et non plus comme la répétition d'évènements isolés et sans lien entre eux [Chiarotto et Koes, 2022]. Les recherches portant sur la LCNS à la fois en phase aiguë et chronique ont permis d'identifier trois sous-groupes principaux d'évolution de la douleur qui émergent dans l'année qui suit la prise en charge : (1) une trajectoire de récupération dans laquelle l'état du participant s'améliore rapidement ou progressivement vers un état de douleur faible ou nulle, (2) une trajectoire continue dans laquelle le participant ressent une douleur modérée ou fluctuante et (3) une trajectoire persistante dans laquelle le participant perçoit une douleur constante et sévère [Kongsted *et al.*, 2016]. Une question se pose alors et est probablement la question à laquelle les cliniciens sont confrontés chaque jour face à leurs patients : "*Quelle est la cause de leur douleur ?*".

L'un des enjeux majeurs de la recherche est alors d'essayer de mieux comprendre les mécanismes de la douleur et leurs conséquences pour prévenir et soulager les patients. Dans la prochaine section, nous présenterons les facteurs biologiques qui accompagnent la LCNS en nous basant sur le modèle théorique neurophysiologique de la douleur, puis nous présenterons les mécanismes de la modulation de la douleur chez les patients LCNS.

1.2 Facteurs biologiques accompagnant la lombalgie chronique non spécifique

1.2.1 Voies neurophysiologiques de la douleur : modèle théorique

La douleur est un mécanisme biologique d’alarme qui permet de détecter des stimulations internes ou externes dont l’intensité menace l’intégrité physique de l’individu [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007]. L’intégration et la réponse au signal douloureux, appelées la nociception, reposent sur des bases neurophysiologiques [Khera et Rangasamy, 2021] et comprennent 4 phases (figure 3) : la transduction, la transmission, la perception et la modulation de la douleur [Tracey et Mantyh, 2007].

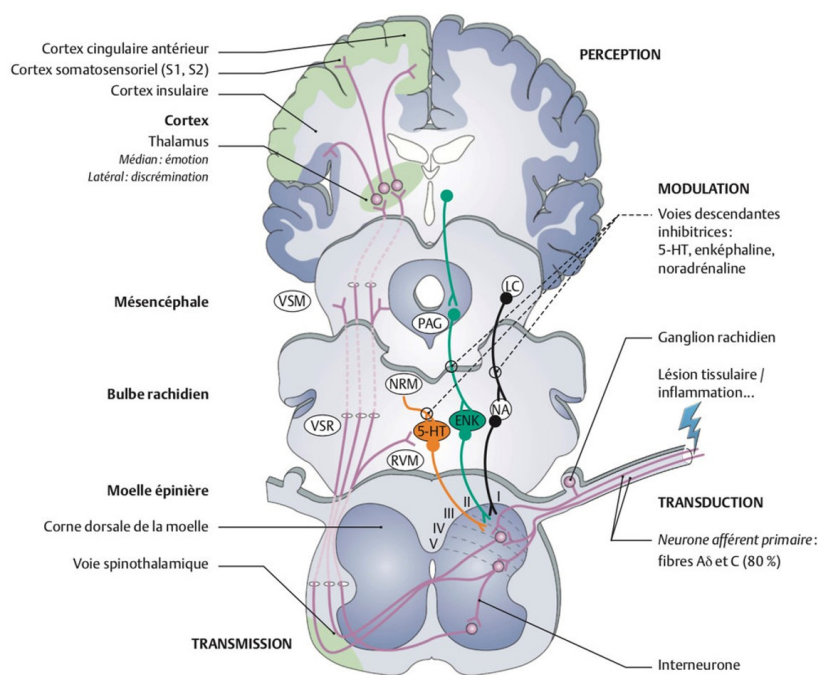


FIGURE 3 – Schéma général des voies de la douleur d’après Fields [Fields, 2004].

La transduction est la première phase de la nociception et correspond à l’activation de récepteurs appelés nocicepteurs qui restent silencieux en l’absence de douleur et s’activent lorsqu’il y a un risque de stimulus nocif [Khera et Rangasamy, 2021]. Les nocicepteurs sont les récepteurs spécifiques à l’intégration du signal nociceptif et sont de trois types : mécaniques, mécano-thermiques et polymodaux [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007]. Ils transmettent l’information jusqu’à la corne dorsale de

la moelle épinière, où s'établit une première synapse [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007].

La transmission du message nociceptif est la deuxième phase de la nociception et correspond à la transmission du message douloureux jusqu'aux régions corticales qui contrôlent les différents aspects de l'expérience douloureuse [Fields, 2004]. La transmission des informations sensorielles du corps vers le système nerveux central (SNC) via la moelle épinière est appelée voie ascendante de la douleur [Yam *et al.*, 2018].

La perception douloureuse est quant à elle l'interprétation d'une série d'événements sensoriels, influencée par les souvenirs et des facteurs émotionnels, pathologiques, génétiques et cognitifs [Tracey et Mantyh, 2007], nécessaires au SNC pour détecter et produire une réponse à la menace [Khera et Rangasamy, 2021]. Selon le type d'information qui en résulte, on distingue deux voies dans la perception douloureuse [Khera et Rangasamy, 2021] : la voie néospinothalamique et la voie spinoréticulothalamique. La voie néospinothalamique fait un relais sur la partie latérale du thalamus et se projette sur le cortex pariétal somesthésique primaire S1 et secondaire S2 [Fields, 2004]. Elle est formée par les fibres à conduction rapide, responsables d'une sensation consciente de la douleur aiguë et douées d'une capacité d'analyse qualitative de la stimulation (nature, durée, topographie) [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007, Calvino et Grilo, 2006, Fields, 2004]. Cette voie est responsable des aspects sensori-discriminatifs de la douleur [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007, Calvino et Grilo, 2006]. La seconde voie, appelée spinoréticulothalamique fait un relais dans la rétée du tronc cérébral (bulbe et mésencéphale) et dans les noyaux non-spécifiques du thalamus (intralaminaires), elle se poursuit pour se projeter sur de nombreuses structures : le cortex préfrontal, les structures limbiques, l'hypothalamus et le striatum [Fields, 2004]. Cette voie est formée de fibres lentes, responsables de la douleur sourde non discriminante [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007, Fields, 2004]. Elle est à l'origine des aspects affectivo-motivationnels de la nociception [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007].

Pour finir, la modulation du message nociceptif réunit l'ensemble des mécanismes par lesquels les messages nerveux peuvent être modulés de la transduction à la réponse au message nociceptif [Khera et Rangasamy, 2021, Yam *et al.*, 2018, Tracey et Mantyh, 2007]. Le système de modulation peut soit faciliter, soit inhiber la perception de la douleur en fonction des mécanismes impliqués [Osinski *et al.*, 2017]. Les études en imagerie fonctionnelle permettent de proposer des marqueurs objectifs de l'activité cérébrale comme signature de la douleur [Apkarian *et al.*, 2011]. Dans le cas des douleurs chroniques primaires, le maintien du phénomène de douleur dans la chronicité proviendrait d'un dérèglement

des voies neurophysiologiques participant à la sensibilisation périphérique et centrale et à des modifications supra-spinales et corticales [Osinski *et al.*, 2017]. Dans la prochaine sous-section, nous présenterons les modulations neurophysiologiques présentes dans les douleurs musculosquelettiques chroniques primaires s’appliquant à la LCNS.

1.2.2 Mécanisme de la modulation de la douleur et lombalgie chronique non spécifique

L’une des réponses actuelles portant sur le maintien de la douleur dans les douleurs musculosquelettiques chroniques primaires est celle de la sensibilisation périphérique et centrale [Clauw *et al.*, 2019, Treede *et al.*, 2019]. D’après l’*International Association for the Study of Pain*, la sensibilisation périphérique correspond, à *une augmentation de la réactivité des nocicepteurs et à une diminution de leur seuil d’excitabilité, en réponse à une stimulation dans leur champ récepteur* [Loeser et Treede, 2008]. Les nocicepteurs sensibilisés ont tendance à émettre plus facilement et en plus grande quantité des potentiels d’action provoquant une diminution du seuil d’excitabilité et deviennent alors plus efficaces pour détecter une stimulation douloureuse [Osinski *et al.*, 2017]. Ce phénomène est dit périphérique, car concerne les neurones au niveau des tissus [Osinski *et al.*, 2017]. La sensibilisation centrale est définie par une augmentation de la réponse des neurones du SNC à des stimuli d’intensité normale, provoquée par la répétition de la transduction et de la transmission du message nociceptif [Osinski *et al.*, 2017]. Elle entraîne l’apparition de changements neuro-moléculaires, structurels et fonctionnels au sein de la moelle épinière impliquant une amplification du message nerveux [Latremoliere et Woolf, 2009]. La sensibilisation périphérique et centrale se manifeste cliniquement par une hyperalgésie (*augmentation de la sensibilité à la douleur*) et une allodynie (*douleur suite à un stimulus qui, en temps normal, ne déclenche pas de douleur*) [Woolf, 2011, Osinski *et al.*, 2017, Loeser et Treede, 2008]. Ce phénomène d’hypersensibilité persiste chez les patients présentant une douleur chronique primaire sur une longue période après son activation [Osinski *et al.*, 2017]. Dans ce cas, la douleur ne joue plus un rôle d’alarme, mais traduit une dérégulation du système et devient donc pathologique [Osinski *et al.*, 2017]. Peu d’études portant spécifiquement sur la lombalgie chronique ont été menées et il n’existe pas de consensus [Roussel *et al.*, 2014]. En effet, certaines études rapportent une hyperalgésie généralisée, c’est-à-dire des seuils douloureux abaissés dans des régions asymptomatiques, pendant que d’autres ne montrent pas de différences entre les patients lombalgiques chroniques et les personnes sans douleur [Roussel *et al.*, 2014]. Concernant l’allodynie, une seule étude montre que les patients lombalgiques chroniques présentent un nombre de zones douloureuses trois fois supérieur comparativement à des personnes sans douleur lorsqu’une injection de solution salée leur est administrée dans le muscle sous-épineux et le muscle tibial antérieur [Roussel *et al.*, 2014]. Ces différences entre les études résulteraient de la méthodologie utilisée et

de l'hétérogénéité des groupes de patients [Roussel *et al.*, 2014].

D'autre part, des études en neuro-imagerie ont montré des modifications structurelles et fonctionnelles des structures corticales chez des patients présentant des douleurs musculo-squelettiques dont la LCNS [Wall *et al.*, 2002, Zhu *et al.*, 2000, Tsay *et al.*, 2015, Apkarian *et al.*, 2011, Tsao et Hodges, 2008, Tsao *et al.*, 2008, Pelletier *et al.*, 2018]. Concernant les structures responsables des aspects sensori-discriminatifs, il a notamment été montré des modifications chez ces patients dans le tronc cérébral, les noyaux thalamiques et le cortex somatosensoriel primaire [Wall *et al.*, 2002]. Ces modifications se sont traduites par une altération de la perception sensorielle (diminution des potentiels évoqués lors de la stimulation périphérique de la région lombaire) [Zhu *et al.*, 2000], de l'acuité tactile (changements dans la taille de la zone lésée, qui peut sembler plus grande, plus petite ou déformée) [Tsay *et al.*, 2015], des seuils de douleurs (hyperalgésie et allodynie) [Apkarian *et al.*, 2011] et de la proprioception (image corporelle et schéma corporel) [Tsay *et al.*, 2015]. De plus, certains patients lombalgiques chroniques avec un déficit du contrôle postural et de la marche, présentaient également des modifications des propriétés et de l'organisation du cortex moteur primaire [Tsao et Hodges, 2008, Tsao *et al.*, 2008]. Concernant les aspects affectivo-motivationnels, certains patients lombalgiques chroniques présentent des changements structurels et fonctionnels au niveau du cortex préfrontal (responsable des fonctions cognitives et notamment les fonctions exécutives, la mémoire de travail, les ressources attentionnelles, l'évaluation des risques, la prise de décision, la pensée autoréférentielle et la médiation des réponses comportementales), amygdalien (impliqué dans la reconnaissance et l'évaluation de la valence émotionnelle attribuée à la douleur), insulaire (associé à la surveillance homéostatique) et cingulaire (jouant un rôle dans la modulation des fonctions cognitives, dans le contrôle de la motivation, la détection d'erreurs et la pertinence des informations émotionnelles et leurs régulations) [Pelletier *et al.*, 2018, Roussel *et al.*, 2014].

Le nombre d'études portant sur la neurophysiologie de la douleur appliquée à la LCNS est encore limité [Roussel *et al.*, 2014]. Les perspectives actuelles porteraient sur l'identification de sous-groupes dans la population lombalgique, permettant de cibler les divergences entre les résultats des études [Roussel *et al.*, 2014, Osinski *et al.*, 2017]. D'autres champs disciplinaires se sont également intéressés aux conséquences de la LCNS et ont notamment montré l'influence des facteurs psychologiques sur la LCNS [Agnus Tom *et al.*, 2022].

1.3 Facteurs psychologiques et lombalgie chronique non spécifique

Les facteurs psychologiques font l'objet d'une attention croissante dans le domaine de la santé et de la maladie depuis l'émergence du modèle biopsychosocial [Cedraschi *et al.*, 2009, Agnus Tom *et al.*, 2022, Waddell, 1992]. Ce modèle est constitué à la fois d'un modèle théorique s'appuyant sur "*une représentation de l'être humain dans laquelle les facteurs biologiques, psychologiques et sociaux sont considérés comme participant simultanément au maintien de la santé ou au développement de la maladie*", et d'outils cliniques correspondant à un ensemble de moyens diagnostiques et thérapeutiques directement applicables [Berquin *et al.*, 2010, Waddell, 1992, Waddell, 1987] (décrit dans la section 2.1.2). Dans ce modèle, la chronicisation de la douleur est associée à des réactions émotionnelles définies comme l'état affectif qui accompagne la douleur et prenant la forme de manifestations comme l'anxiété, la détresse émotionnelle ou la dépression, en donnant lieu à de nouveaux comportements [Cedraschi *et al.*, 2009, Baliki *et al.*, 2006]. Les comportements sont l'ensemble des manifestations verbales et non verbales observables chez un participant douloureux, modulées par les apprentissages, l'environnement familial et culturel et les standards sociaux [Calvino et Grilo, 2006]. Les manifestations émotionnelles et comportementales sont sous-tendues par le traitement cognitif du message nociceptif qui est susceptible d'influencer l'expression de la douleur, notamment concernant les représentations, les interprétations et les croyances [Apkarian *et al.*, 2011, Berryman *et al.*, 2013, Berryman *et al.*, 2014]. Dans cette section, nous présenterons tout d'abord les difficultés cognitives impliquées dans la LCNS, puis dans une seconde sous-section les facteurs émotionnels accompagnant la LCNS. Il est important de noter que les processus psychologiques sont fortement imbriqués et fonctionnent ensemble comme un système [Linton et Shaw, 2011]. Pour plus de clarté, nous les avons considérés séparément.

1.3.1 Facteurs cognitifs et lombalgie chronique non spécifique

La cognition a été décrite comme l'acquisition, le traitement, le stockage et la récupération d'informations par le cerveau [Yam *et al.*, 2018]. Elle est aussi le terme générique qui est utilisé pour décrire les processus neuropsychologiques intégratifs tels que l'imagerie mentale, la résolution de problèmes et la perception [Moriarty *et al.*, 2011]. Les résultats portant sur les prédicteurs potentiels de plainte cognitive des patients présentant une LCNS ont été étayés par la passation d'épreuves neuropsychologiques [Moriarty *et al.*, 2011, Berryman *et al.*, 2013, Berryman *et al.*, 2014, Dueñas *et al.*, 2016, Mazza *et al.*, 2018, Pereira Nery *et al.*, 2023]. Dans cette sous-section, nous présenterons les résultats portant sur l'évaluation des patients LCNS dans des tâches d'attention, de mémoire, des fonctions exécutives et de vitesse de traitement de l'information.

1.3.1.1 Attention

L'étude des capacités attentionnelles de participants lombalgiques chroniques a été réalisée principalement au moyen de tâches d'interférences [Moriarty *et al.*, 2011, Pereira Nery *et al.*, 2023]. La situation expérimentale requiert d'inhiber un traitement cognitif automatique au profit d'une tâche spécifique dont la réalisation est sous-tendue par les processus de contrôle [Stroop, 1935, Morton, 1969]. Eccleston [Eccleston, 1995] a exploré l'hypothèse de l'influence de la LCNS en comparant les résultats de deux groupes de participants présentant différents degrés d'intensité de douleur, faible et sévère, à un groupe contrôle dans une tâche de tri de cartes [Morton, 1969] (figure 4). Dans une première condition, les participants devaient restituer la valeur du plus grand chiffre présenté sur une carte faisant appel à un processus automatisé (condition congruente) qui ne requiert qu'un minimum d'attention [Eccleston, 1995]. Dans une seconde condition, les participants devaient restituer la valeur d'un chiffre présenté le plus grand nombre de fois, faisant appel aux processus d'attention sélective (condition incongruente) qui permet de filtrer des informations en favorisant le traitement d'une caractéristique pertinente [Eccleston, 1995]. Pour la première condition, les performances, correspondant au temps de réaction lorsqu'une bonne réponse est donnée, sont similaires entre les trois groupes [Eccleston, 1995]. En revanche, les participants témoignant d'une douleur d'intensité sévère présentent un temps de réaction significativement plus long que les deux autres groupes lors de la deuxième condition et les participants avec des douleurs d'intensité faible ont des performances comparables à celles des volontaires sains [Eccleston, 1995]. Cette étude est la première à montrer l'influence de la douleur sur le traitement attentionnel dans une tâche sollicitant les processus de contrôle, tout en émettant l'hypothèse que les performances sont modulées par le niveau de sévérité de l'intensité douloureuse.

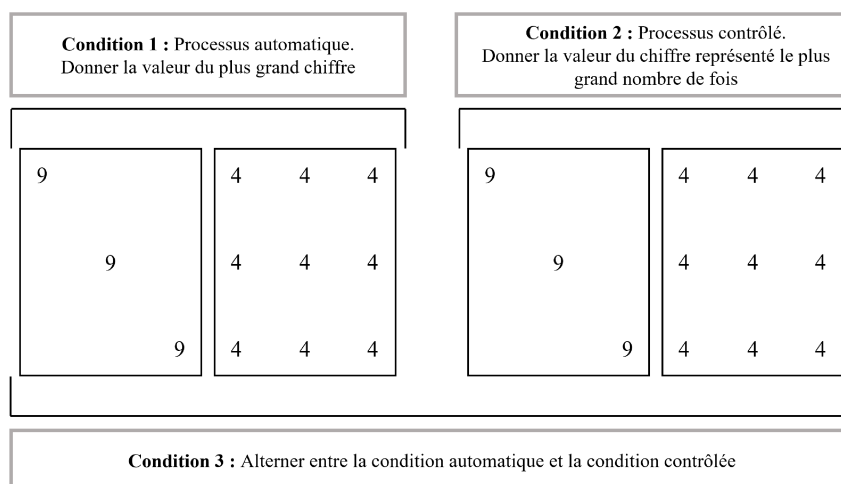


FIGURE 4 – Tâche de tri de cartes d'après Morton [Morton, 1969].

Cette hypothèse a été retestée dans une tâche de Stroop par Grisart and Plaghki [Grisart et Plaghki, 1999]. Dans la version la plus courante proposée par Stroop [Stroop, 1935] (figure 5), les participants doivent lire trois planches différentes le plus rapidement possible : deux d’entre elles représentent la condition congruente dans laquelle les participants doivent lire des noms de couleurs imprimés à l’encre noire et nommer des tâches de couleurs différentes. À l’inverse, sur une troisième planche, qui est la condition incongruente, les mots-couleur sont imprimés dans une encre de couleur incongrue (par exemple, le mot "rouge" est imprimé à l’encre verte). Ainsi, dans cette condition, les participants doivent nommer la couleur de l’encre au lieu de lire le mot [Stroop, 1935]. En d’autres termes, les participants doivent effectuer une tâche moins automatisée (nommer la couleur de l’encre) tout en inhibant l’interférence résultant d’une tâche plus automatisée (lecture) [Scarpina et Tagini, 2017]. Dans cette tâche est relevé le temps de réalisation, c’est-à-dire le temps que met le participant à lire ou à dénommer l’entièreté des planches des conditions 1, 2 et 3, et le nombre d’erreurs commises [Stroop, 1935]. Les résultats montrent que les participants lombalgiques chroniques avec un niveau de douleur de faible intensité ne présentent pas de différence ni au niveau du temps de réalisation de la tâche, ni au niveau du nombre d’erreurs avec le groupe contrôle [Grisart et Plaghki, 1999]. Cependant, les participants lombalgiques chroniques avec une douleur de forte intensité présentent des temps de réalisation de la tâche plus lents que les deux autres groupes pour l’ensemble des conditions et un nombre d’erreurs plus important pour la troisième condition [Grisart et Plaghki, 1999].

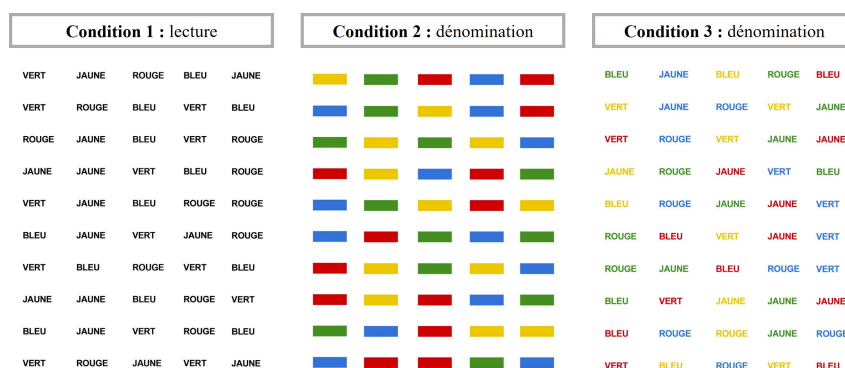


FIGURE 5 – Tâche de *Stroop* d’après Stroop [Stroop, 1935].

D’après une récente revue systématique et méta-analyse [Pereira Nery *et al.*, 2023], les études portant sur l’influence de la lombalgie chronique sur la performance à une tâche d’interférence ne montrent pas de différence significative entre les participants LCNS et sans douleur, pour des âges compris entre 18 et 65 ans. Pour l’ensemble des études présentées dans cette méta-analyse, les participants présentaient une douleur d’intensité

modérée, comprise entre 5 et 5,6 sur 10 d’après une échelle analogique ou numérique visuelle, et toutes utilisaient une tâche de Stroop mais les modalités de présentation n’étaient pas similaires, variant selon le type d’items, le nombre d’items, la présentation des items et le nombre de couleurs utilisées [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Ces résultats révèlent que la douleur d’intensité faible à modérée chez les participants LCNS ne semble pas affecter les performances à une tâche d’interférence [Pereira Nery *et al.*, 2023].

1.3.1.2 Mémoire

Les tâches de mémoire utilisées pour évaluer les participants LCNS ont porté principalement sur des tâches de mémoire à court terme et de mémoire à long terme [Pereira Nery *et al.*, 2023]. La mémoire à court terme est la mémoire du présent et comprend la mémoire immédiate et de travail permettant le stockage temporaire de petites quantités d’informations [Baddeley, 2020] nécessaires à l’exécution de tâches complexes, telles que le raisonnement, la compréhension et l’apprentissage [Baddeley et Logie, 1999]. La mémoire à long terme assure le stockage et la récupération des connaissances [Mazza *et al.*, 2018].

La mémoire à court terme des participants LCNS a été évaluée à l’aide d’épreuves d’empan (*span test*) qui permettent de mesurer la capacité de stockage en mémoire immédiate et en mémoire de travail [Wechsler, 1945]. L’empan mnésique correspond au plus grand nombre d’items que l’individu est capable de rappeler immédiatement : soit en retenant une série d’items (chiffres, mots ou positions spatiales) sans réaliser une autre tâche cognitive concurrente, appelée tâche d’empan simple et évaluant la mémoire immédiate, soit en combinant la rétention et la manipulation d’informations pour évaluer la mémoire de travail, appelée tâche d’empan complexe [Wechsler, 1945].

Les épreuves rencontrées pour des tâches évaluant la mémoire immédiate sont les tâches d’empan de mots (*list of words subtest of WMS-III*) où il est demandé aux participants de restituer une liste de mots [Strauss *et al.*, 2006], d’empan de reconnaissance immédiate et de rappel immédiat (*the face and family party scene recognition task*) où il est demandé aux participants de reconnaître des visages et de répondre à des questions portant sur des scènes de famille présentées sur une planche, et d’empan de formes (*the Rey test*), où les participants doivent restituer et reproduire un certain nombre de formes [Wechsler III, 2001, Strauss *et al.*, 2006]. Les résultats ont montré que les participants lombalgiques présentent des difficultés dans des tâches de mémoire immédiate en rappelant un nombre d’items moins important que les participants sans douleur pour des tâches d’empan de mots, de reconnaissance immédiate et de rappel immédiat [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Aucune différence n’a été observée quant au rappel de formes [Pereira Nery *et al.*, 2023].

Les épreuves rencontrées pour des tâches évaluant la mémoire de travail sont des tâches d'empan de chiffres inversés (*the backward digit span task*), qui consiste à demander aux participants de rappeler une liste de chiffres dans l'ordre inverse de présentation des items [Wechsler, 1945], de séquence lettres-chiffres (*the letter-number sequencing*), qui consiste à demander aux participants d'écouter une liste de lettres et de chiffres en alternance et de répéter cette liste en commençant par les chiffres dans l'ordre croissant puis les lettres dans l'ordre alphabétique [Wechsler, 2008], de séquence de lettres (*the interference memory task*), qui consiste à demander aux participants de retenir une séquence de lettres puis d'effectuer une tâche d'interférence et de les restituer après un délai de 10s et 30s [Mondini *et al.*, 2011], de lecture (*the paragraph recall test*), qui consiste à demander aux participants de lire un paragraphe et de rappeler immédiatement le plus grand nombre d'idées [Wilson *et al.*, 1989], et d'empan visuo-spatial (*the spatial memory task, the spatial span*), qui consiste à demander aux participants de retenir un chemin montré par un examinateur sur des cubes placés sur un plateau en 3 dimensions puis de pointer ces mêmes cubes dans le même ordre ou dans l'ordre inverse [Robbins *et al.*, 1994]. Les résultats sont hétérogènes entre les études [Pereira Nery *et al.*, 2023]. En effet, les participants LCNS ne présentent pas de différence avec les participants sans douleur pour les tâches de séquences de lettres et de chiffres inversés, mais rappellent moins d'items dans les tâches de séquences lettres-chiffres, de lecture et visuo-spatiales [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Cependant, les preuves sont de très faible qualité [Pereira Nery *et al.*, 2023].

La mémoire à long terme a été évaluée à l'aide des épreuves précédemment citées après une période de plusieurs minutes pour évaluer le stockage des informations, telles que des tâches visuelles (*the face and family party scene recognition task, the paragraph recall*) et une tâche verbale (*the list of words*) [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Quatre autres tâches ont également été relevées portant sur le rappel d'une liste de mots (*the 12-word memorization, the Hopkins Verbal Learning Test-Revised*) [Strauss *et al.*, 2006, Brandt, 1991], une tâche de reconnaissance de mots (*the verbal recognition task*) [Wechsler III, 2001] et une tâche visuelle de reconnaissance de formes (*the pattern recognition memory*) [Robbins *et al.*, 1994]. Les résultats, comme pour la mémoire à court terme, sont hétérogènes entre les études [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Les participants LCNS semblent rappeler moins d'items dans des tâches verbales et de lecture, cependant les preuves sont de faible qualité [Pereira Nery *et al.*, 2023].

En conclusion, les études portant sur l'effet de la LCNS sur les processus de mémoire sont peu nombreuses et les preuves concernant la différence entre les participants LCNS et sans douleur sont de faible qualité pour la mémoire à long terme et de très faible qualité pour la mémoire à court terme [Pereira Nery *et al.*, 2023].

1.3.1.3 Fonctions exécutives

Les fonctions exécutives se rapportent à un ensemble d'habiletés de haut niveau nécessaires à la réalisation d'un comportement dirigé vers un but [Rueda *et al.*, 2023]. Leur fonction principale est de garantir et de faciliter l'adaptation des individus à de nouvelles situations auxquelles ils n'ont jamais été confrontés, notamment quand les routines d'actions ou habiletés cognitives ne peuvent plus suffire [Rueda *et al.*, 2023]. Les fonctions du système exécutif évaluées chez les participants lombalgiques chroniques portaient sur la flexibilité cognitive, la prise de décision et les capacités visuo-spatiales [Moriarty *et al.*, 2011, Berryman *et al.*, 2014, Dueñas *et al.*, 2016, Mazza *et al.*, 2018, Pereira Nery *et al.*, 2023].

1.3.1.3.1 Flexibilité cognitive

La flexibilité cognitive permet au sujet de s'adapter aux nouvelles situations dès lors que les procédures apprises et connues ne sont plus une réponse adaptée [Miyake *et al.*, 2000]. Elle permet un désengagement de l'attention d'une tâche, d'une procédure ou d'un état mental, afin de l'orienter vers une autre tâche [Miyake *et al.*, 2000]. Elle est largement dépendante des capacités et processus attentionnels des individus [Rueda *et al.*, 2023].

Les premières études [Eccleston, 1995, Grisart et Plaghki, 1999] s'intéressant à l'effet de la lombalgie chronique sur la flexibilité cognitive ont évalué les stratégies d'adaptation des participants lombalgiques chroniques présentant une douleur de faible et de forte intensité en les comparant à des participants sans douleur à travers deux tâches précédemment citées : la tâche de tri de carte [Morton, 1969] et la tâche de Stroop [Stroop, 1935] (section 1.3.1.1). Les participants devaient alterner entre la condition dominante (processus automatique) et la condition non dominante (processus contrôlé). Les résultats n'ont pas montré de différence significative entre les groupes lombalgiques chroniques présentant une faible intensité douloureuse et les volontaires sans douleur, tant au niveau du temps de réalisation de la tâche que de la performance [Eccleston, 1995, Grisart et Plaghki, 1999]. Ainsi, les auteurs ont conclu que les participants présentant une douleur de faible intensité peuvent se décentrer de leur douleur pendant la réalisation des tâches complexes d'interférence [Eccleston, 1995, Grisart et Plaghki, 1999]. Cependant, comme pour la tâche d'interférence simple, les participants lombalgiques chroniques avec une douleur de forte intensité présentaient un temps de réalisation de la tâche plus long que les deux autres groupes [Eccleston, 1995, Grisart et Plaghki, 1999]. Les auteurs ont conclu que les participants avec une douleur de forte intensité ne peuvent pas se décentrer de leur douleur pendant la réalisation des tâches complexes d'interférence [Eccleston, 1995, Grisart et Plaghki, 1999].

De plus récentes études se sont intéressées à l'effet de la lombalgie chronique sur la flexibilité cognitive dans des tâches de flexibilité réactive, qui est la capacité d'alterner entre plusieurs tâches cognitives en déplaçant le focus attentionnel d'un stimulus à l'autre [Eslinger et Grattan, 1993], telles que le *Trail Making Test* (TMT) [Reitan, 1958] et le *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST) [Heaton et Staff, 1993] et dans des tâches de flexibilité spontanée, qui est la production d'une suite d'idées ou de réponses données à une question et permet la recherche active en mémoire de concepts moins fréquents au détriment des réponses habituelles ou automatiques [Eslinger et Grattan, 1993], telles que des tâches de fluence verbale (*The Controlled Oral Word Association Test* (COWAT) [Benton *et al.*, 1994] et *The Verbal Association Scale* [Strauss *et al.*, 2006]).

Le TMT (figure 6) est une mesure de la capacité de balayage visuel, de la vitesse graphique et de la flexibilité mentale [Lezak, 2004]. Cette épreuve est composée de deux parties. La première, TMT-A, consiste à relier dans l'ordre numérique 25 points disposés sur une planche de manière aléatoire. La deuxième partie, TMT-B, consiste à relier des points alternant entre des chiffres et des lettres, dans l'ordre croissant pour les chiffres et alphabétique pour les lettres. Les deux variables étudiées sont le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs.

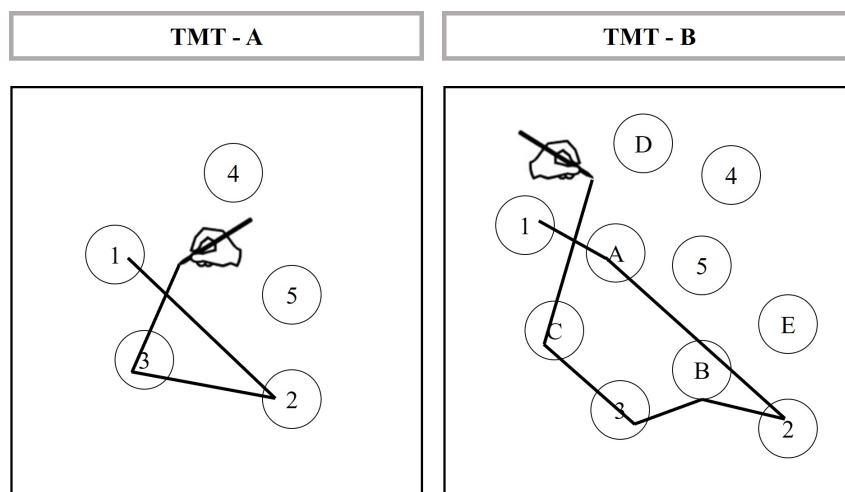


FIGURE 6 – Tâche du *Trail Making Test* d'après Reitan [Reitan, 1958].

Le WCST (figure 7) est une mesure de la capacité à résoudre des problèmes en réponse à des stimuli changeants, à changer et maintenir sa position et à utiliser le retour d'informations [Strauss *et al.*, 2006]. Cette épreuve consiste tout d'abord à présenter aux participants quatre cartes, qui diffèrent en fonction des formes, de la couleur et du nombre d'items présentés. Les participants sont ensuite invités à associer 128 autres cartes à l'une de ces quatre cartes. Pendant l'épreuve, les règles d'association vont changer après un nombre consécutif d'associations correctes. Pour chacun des 128 essais, l'examineur choisit si les cartes doivent être classées en fonction de la forme, de la couleur ou du nombre d'items présentés, mais ne le dit pas au participant, en lui indiquant seulement si l'association est bonne ou mauvaise. Les deux variables étudiées sont le nombre de réponses correctes et le nombre de persévérations.

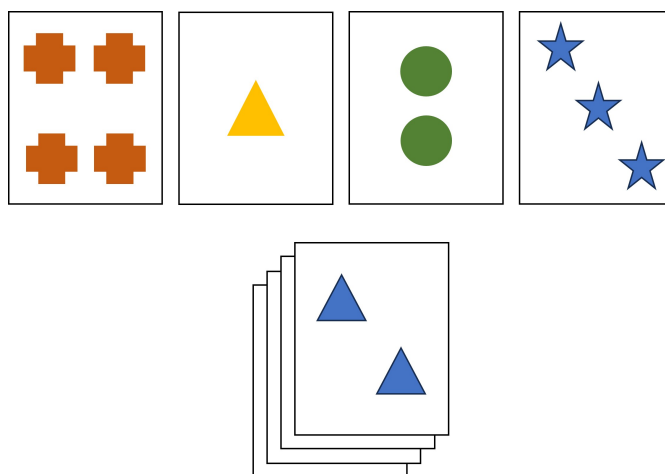


FIGURE 7 – Tâche du *Wisconsin Card Sorting Test* d'après Heaton et Staff [Heaton et Staff, 1993].

Le COWAT mesure la fluence verbale phonémique en évaluant les stratégies employées par les participants afin de délimiter leurs recherches en mémoire sémantique [Benton *et al.*, 1994]. Cette tâche consiste à demander aux participants de donner le plus de mots possible en 60 secondes qui commencent par la lettre F, puis A, puis S. Le *Verbal Association Scale* mesure la fluence verbale, phonémique et catégorielle [Strauss *et al.*, 2006]. La fluence verbale catégorielle évalue la mémoire sémantique en demandant aux participants une recherche lexicale à partir d'une catégorie de mots donnée apportant des indices sur la préservation de leur représentation sémantique [Strauss *et al.*, 2006].

Les résultats sont hétérogènes entre les études. En effet, la majorité des études (six études sur huit) ne montrent pas de différences entre les participants LCNS et sans douleur [Masiliūnas *et al.*, 2017, Tamburini *et al.*, 2014, Apkarian *et al.*, 2004, Melkumova *et al.*, 2011]. Pour les deux études qui montrent des différences : les participants LCNS présentent

un temps de passation de la tâche plus long, sans pour autant que le nombre d'erreurs soit plus important concernant le TMT [Schiltenswolf *et al.*, 2017] et présentent un nombre de réponses correctes inférieur et un nombre de persévérations supérieur concernant le WCST [Tamburin *et al.*, 2014]. Ces résultats semblent montrer que la LCNS n'influence pas les performances à des tâches de flexibilité cognitive.

1.3.1.3.2 Prise de décision

La prise de décision est un processus qui consiste à faire un choix parmi un certain nombre d'alternatives afin d'atteindre un résultat souhaité [Lunenbourg, 2010]. La tâche retenue par toutes les études évaluant l'impact de la lombalgie chronique sur la prise de décision est l'Iowa Gambling Task (IGT) [Bechara *et al.*, 1994]. Deux versions ont été proposées : une version papier [Apkarian *et al.*, 2004] et une version analogique [Masiliūnas *et al.*, 2017, Tamburin *et al.*, 2014]. Pour les deux versions, la tâche consiste à présenter quatre cartes nommées A, B, C et D [Bechara *et al.*, 1994]. Sous chaque carte, les participants peuvent gagner ou perdre des points (ou gains). Sous les cartes A et B, les gains et les pertes étaient importants [Bechara *et al.*, 1994]. Sous les cartes C et D les gains et les pertes étaient moins importants [Bechara *et al.*, 1994]. Les cartes A et B sont ainsi considérées comme " désavantageuses " car avec plus de risques que les cartes C et D, considérées comme " avantageuses " [Bechara *et al.*, 1994]. Le but de la tâche était ainsi d'obtenir le plus possible de points, en demandant aux participants de choisir consécutivement les cartes qui leur convenaient le mieux [Bechara *et al.*, 1994]. Les instructions données aux participants étaient les suivantes [Bechara *et al.*, 1994] : " Vous pouvez voir 4 paquets de cartes devant vous. Chaque carte peut apporter un avantage ou un désavantage. Le but de cette tâche est d'avoir le plus de points possible. " Les variables utilisées pour mesurer la prise de décision étaient le nombre de points à la fin de la tâche (stratégie risquée vs. moins risquée), la différence entre le nombre de cartes tirées des jeux désavantageux et des jeux avantageux (stratégie utilisée), le nombre de cartes tirées des jeux avantageux tous les 20 tirages et le nombre de cartes tirées des jeux désavantageux tous les 20 tirages (apprentissage) [Bechara *et al.*, 1994]. Ainsi, cette tâche exige, comme dans la vie réelle, de faire face à l'incertitude dans un contexte de punition et de récompense, certains choix étant avantageux à court terme (récompense élevée), mais désavantageux à long terme (punition plus élevée) [Brevers *et al.*, 2013]. De plus, d'autres choix sont moins attrayants à court terme (récompense faible), mais avantageux à long terme (punition plus faible) [Brevers *et al.*, 2013]. La principale caractéristique de cette tâche est que les participants doivent renoncer à des avantages à court terme pour des avantages à long terme [Brevers *et al.*, 2013].

Les résultats sont hétérogènes entre les études [Apkarian *et al.*, 2004, Masiliūnas *et al.*, 2017, Tamburin *et al.*, 2014]. Deux études sur trois montrent des résultats significativement

différents entre les participants lombalgiques chroniques [Apkarian *et al.*, 2004, Tamburin *et al.*, 2014] et les participants sans douleur alors qu’une étude ne trouve aucune différence [Masiliūnas *et al.*, 2017]. Ainsi, dans les études montrant une différence, les participants lombalgiques chroniques présentent une stratégie plus risquée que les participants sans douleur, c’est-à-dire ont un score total de points à la fin de la tâche inférieur aux participants sans douleur [Apkarian *et al.*, 2004, Tamburin *et al.*, 2014]. De plus, les participants lombalgiques présentent une différence au niveau de la courbe d’apprentissage, c’est-à-dire le nombre de cartes tirées des paquets C et D permettant des avantages à long terme [Apkarian *et al.*, 2004, Tamburin *et al.*, 2014]. Ces résultats semblent montrer que pour une tâche décisionnelle, les participants lombalgiques chroniques prennent des décisions plus risquées et ne modifient pas leur stratégie au cours du temps.

1.3.1.3.3 Capacité visuo-spatiale

Les capacités visuo-spatiales sont des composantes essentielles de la perception, qui permet de naviguer et de s’adapter aux défis de l’environnement [Meneghetti *et al.*, 2021]. Elles comprennent un ensemble de compétences distinctes, telles que la rotation mentale, qui consiste à identifier des objets sous différents angles, et la rotation d’un individu, qui est la capacité d’un individu à imaginer une position différente de son corps dans l’espace et de voir son environnement d’un nouveau point de vue [Meneghetti *et al.*, 2021]. Dans le cas de la LCNS, deux outils de mesure ont servi à évaluer les participants : le *Judgement of Line Orientation* (JLO) qui mesure les capacités des participants à estimer l’orientation angulaire de lignes dans l’espace, disposées en demi-cercle et séparées de 18 degrés les unes des autres [Riccio et Hynd, 1992] (figure 8), et le *Hooper Visual Organisation Test* (HVOT) qui mesure les capacités d’organisation visuo-spatiale et consiste à montrer une série d’images d’objets de la vie quotidienne coupés en morceaux et de demander à nommer l’objet [Lopez *et al.*, 2003]. La variable mesurée dans ces deux tests est le nombre de bonnes réponses. Les résultats montrent que les participants lombalgiques présentaient des scores similaires aux participants sans douleur [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Ainsi, la LCNS ne semble pas affecter les capacités visuo-spatiales des participants.

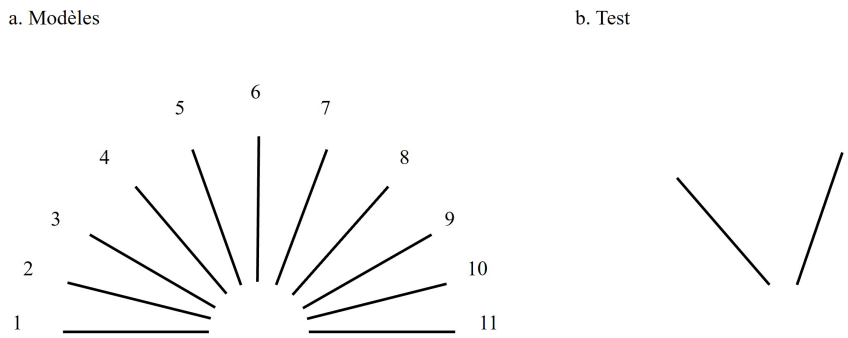


FIGURE 8 – Tâche du *Judgement of Line Orientation* d’après Riccio et Hynd [Riccio et Hynd, 1992].

1.3.1.4 Vitesse psychomotrice

La vitesse psychomotrice est définie par la vitesse à laquelle les tâches à composante motrice sont effectuées [Higgins *et al.*, 2018]. Dans le cas de la LCNS, trois outils de mesure ont servi à évaluer les participants. Le *Digit Symbol Substitution Test* (DSST) mesure différentes opérations cognitives telles que la vitesse motrice, l’attention, les fonctions perceptivo-motrices, le balayage visuel et la capacité d’écrire ou de dessiner [Lezak, 2004]. Cette épreuve consiste à demander au participant de faire correspondre des symboles à des chiffres en fonction d’une clé (c’est-à-dire un modèle) située en haut de la page. Le participant recopie le symbole dans les espaces situés sous une rangée de chiffres (figure 9). Le nombre de symboles corrects dans le temps imparti, généralement de 90 à 120 secondes, constitue le score.

a. Modèles

1	2	3	4	5	6	7	8	9
—	└	○	└┘	└	└	△	×	=

b. Test

6	3	9	7	1	8	6	7	4	6	3	2	8
└	○	=	△	—								
1	5	3	4	2	7	9	3	2	8	5	1	9

FIGURE 9 – Tâche du *Digit Symbol Substitution Test* d’après Lezak [Lezak, 2004].

Le *Stocking of Cambridge* (SOC) est une épreuve sur ordinateur et consiste à demander aux participants de répliquer la configuration d’une image représentant des boules de couleurs [Robbins *et al.*, 1994] (figure 10.a.). Les variables mesurées sont le niveau de difficulté atteint, le nombre moyen de mouvements utilisés et le temps de réaction.

Le *Choice Reaction Time* (CRT) est un test de temps de réaction à deux choix, qui est utilisé pour tester la vigilance générale et la vitesse motrice [Robbins *et al.*, 1994] (figure 10.b.). L'individu doit appuyer sur le bouton gauche de la tablette si le stimulus est affiché sur le côté gauche de l'écran, et sur le bouton droit si le stimulus est affiché sur le côté droit de l'écran. Les variables étudiées sont le nombre de réponses correctes et incorrectes, les erreurs de commission et d'omission (réponses tardives et précoces) et la latence (vitesse de réponse). Sur trois études, deux études ne montrent pas de résultats différents entre les participants LCNS et les participants sans douleur pour les tâches de SOC et de CRT [Schiltewolf *et al.*, 2017, Corti *et al.*, 2021]. Concernant le DSST, les participants lombalgiques restituent un nombre de figures significativement moins important que les participants sans douleur [Melkumova *et al.*, 2011]. Ces résultats suggèrent que la tâche réalisée évaluant la vitesse motrice des participants LCNS semble impacter leur performance.

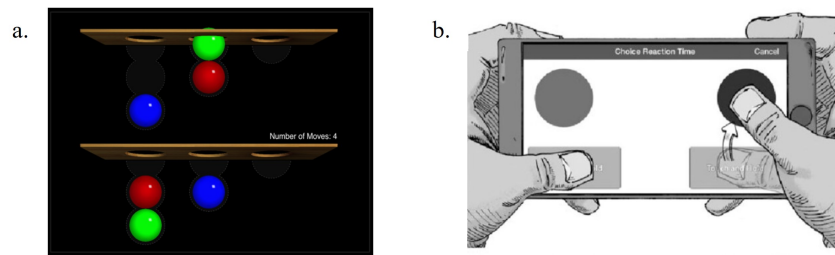


FIGURE 10 – a. Tâche du *Stocking of Cambridge* et b. Tâche du *Choice Reaction Time* d'après Robbins *et al.* [Robbins *et al.*, 1994] (b. image modifiée de Burke *et al.* [Burke *et al.*, 2017].)

En conclusion, il existe peu de preuves d'une relation entre la LCNS et les difficultés cognitives. Cependant, ces résultats sont à mettre en perspective avec les caractéristiques de la douleur (intensité, durée) et les facteurs émotionnels (anxiété, dépression, peur). En effet, la méta-analyse de Pereira *et al.* [Pereira Nery *et al.*, 2023] a montré qu'il existait une corrélation entre l'intensité de la douleur et certaines fonctions cognitives telles que la mémoire de travail et la résolution de problèmes, où à mesure que l'intensité de la douleur est importante, les capacités cognitives diminuent [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Pour compléter ces résultats, la relation entre des facteurs émotionnels et les fonctions cognitives a été examinée [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Les résultats sont hétérogènes selon les études et il n'est pas possible de conclure d'une corrélation entre les facteurs émotionnels et les fonctions cognitives présentées dans cette revue [Pereira Nery *et al.*, 2023]. Il est important de noter que le nombre d'études portant spécifiquement sur les difficultés cognitives des participants LCNS est encore très faible et d'autres études sont encore à mener pour généraliser ces résultats [Pereira Nery *et al.*, 2023] notamment dans des tâches plus complexes et prenant en compte les caractéristiques de la douleur ainsi que les facteurs émotionnels associés.

1.3.2 Facteurs émotionnels et lombalgie chronique non spécifique

De nombreuses études se sont intéressées aux facteurs émotionnels accompagnant la LCNS. Dans cette section, nous présenterons tout d’abord un modèle théorique sur l’existence d’un continuum entre la nociception et les humeurs négatives influençant des changements de comportement chez les patients douloureux, puis nous présenterons spécifiquement les émotions accompagnant la LCNS.

1.3.2.1 Continuum entre nociception et émotions : modèle théorique

Baliki et al. [Baliki et Apkarian, 2015] ont proposé un cadre théorique sur l’existence d’un continuum entre la douleur et les humeurs négatives amenant à des changements de comportement. Tout d’abord, en l’absence de menace prévisible et d’affects négatifs, la nociception protège l’organisme contre les blessures en limitant par exemple les positions et postures du corps [Baliki et Apkarian, 2015]. Deuxièmement, l’activation de la nociception en douleur consciente se joint à un retrait rapide du corps pour l’éloigner de la menace [Baliki et Apkarian, 2015]. Ce comportement de retrait est associé à un affect négatif conscient [Baliki et Apkarian, 2015]. Ainsi, les affects négatifs minimisent l’exposition au danger et favorisent la survie en inhibant le comportement [Baliki et Apkarian, 2015]. Cependant, lorsque la menace est connue par un apprentissage et que l’on s’attend à ce qu’elle soit rencontrée à une distance ou à un moment donné, l’individu peut éprouver de l’anxiété ou du stress [Baliki et Apkarian, 2015]. En d’autres termes, tout comme la douleur motive l’évitement de nouvelles blessures corporelles et favorise les comportements qui améliorent la guérison, l’anxiété peut favoriser, à une distance physique immédiate et à une échelle de temps relativement courte, des comportements qui diminuent le danger en l’anticipant [Baliki et Apkarian, 2015]. Pour finir, si, au contraire, la menace est ressentie ou attendue comme omniprésente, l’humeur négative associée est plus abstraite, et peut se traduire par un état dépressif en inhibant tout comportement pouvant provoquer une douleur [Baliki et Apkarian, 2015]. L’état dépressif, qui est une aversion plus globale que l’anxiété à l’égard de l’environnement, entraîne une restriction de l’espace personnel par l’isolement social, la réduction de l’activité physique et la diminution des comportements motivés [Baliki *et al.*, 2006].

Comme dans le cas de la douleur chronique, la persistance d’humeurs négatives devient un processus inadapté, maintenu au moins partiellement par des mécanismes neurophysiopathologiques [Baliki et Apkarian, 2015]. Des études longitudinales se sont notamment intéressées à l’association entre la douleur et les symptômes anxieux et dépressifs et ont montré qu’il existait une relation bidirectionnelle [Gerrits *et al.*, 2014, Gerrits *et al.*, 2015]. Ces études ont montré tout d’abord une synchronie entre le changement des symp-

tômes dépressifs et anxieux et le changement de la douleur, en d'autres termes, si les symptômes anxieux et dépressifs diminuaient, les symptômes de la douleur diminuaient également [Gerrits *et al.*, 2014, Gerrits *et al.*, 2015]. Il a également été montré que les troubles anxieux et dépressifs étaient associés à une aggravation de la douleur avec une augmentation de l'intensité douloureuse perçue et du handicap fonctionnel [Gerrits *et al.*, 2014, Gerrits *et al.*, 2015]. Pour finir, la présence de troubles anxieux et dépressifs participait à l'augmentation de la durée de la douleur [Gerrits *et al.*, 2014, Gerrits *et al.*, 2015]. Nous pouvons alors nous demander quelles sont les humeurs négatives rencontrées dans la LCNS et quelles sont leurs conséquences sur les participants LCNS ?

1.3.2.2 Anxiété, dépression et lombalgie chronique non spécifique

De nombreuses études se sont intéressées à la prévalence des troubles anxieux et dépressifs dans des populations présentant une lombalgie chronique [Atkinson *et al.*, 1991, Land *et al.*, 2010, Ramond *et al.*, 2011, Ranger *et al.*, 2020, Bener *et al.*, 2013, Land *et al.*, 2010, Pincus *et al.*, 2002, Pinheiro *et al.*, 2016, Pinheiro *et al.*, 2015]. Deux formes d'anxiété sont décrites dans la littérature : la peur, qui se caractérise par une réaction extrême, limitée dans le temps et préparant à fuir, et l'inquiétude qui se distingue de la peur par des intrusions cognitives fréquentes où la personne envisage des possibilités négatives et aversives [Eccleston *et al.*, 2001]. La dépression se caractérise par une baisse d'humeur persistante et une perte d'intérêt et de plaisir pour les choses ordinaires [Fernandez *et al.*, 2017].

Les études ont montré que les personnes présentant une lombalgie chronique étaient plus susceptibles de souffrir d'anxiété et de dépression que les personnes sans douleurs [Bener *et al.*, 2013, Atkinson *et al.*, 1991, Land *et al.*, 2010, Pincus *et al.*, 2002, Pinheiro *et al.*, 2016, Pinheiro *et al.*, 2015]. Cependant, peu d'études se sont intéressées à la relation de cause à effet entre lombalgie chronique et symptômes anxieux et dépressifs. Une importante étude longitudinale portant sur plus de 1000 participants, dont une certaine proportion de jumeaux, a examiné l'influence des antécédents de lombalgie chronique sur le risque futur de symptômes anxieux en contrôlant l'effet des facteurs familiaux [Fernandez *et al.*, 2017]. Elle n'a pas permis de mettre en évidence un lien de causalité entre lombalgie, anxiété et dépression [Fernandez *et al.*, 2017]. Cependant, comme dans les études précédentes, l'anxiété et la dépression étaient associées à la lombalgie chronique [Fernandez *et al.*, 2017]. De plus, la dépression et l'anxiété semblent être fortement associées [Lamers *et al.*, 2011]. En effet, d'après une enquête sur une large cohorte, parmi les personnes présentant une dépression, 67 % présentaient également un trouble anxieux et parmi les personnes souffrant d'anxiété, 63 % présentaient un trouble dépressif [Lamers *et al.*, 2011]. Une récente étude transversale s'est intéressée quant à elle aux caractéristiques psychologiques des patients lombalgiques chroniques : elle a montré qu'il existait une relation entre

dépression, anxiété et lombalgie chronique avec une majoration des symptômes douloureux d'autant plus prononcée que les symptômes anxieux et dépressifs étaient importants [Ranger *et al.*, 2020]. Cependant, lorsque tous les facteurs psychologiques ont été ajoutés au modèle de régression, seule la dépression est restée significativement associée [Ranger *et al.*, 2020]. Ces résultats suggèrent que la dépression est un facteur psychologique particulièrement important à prendre en compte dans l'évaluation et dans la conception des études sur la lombalgie [Ranger *et al.*, 2020]. Plusieurs revues systématiques portant spécifiquement sur le lien entre troubles dépressifs et lombalgie ont montré que la dépression est (1) un facteur prédictif du passage à la chronicité dans le cas de la lombalgie aiguë ou subaiguë [Ramond *et al.*, 2011] ou d'un nouvel épisode douloureux [Pinheiro *et al.*, 2015], (2) associée à une aggravation de la lombalgie et de l'invalidité [Pincus *et al.*, 2002, Pinheiro *et al.*, 2016], (3) un facteur prédictif de la durée de guérison [Ramond *et al.*, 2011], et (4) associée, après ajustement selon l'âge, le sexe, l'IMC et la durée des symptômes, à une lombalgie persistante, avec des niveaux de douleurs et d'incapacité fonctionnelle élevés [Ranger *et al.*, 2020].

En conclusion, des processus émotionnels sont impliqués dans la chronicisation de la douleur, révélés chez les patients LCNS par des troubles dépressifs et à moindre mesure anxieux. D'autres facteurs psychologiques ont également été observés dans la population lombalgique chronique telles que la catastrophisation et la kinésiophobie [John *et al.*, 2023, Ranger *et al.*, 2020, Macías-Toronjo *et al.*, 2020, Ege, 2023, Tissot *et al.*, 2023] et semblent jouer un rôle majeur dans les modèles psychologiques explicatifs des modifications du comportement chez les patients [Mills *et al.*, 2019]. De plus, des études ont révélé que le profil cognitivo-comportemental des patients douloureux chroniques permettait de prédire le pronostic et l'ampleur de la détresse psychologique des individus facilitant la chronicisation de la douleur [Mills *et al.*, 2019]. Il a notamment été montré qu'un changement dans l'attitude de l'individu à l'égard de la douleur peut réduire le niveau d'anxiété et le niveau de douleur [Mills *et al.*, 2019]. Ainsi, l'un des enjeux majeurs actuels est de comprendre comment et quels mécanismes psychologiques influencent cette chronicisation. Dans la prochaine section, nous présenterons les modèles psychologiques explicatifs de la chronicisation de la douleur ainsi que leur implication dans les modifications du comportement des patients lombalgiques chroniques.

1.4 Modèles psychologiques de la chronicisation de la douleur

Une des conditions préalables à la perception de la douleur est que l'attention soit dirigée vers le stimulus nociceptif [Linton et Shaw, 2011]. Ainsi, l'attention a pour fonction psychologique de motiver le comportement et de conduire à une réponse appropriée pour traiter la blessure [Linton et Shaw, 2011]. Cependant, si la douleur est considérée comme une menace, plus la menace est grande, plus l'attention portée à celle-ci est importante et peut être accompagnée de peur et d'anxiété par le patient qui rentre alors dans un état d'hypervigilance [Linton et Shaw, 2011]. L'hypervigilance dans le processus de chronicisation est définie par une attention excessive portée à la douleur [Linton et Shaw, 2011]. D'autres processus cognitifs peuvent également intervenir comme les croyances, les représentations et l'interprétation de la douleur [Linton et Shaw, 2011]. Les croyances sur la douleur ont, dans un premier temps, un rôle de protection, en permettant de faciliter l'interprétation des stimuli en fournissant un raccourci qui aide à traiter une très grande quantité d'informations de manière plus efficace, mais peuvent devenir délétères dans le cas où les apprentissages et le contexte social ne sont pas favorables à la douleur [Linton et Shaw, 2011]. Par exemple, certaines croyances peuvent conduire à des restrictions comme la diminution ou l'arrêt total d'activité [Linton et Shaw, 2011]. Un deuxième processus est la représentation que le patient a de la cause, de la prise en charge et de la durée de guérison de sa douleur [Linton et Shaw, 2011]. Ainsi, lorsque ses attentes ne sont pas satisfaites, comme dans le cas d'une douleur prolongée ou d'une prise en charge qu'il juge trop longue, les comportements d'adaptation du participant peuvent être erronés [Linton et Shaw, 2011]. Le troisième processus est l'interprétation que fait le patient de sa douleur [Linton et Shaw, 2011]. Les interprétations permettent de donner du sens aux signaux nociceptifs et sont liées à l'état émotionnel du patient [Linton et Shaw, 2011]. Ainsi, une mauvaise interprétation de la douleur peut conduire dans certains cas à la catastrophisation, définie par une orientation exagérée et négative à l'égard de la douleur, lorsqu'un évènement relativement neutre est transformé de manière irrationnelle en une catastrophe [Linton et Shaw, 2011]. Nous décrivons dans cette partie les cinq modèles décrits à l'heure actuelle pour expliquer la chronicisation de la douleur : le modèle de peur et d'évitement, le modèle d'acceptation et d'engagement, le modèle de résolution de problèmes mal orientée, le modèle d'auto-efficacité et le modèle stress-diathèse.

1.4.1 Modèle de peur et d'évitement

Le modèle de peur et d'évitement a été avancé pour expliquer comment les patients présentant une douleur aiguë ou subaiguë peuvent passer avec le temps à un état chronique de dépression, d'invalidité et d'inactivité [Vlaeyen *et al.*, 1995a, Vlaeyen *et al.*, 1995b].

Les processus du modèle de peur et d'évitement sont présentés sur la figure 11. Dans ce modèle, la peur est un facteur spécifique de la régulation des émotions qui résulte d'une interprétation de la douleur comme étant menaçante (catastrophisme) et affecte les processus d'attention (hypervigilance), amenant à des comportements d'évitement [Vlaeyen *et al.*, 1995a, Vlaeyen *et al.*, 1995b]. La peur serait sous-tendue par des affects négatifs et des croyances sur la douleur [Linton et Shaw, 2011]. Ainsi, ce modèle suppose qu'en l'absence d'une mauvaise interprétation du signal nociceptif, de fausses croyances et d'une représentation erronée de la douleur, les individus sont plus susceptibles d'affronter la douleur et de s'engager dans un processus actif de guérison [Linton et Shaw, 2011]. Le modèle de peur et d'évitement suppose que la peur de la douleur, d'une blessure ou d'une nouvelle blessure est parfois plus invalidante que la douleur elle-même et qu'avec le temps, cette peur entraîne un déconditionnement musculo-squelettique, une réduction de la tolérance à la douleur et une diminution des tentatives pour surmonter les limitations fonctionnelles [Macías-Toronjo *et al.*, 2020].

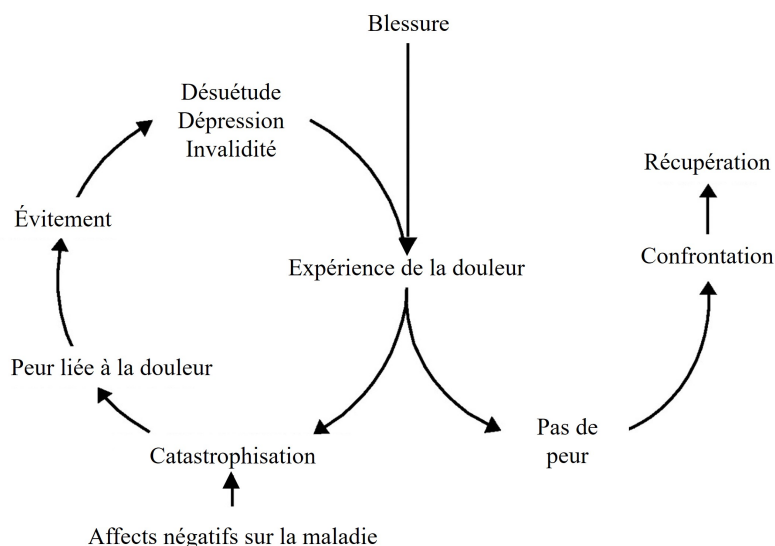


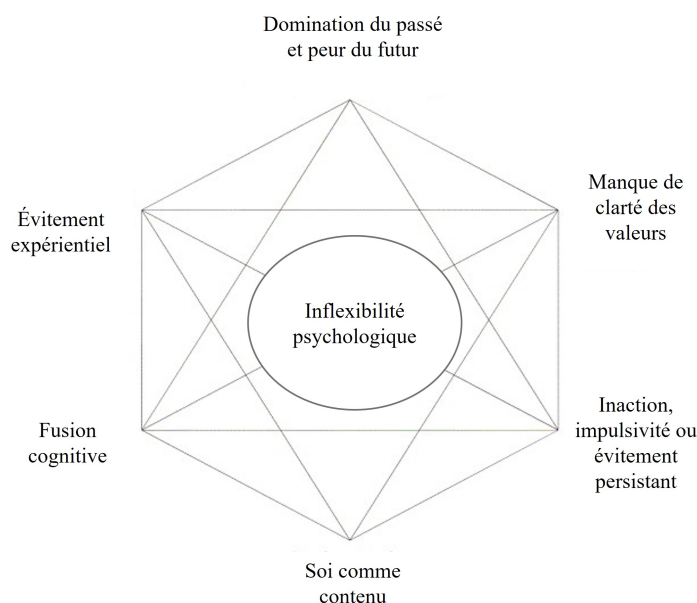
FIGURE 11 – Le modèle de peur et d'évitement ou de peur liée à la douleur adapté de Linton et Shaw [Linton et Shaw, 2011].

Dans le cas de la lombalgie chronique, des études ont révélé que la catastrophisation, la kinésiophobie et les croyances d'évitement de la peur sont des facteurs qui jouent un rôle dans son développement et son passage à la chronicité [Macías-Toronjo *et al.*, 2020]. Les résultats portant sur l'association entre la catastrophisation et la lombalgie chronique ont montré que la catastrophisation était un facteur de risque important de la douleur chronique d'intensité sévère et associée à une incapacité fonctionnelle [Ranger *et al.*, 2020]. De plus, une diminution de la catastrophisation, avec une augmentation des activités quotidiennes, est corrélée à une diminution de l'intensité douloureuse [Wertli *et al.*, 2014]. La catastrophisation est "un ensemble mental négatif exagéré mis en œuvre

lors d'une expérience douloureuse réelle ou anticipée" [Wertli *et al.*, 2014]. Dans cette situation, les patients imaginent le pire résultat possible, ce qui est décrit comme une stratégie d'adaptation pour éviter une douleur intense ou d'autres résultats aversifs déjà vécus dans le passé [Wertli *et al.*, 2014]. Dans le cas de l'association entre la kinésiophobie, les croyances d'évitement de la peur et la lombalgie, les résultats sont différents selon la durée de la douleur [Ranger *et al.*, 2020]. Ainsi, une association entre la kinésiophobie et les croyances d'évitement de la peur a été retrouvée dans deux revues systématiques portant sur le retour au travail chez les personnes souffrant de lombalgie subaiguë [Wertli *et al.*, 2014, Steenstra *et al.*, 2017]. Cependant, aucune association avec la sévérité de la douleur et l'incapacité fonctionnelle n'a été mise en évidence dans le cas de la lombalgie chronique [Wertli *et al.*, 2014, Steenstra *et al.*, 2017, Ranger *et al.*, 2020]. Ces résultats peuvent s'expliquer par le rôle de la kinésiophobie et des croyances portant sur l'évitement du mouvement qui désignent une peur excessive et irrationnelle de tout mouvement ou activité susceptibles de provoquer une douleur ou de se blesser à nouveau [Demirbüken *et al.*, 2016, Du *et al.*, 2018]. La croyance d'évitement de la peur se concentre spécifiquement sur les croyances concernant la façon dont l'activité physique et le travail affectent la douleur [Agnus Tom *et al.*, 2022]. Ces résultats suggèrent que dans le cas des phases précoces de la lombalgie (aiguë et subaiguë) les croyances ne sont pas encore complètement ancrées, au contraire de la phase chronique au cours de laquelle les croyances ont été renforcées [Ranger *et al.*, 2020].

1.4.2 Modèle d'acceptation et d'engagement

Le modèle d'acceptation et d'engagement suit une approche psychothérapeutique plus générale, appelée thérapie d'acceptation et d'engagement, et a été proposée en complément de la thérapie cognitivo-comportementale pour la prise en charge des patients douloureux [Linton et Shaw, 2011]. La figure 12 présente les mécanismes impliqués dans ce modèle, cependant elle ne reflète pas spécifiquement le cas de la douleur chronique [Hayes *et al.*, 2006]. La base de ce modèle repose sur l'inflexibilité psychologique, définie par l'incapacité à persister ou à modifier des modèles de comportement qui pourraient servir des objectifs à long terme [Hayes *et al.*, 2006]. Dans le cas de la douleur chronique, ce modèle suggère que les individus devraient limiter les tentatives d'éviter ou de contrôler la douleur, pour plutôt porter leur attention au maximum sur la vie quotidienne, la participation à des activités valorisées et la poursuite d'objectifs personnellement pertinents [Hayes *et al.*, 2006]. Des études récentes menées auprès de patients souffrant de douleur chronique ont suggéré que l'acceptation de la douleur entraîne moins de détresse émotionnelle et un meilleur fonctionnement physique [Wicksell *et al.*, 2010].



L'*évitement expérientiel* correspond au fait de se soustraire à certaines pensées, émotions, sensations physiques en essayant de modifier leur fréquence, intensité ou exposition. La *fusion cognitive* désigne la tendance d'une personne à interpréter ses pensées comme si elles représentaient la réalité. Le *soi comme contenu* fait référence à l'image renvoyée aux autres dont l'histoire est intellectualisée. Le *manque de clarté des valeurs* désigne les difficultés à intellectualiser des buts sur les sphères sociales (professionnelle, amicale) et pour soi-même.

FIGURE 12 – Le modèle d'acceptation et d'engagement adapté de Hayes et al. [Hayes *et al.*, 2006].

1.4.3 Modèle de résolution de problèmes mal orientée

Le modèle de résolution de problèmes mal orientée suggère que les processus émotionnels tels que les inquiétudes concernant la douleur et les processus cognitifs tels que la catastrophisation sont une prédisposition humaine à résoudre les problèmes en ruminant verbalement les résultats négatifs possibles et en élaborant des méthodes d'évitement ou de fuite [Eccleston et Crombez, 2007] (figure 13). D'après ce modèle, l'inquiétude et ses implications font partie d'une stratégie naturelle de résolution de problèmes, mais qui, dans le cas de la douleur chronique, peuvent avoir des conséquences néfastes à long terme [Eccleston et Crombez, 2007]. Ce modèle implique que la douleur interrompt de façon répétée l'attention, alimente les inquiétudes concernant les conséquences négatives, produit une hypervigilance à son égard et entraîne des efforts répétés pour la soulager même lorsque l'on ne croit pas qu'une solution existe [Eccleston et Crombez, 2007]. L'implication clinique de ce modèle propose, dans le cas de la lombalgie, une réorientation des objectifs à atteindre vers une prise en charge plus fonctionnelle, et non plus centrée seulement sur le soulagement de la douleur, afin d'orienter les efforts vers des solutions plus susceptibles d'être fructueuses [Linton et Shaw, 2011].

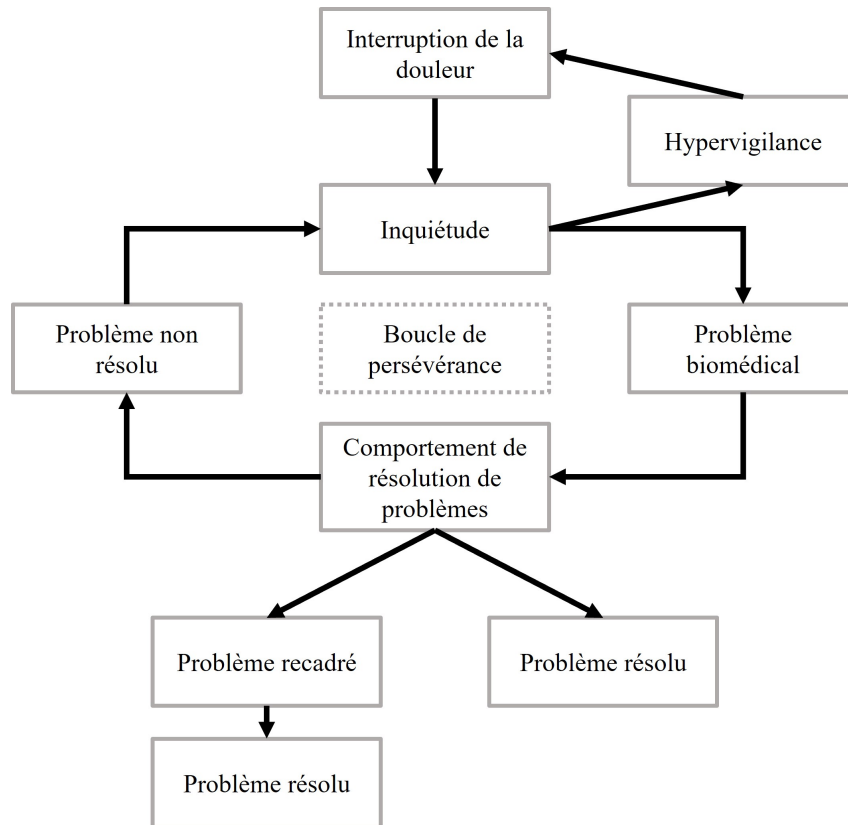


FIGURE 13 – Le modèle de résolution de problèmes mal orientée adapté de Eccleston et Crombez [Eccleston et Crombez, 2007].

1.4.4 Modèle d'auto-efficacité

L'auto-efficacité a été définie comme "*la croyance en ses capacités à organiser et à exécuter les plans d'action requis pour produire des résultats donnés*", en d'autres termes elle désigne la confiance qu'une personne a en sa propre capacité à atteindre un résultat souhaité [Bandura, 1977]. La douleur peut influencer les habitudes et les modes de vie des patients [Costa *et al.*, 2011]. Ce modèle suggère que si les patients maintiennent leurs activités physiques, sociales et professionnelles de base alors cela favorise un sentiment de confiance pour faire face à la douleur [Linton et Shaw, 2011]. Des études ont montré qu'une auto-efficacité élevée chez les patients lombalgiques chroniques aidait à l'amélioration fonctionnelle et à l'amélioration de la qualité de vie [Costa *et al.*, 2011]. Ce modèle impose que les patients apprennent à surmonter efficacement les problèmes fonctionnels et utilisent judicieusement les soutiens et les ressources disponibles, mettant en avant l'implication des processus comportementaux (stratégie de coping) ainsi que les processus cognitifs (interprétation du problème et degré de contrôle) [Costa *et al.*, 2011]. Les stratégies de coping sont les réponses ou les réactions que les individus mettent en place pour maîtriser, réduire ou tolérer la situation aversive et ici la douleur [Linton et Shaw, 2011].

1.4.5 Modèle stress-diathèse

Bien que la lombalgie chronique puisse contribuer à la détresse émotionnelle, il est possible qu'une détresse émotionnelle préexistante puisse prédisposer certaines personnes à la douleur [Linton et Shaw, 2011]. La diathèse définit ici la vulnérabilité d'un individu à présenter une affection émotionnelle [Zuckerman, 1999]. Ainsi, ce modèle suggère qu'une personne déjà soumise à une détresse émotionnelle avant un épisode douloureux peut présenter des ressources d'adaptation restreintes ce qui entraînerait une augmentation des symptômes douloureux aussi bien physiques que psychologiques [Linton et Shaw, 2011] (figure 14). Il a notamment été mis en évidence que les personnes ayant des antécédents psychiatriques, souffrant d'une humeur dépressive, confrontées à des difficultés majeures dans la vie ou signalant des niveaux de stress élevés courent un plus grand risque de transition vers une chronicisation de la lombalgie et de plus fortes difficultés fonctionnelles [Linton, 2000, Pincus *et al.*, 2002, Pinheiro *et al.*, 2015].

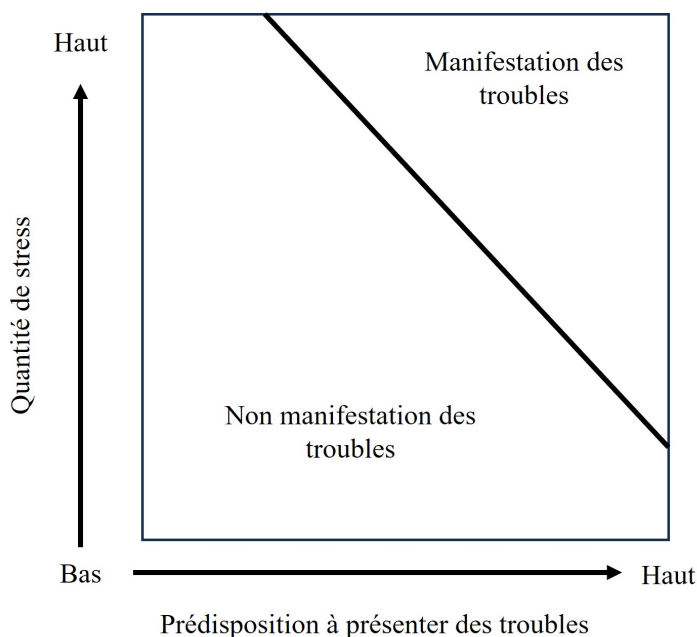


FIGURE 14 – Le modèle stress-diathèse d'après Zuckerman [Zuckerman, 1999].

En conclusion, la chronicisation de la douleur peut être expliquée par des facteurs psychologiques tels que les troubles dépressifs, anxieux, la catastrophisation et la peur du mouvement. Des modèles explicatifs des changements de comportements liés à la LCNS ont été proposés dans la littérature et mettent en avant l'implication de facteurs cognitifs et émotionnels. Ces modèles soulignent la complexité de la douleur chronique qui nécessite des recommandations sur la prise en charge de la LCNS, présentées dans le chapitre suivant.

PRISE EN CHARGE ET ÉVALUATION DE LA LOMBALGIE CHRONIQUE NON SPÉCIFIQUE

Les facteurs multidimensionnels qui accompagnent la LCNS rendent complexe sa prise en charge. Dans ce chapitre, nous présenterons dans une première section les recommandations sur la prise en charge de la LCNS en nous concentrant sur une récente revue narrative française comprenant les lignes directrices nationales et internationales publiées entre 2018 et 2021 [Nicol *et al.*, 2023]. Depuis plus d'une vingtaine d'années, les modèles de soins évoluent et se basent à l'heure actuelle sur le modèle biopsychosocial (BPS) que nous présenterons dans une seconde section. Enfin, nous discuterons des limites des outils d'évaluation utilisés pour mesurer l'efficacité des prises en charge et nous présenterons les critères d'évaluation et outils de mesure utilisés dans les études portant spécifiquement sur l'effet de la thérapie manuelle (TM) sur la douleur chez les patients présentant une LCNS.

2.1 Prise en charge de la lombalgie chronique non-spécifique

2.1.1 Recommandations portant sur la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique

De nombreuses options de prise en charge ont été décrites dans la littérature pour les patients atteints de LCNS [Innocenti *et al.*, 2023, Tagliaferri *et al.*, 2022, Nicol *et al.*, 2023]. Les recommandations préconisent des prises en charge dites conservatrices [Nicol *et al.*, 2023], c'est-à-dire visant à maintenir les fonctions physiologiques du patient sans intervention invasive [Tagliaferri *et al.*, 2022] et ont été répertoriées en deux catégories : pharmacologiques et non pharmacologiques. Les traitements pharmacologiques ne sont recommandés qu'en cas de gestion de poussées aiguës et comprennent en première intention les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), et en seconde intention les opioïdes, en association ou non avec l'acétaminophène, lorsque les AINS sont contre-indiqués, non

tolérés ou ont échoué [Nicol *et al.*, 2023]. Il n'existe pas à ce jour de consensus pour l'utilisation des antidépresseurs, des anticonvulsivants et des relaxants musculaires [Nicol *et al.*, 2023]. Les prises en charge non pharmacologiques portent sur la thérapie par l'exercice et l'activité physique adaptée, la physiothérapie, les prises en charge psychologiques, l'éducation à la douleur, les réhabilitations dites multidisciplinaires, l'acupuncture et les TM [Nicol *et al.*, 2023].

L'ensemble des directives internationales recommandent à ce jour l'activité physique [Nicol *et al.*, 2023] sans pour autant qu'il existe de consensus sur les modalités des exercices [Nicol *et al.*, 2023]. Ainsi, aucun type d'activité ne semble supérieur à un autre, mais certains sont plus régulièrement cités, tels que les exercices d'aérobic par exemple [Nicol *et al.*, 2023]. La physiothérapie (ou kinésithérapie) est indiquée comme le traitement de première intention pour les lombalgies chroniques ou pour les patients présentant des facteurs de risque de chronicité, cependant il n'existe là encore pas de consensus sur les types de techniques à utiliser préférentiellement [Nicol *et al.*, 2023]. L'ajout de la thérapie cognitivo-comportementale à la prise en charge en physiothérapie semble recommandé pour améliorer les niveaux de douleur, les résultats fonctionnels et le retour au travail [Nicol *et al.*, 2023]. De plus, un consensus apparaît pour définir l'éducation des patients à la douleur comme une intervention propre participant au maintien des niveaux d'activité quotidienne et d'activité physique, et facilitant le retour au travail [Nicol *et al.*, 2023]. Une réhabilitation multidisciplinaire est préconisée pour les patients lombalgiques chroniques rencontrant des obstacles psychologiques (catastrophisation, peur du mouvement, etc.) à la guérison, et lorsque la prise en charge en soins primaires n'apporte pas d'amélioration [Nicol *et al.*, 2023]. Les programmes de réhabilitation multidisciplinaire doivent inclure au moins une composante physique et au moins une autre composante psychologique, sociale et/ou professionnelle [Nicol *et al.*, 2023]. Ainsi, ces programmes sont basés sur l'exercice et l'activité pour promouvoir et faciliter le retour au travail ou aux activités normales de la vie quotidienne, et sur une approche psychosociale qui varie selon les pays (approches cognitives et comportementales, apprentissage de techniques d'adaptation à la douleur et de méthodes de réduction du stress basées sur la pleine conscience) [Nicol *et al.*, 2023]. L'acupuncture et les TM sont les prises en charge sur lesquelles la quasi-totalité des recommandations s'accordent, pour leur effet à court terme ou comme d'intéressants compléments à un programme de rééducation plus large [Nicol *et al.*, 2023]. Cependant, les preuves d'efficacité clinique de l'utilisation des TM seules dans la prise en charge sont contradictoires en comparaison avec une absence de traitement, des médicaments ou d'autres modalités [Nicol *et al.*, 2023].

En conclusion, les recommandations nationales et internationales présentent une orientation commune dans la prise en charge de la LCNS, s'appuyant sur l'activité physique

et la physiothérapie comme traitement de première intention pour les lombalgies chroniques ou pour les patients présentant des facteurs de risque de chronicité [Nicol *et al.*, 2023]. Cependant, il existe une forte hétérogénéité entre les protocoles de prise en charge proposés [Nicol *et al.*, 2023]. De plus, les auteurs mettent en avant que la prise en charge de la LCNS dépend du diagnostic de la lombalgie souvent différent selon les pays [Nicol *et al.*, 2023]. Les nouvelles lignes directrices françaises proposent par exemple de classer les patients selon les phases de la maladie : " *lombalgie à risque de chronicité* " et " *lombalgie récidivante* " [HAS, 2019]. Cette classification met en avant les facteurs contribuant à la fois aux causes et aux conséquences de la lombalgie incluant des indicateurs psychosociaux (drapeaux jaunes), des facteurs de pronostic liés aux représentations perçues du travail et de l'environnement (drapeaux bleus) et des facteurs de pronostic liés à la politique de l'entreprise, au système de soins et d'assurance (drapeaux noirs) [HAS, 2019]. C'est sous cet angle que nous allons décrire le modèle BPS qui peut ainsi s'appliquer pour améliorer la compréhension de la LCNS et sa prise en charge.

2.1.2 Modèle biopsychosocial et lombalgie chronique non spécifique

Le modèle BPS a été proposé par Engel en 1977 [Engel, 1977] pour élargir l'approche biomédicale. Celle-ci reposait sur une approche principalement structurelle de la douleur mise en évidence par une cause, où la prise en charge ciblait les tissus présumés lésés [Melzack et Wall, 1965]. Cependant, les recherches actuelles ont montré que cette approche n'avait qu'une efficacité limitée [Waddell, 1992], notamment pour la prise en charge des douleurs sans modifications patho-anatomiques, où d'autres facteurs (psychologiques, comportementaux, sociaux) jouaient un rôle important dans l'expérience douloureuse des patients [Engel, 1977, Mescouto *et al.*, 2022]. Les travaux de Waddell, en 1987, sont les premiers à préconiser le passage d'un modèle de soin biomédical à un modèle BPS dans la prise en charge de la lombalgie [Waddell, 1987]. Ce modèle est basé sur l'interaction entre les facteurs biologiques (nociception), psychologiques (croyances, détresse, dépression, anxiété et peur) et sociaux (problèmes financiers, familiaux et professionnels) qui sont associés à la guérison des patients et liés à la persistance de la douleur et du handicap [Pincus *et al.*, 2002, Foster *et al.*, 2018, Gatchel, 2015, Waddell, 1992]. Ainsi, l'utilisation de ce modèle remet en perspective les recommandations à appliquer dans la prise en charge des patients LCNS et tient compte du fait que certaines personnes développent une incapacité de longue durée et ne se rétablissent pas comme prévu [Waddell et Burton, 2005].

Depuis plus d'une vingtaine d'années, la prise en charge de la LCNS évolue et base son intervention sur le concept de réhabilitation [Nocon et Baldwin, 1998, Waddell et Burton,

2005]. La réhabilitation qualifie les processus qui visent à amener un patient à l'état de santé le plus proche possible de celui qui était le sien avant sa maladie et concerne les aspects aussi bien physiques que psychologiques [Nocon et Baldwin, 1998, Waddell et Burton, 2005]. C'est dans ce cadre qu'une récente revue systématique s'est intéressée à la mise en œuvre du modèle BPS dans des études en physiothérapie pour l'évaluation et la prise en charge des patients lombalgiques [Mescouto *et al.*, 2022]. Les résultats ont montré que les facteurs biologiques portaient majoritairement sur l'éducation à la neurophysiologie de la douleur, l'intensité et la localisation de la douleur, le handicap physique, la posture et l'amplitude des mouvements [Mescouto *et al.*, 2022]. Les facteurs psychologiques portaient principalement sur le comportement des patients, la cognition, les attitudes et les croyances, les facteurs de risques psychosociaux qui peuvent favoriser la chronicisation de la douleur, la santé mentale et l'humeur [Mescouto *et al.*, 2022]. Les facteurs sociaux portaient sur le travail, la famille, les relations sociales, le statut socio-économique, la situation de vie et l'environnement [Mescouto *et al.*, 2022]. Cependant, les auteurs ont montré que de nombreuses études confondaient le modèle BPS et le modèle biomédical, en particulier lorsqu'ils se concentraient sur les résultats biologiques ou sur la neurophysiologie de la douleur [Mescouto *et al.*, 2022]. En effet, même si le terme "modèle BPS" apparaissait fréquemment dans les articles, la plupart des études considéraient principalement un seul facteur et ne le mettaient pas en relation avec les autres facteurs mesurés [Mescouto *et al.*, 2022]. La majorité des études se sont intéressées aux aspects biologiques de la prise en charge de la lombalgie et peu d'études se sont concentrées sur les facteurs sociaux, ou sur d'autres dimensions importantes de la prise en charge, telles que la culture, la religion et le langage [Mescouto *et al.*, 2022]. Ces résultats sont retrouvés dans la littérature portant sur d'autres champs disciplinaires, comme la médecine par exemple, dans laquelle les recherches tendent à adopter une approche segmentée du modèle BPS, où certains aspects sont pris en compte plus fréquemment que d'autres [Stilwell et Harman, 2019, Davidson et Strauss, 1995]. Stilwell et Harman [Stilwell et Harman, 2019] ajoutent au débat que le modèle BPS lui-même est mal conceptualisé, suggérant que ce modèle aboutit trop facilement à une application réductionniste qui fragmente la douleur des patients en trois aspects : biologique, psychologique et social [Stilwell et Harman, 2019]. Cette simplification du modèle BPS peut, par exemple, conduire à une préférence systématique et non reconnue pour certains facteurs par rapport à d'autres [Daluiso-King et Hebron, 2022], perpétuant une prise en charge insuffisante de la lombalgie [Mescouto *et al.*, 2022].

En conclusion, le modèle BPS s'appuie sur un modèle théorique dans lequel les facteurs biologiques, psychologiques et sociaux participent simultanément au maintien de la santé ou au développement de la maladie, élargissant l'approche biomédicale, jugée réductionniste. Cependant, ce modèle est peu appliqué dans les publications concernant l'effet de la prise en charge des patients lombalgiques. De plus, certains auteurs suggèrent que ce

modèle aboutit trop facilement à une approche partielle de l'interaction entre les facteurs biologiques, psychologiques et sociaux impliqués dans la douleur. Quelles sont alors les recommandations actuelles sur les critères et les outils d'évaluation mesurant l'efficacité de la prise en charge de la LCNS ?

2.1.3 Paramètres et outils d'évaluation mesurant l'efficacité de la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique

Les différentes prises en charge proposées dans le cadre de la LCNS ont été analysées dans de nombreuses études cliniques et notamment des études contrôlées et randomisées (ECR), fournissant des estimations précises sur l'efficacité et/ou sur l'efficacité d'une intervention [Innocenti *et al.*, 2023]. Les ECR permettent de comparer les effets d'une intervention avec ceux d'une intervention contrôle afin d'en identifier les avantages et les inconvénients [Innocenti *et al.*, 2023]. Une des limites, rapportée dans la plupart des revues systématiques portant sur l'efficacité de la prise en charge des patients LCNS, est la forte hétérogénéité entre les facteurs de la douleur évalués et les outils de mesure utilisés [Innocenti *et al.*, 2023]. Pour pallier ce biais, une équipe regroupant différents acteurs (patients, thérapeutes, chercheurs) internationaux a mené une première étude en 1998, réactualisée en 2015, en utilisant la méthode DELPHI [Spranger *et al.*, 2022] pour proposer un ensemble de critères d'évaluation standardisés à utiliser dans chaque étude portant sur l'efficacité de la prise en charge des patients LCNS [Deyo *et al.*, 1998, Chiarotto *et al.*, 2015]. Les recommandations portaient sur quatre domaines de résultats spécifiques : le fonctionnement physique, l'intensité de la douleur, la qualité de vie liée à la santé (HR-QOL) et le nombre de décès. En 2018, un second groupe de travail a poursuivi ces travaux en proposant, pour chaque domaine de résultats, des outils de mesure standardisés [Chiarotto *et al.*, 2018a]. L'indice d'invalidité d'Oswestry (ODI) version 2.1a et le questionnaire sur le handicap de Roland-Morris (RMDQ) en 24 items ont été retenus pour évaluer le fonctionnement physique [Chiarotto *et al.*, 2018a]. L'Échelle d'Évaluation Numérique (EEN) a été sélectionnée pour évaluer l'intensité douloureuse [Chiarotto *et al.*, 2018a]. Le questionnaire de santé abrégé 12 (SF-12) et le questionnaire en dix items PROMIS-GH-10 (Patient-Reported Outcomes Measurement Information System) ont quant à eux été préconisés pour évaluer l'HRQOL [Chiarotto *et al.*, 2018a]. Une déclaration sur le nombre de décès survenus au cours de l'essai a été retenue pour comptabiliser les décès [Chiarotto *et al.*, 2018a].

Une récente étude méta-épidémiologique sur 240 ECR a répertorié l'utilisation de ces recommandations dans les études portant sur la LCNS [Innocenti *et al.*, 2023]. Les principaux résultats ont montré que seuls 20,8 % des ECR mesuraient tous les paramètres, et que cette proportion n'augmentait pas au fil du temps [Innocenti *et al.*, 2023]. Alors

que l'intensité de la douleur et le fonctionnement physique ont été fortement évalués (respectivement 90 % et 60 %), l'HRQOL a été moins fréquemment examinée (25 %) [Innocenti *et al.*, 2023]. Ces résultats sont en partie expliqués par le fait que l'HRQOL présente des recoupements avec d'autres outils de mesure comme les items portant sur l'état psychologique (anxiété, dépression) ou le fonctionnement physique [Innocenti *et al.*, 2023]. De plus, il existe encore une grande hétérogénéité dans les instruments de mesure employés [Innocenti *et al.*, 2023] : seules 50 % des études ont utilisé l'ODI ou le RMDQ pour le fonctionnement physique [Innocenti *et al.*, 2023], et moins de 30 % et 15 % des ECR ont eu recours respectivement à l'EEN pour l'intensité de la douleur et au SF-12 ou au PROMIS-GH-10 pour l'HRQOL [Innocenti *et al.*, 2023].

C'est dans ce cadre que l'un des travaux que nous avons menés au cours de cette thèse a été de répertorier les domaines d'évaluations et les outils de mesure utilisés dans les ECR pour évaluer l'effet des TM sur la douleur chez les adultes LCNS. En effet, cette revue systématique avait pour objectif de poursuivre les travaux précédemment cités qui montrent l'intérêt de mieux évaluer les patients pour améliorer la prise en charge clinique. Cette revue systématique s'appuie également sur le manque de preuves liées au "mécanisme réel" des TM qui pourrait selon des éditoriaux récents être approfondi grâce à l'évaluation de la prise en charge à travers les modèles BPS et/ou enactif [Caneiro *et al.*, 2020, Esteves *et al.*, 2020]. Il nous semblait alors intéressant de comparer les domaines et outils de mesure utilisés pour évaluer les ECR en TM avec les résultats retrouvés dans d'autres modalités de prise en charge, afin de proposer de nouvelles pistes de réflexion autour de la méthodologie utilisée pour évaluer l'efficacité des TM. Ainsi, dans la section suivante, nous présenterons la revue systématique qui a découlé de ce travail.

2.2 Revue systématique : Domaines d'évaluation et outils de mesure utilisés pour évaluer la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique en thérapie manuelle

2.2.1 Approches et objectifs

Les TM sont considérées comme des pratiques manuelles impliquant la mobilisation et la manipulation du corps [Bronfort *et al.*, 2008]. Ces techniques de mobilisation sont décrites comme des "*techniques de mouvement passif de faible vitesse, de petite ou de grande amplitude, dans les limites de l'amplitude de mouvement et du contrôle du patient*", tandis que les techniques de manipulation sont définies comme utilisant *une force appliquée perpendiculairement aux surfaces articulaires* [Evans et Lucas, 2023]. Leurs mécanismes d'action sont nombreux [Bronfort *et al.*, 2008] et font encore l'objet de nombreux débats [Rubinstein *et al.*, 2011]. Deux modèles sont discutés pour expliquer les mécanismes des TM : un processus biomécanique lié à une diminution des contraintes internes [Franke *et al.*, 2014] et un processus neurophysiologique impliqué dans un changement de régulation de la douleur [Pelletier *et al.*, 2018].

La plupart des revues systématiques visant à étudier les TM dans la prise en charge de la LCNS se sont concentrées principalement sur leur efficacité (atténuation de la douleur, amélioration de la fonction) [Bagagiolo *et al.*, 2022, Clar *et al.*, 2014, Dal Farra *et al.*, 2021, Rubinstein *et al.*, 2019]. Il existe une forte hétérogénéité entre les études sur les domaines et outils d'évaluation utilisés [Bagagiolo *et al.*, 2022, Clar *et al.*, 2014]. L'un des principaux défis serait d'établir, d'après les recommandations actuelles [Innocenti *et al.*, 2023], les domaines d'évaluation et les outils de mesure de base à employer dans toutes les études cliniques évaluant l'efficacité des TM comme prise en charge. Ainsi, l'objectif de cette étude a été de recenser l'ensemble des critères d'évaluation et des outils de mesure utilisés dans la prise en charge de la lombalgie par les TM, puis de discuter ces résultats au regard des recommandations actuelles.

2.2.2 Méthodologie

2.2.2.1 Protocole et enregistrement

Cette revue systématique a été réalisée conformément aux directives PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) [Page *et al.*, 2021] et a été enregistrée sur PROSPERO (*International Prospective Register of Systematic Reviews* - ID d'enregistrement : CRD42021268722). La question de recherche a été formulée

à l'aide de l'approche PICO (*Population, Intervention, Comparator and Outcomes*) [Miller et Forrest, 2001] : Quels sont les critères d'évaluation et les outils de mesure utilisés dans les ECR pour évaluer les effets de la thérapie manuelle sur la douleur chez les adultes souffrant de LCNS ?

2.2.2.2 Critères d'éligibilité

Les études ont été incluses selon les critères d'inclusion suivants : (1) les participants devaient présenter une lombalgie chronique non-spécifique et être âgés entre 18 et 65 ans, (2) l'effet de l'intervention devait porter sur les TM suivantes : ostéopathie, physiothérapie, chiropractie (3) l'intervention devait être comparée à une intervention contrôle (IF) et les participants être randomisés entre les groupes, (4) les études devaient faire état d'au moins une mesure de résultat liée à la douleur, (5) les études devaient avoir obtenu l'approbation par un comité d'éthique et avoir été publiées en texte intégral dans une revue à comité de lecture, (6) les études devaient être publiées en anglais ou en français. Les études ne répondant pas à l'un des critères suivants ont été exclues : (1) les participants ne devaient pas présenter une lombalgie aiguë ou subaiguë et/ou d'origine spécifique ou neuropathique, ni être âgés de moins de 18 ans ou de plus de 65 ans, (2) l'intervention du groupe expérimental ne devait pas porter sur d'autres thérapies que celles citées dans les critères d'inclusion, (3) les études sans groupe contrôle et non randomisées ou quasi randomisées, (4) des résultats ne se rapportant pas à l'une des composantes de la douleur (sensori-discriminative, émotionnelle, cognitive et comportementale). Cette revue a évalué de manière systématique les études publiées à partir de 2010.

2.2.2.3 Sources d'information

La recherche a été effectuée entre mai 2021 et avril 2023, en utilisant les bases de données Cochrane Library, Ebscohost, EMBASE, MEDLINE Pubmed, PEDro, ScienceDirect et Scopus. L'année 2010 a été utilisée comme seuil, car la dernière revue systématique chez les patients LCNS visant à identifier, décrire et examiner les outils de mesure pour évaluer les effets de la prise en charge des TM a été publiée cette année-là [Chapman *et al.*, 2011]

2.2.2.4 Stratégie de recherche

La stratégie de recherche s'est articulée autour des mots clés suivants en accord avec le cadre PICO (la population cible, les interventions, les conditions de contrôle, les résultats et la méthodologie de l'étude) : low back pain AND chronic OR persistent AND Manual Therapy AND placebo control OR sham control AND controlled clinical trials. Boundary : 2010-present.

2.2.2.5 Processus de sélection

La vérification de l'éligibilité a été effectuée par trois évaluateurs indépendants. Tout désaccord a été réglé par tous les évaluateurs. La sélection a été effectuée d'abord à l'aide du titre et du résumé des études (1/ téléchargement sur Rayyan, 2/ doublons supprimés et 3/ sélection du titre et du résumé), suivie de l'examen complet du texte des articles restants.

2.2.2.6 Processus de collection des données et éléments des données

L'extraction des données a également nécessité deux évaluateurs indépendants et les divergences ont été résolues par la discussion ou par un troisième évaluateur indépendant. Tous les articles sélectionnés ont été importés dans une feuille de calcul Excel (Microsoft) spécialement conçue à cet effet, contenant les informations bibliographiques (titre, auteurs, date de publication et journal), les caractéristiques des participants en fonction du groupe contrôle ou interventionnel (nombre de participants, âge et ratio femmes/hommes), la description de l'intervention du groupe contrôle et de la thérapie manuelle, les critères d'évaluations, les outils de mesures utilisés dans chaque étude et le risque de biais.

Les critères d'évaluation et les outils de mesure ont été classés en quatre niveaux selon les recommandations définies par Chiarotto et al. [Chiarotto *et al.*, 2015] pour les études cliniques portant sur l'évaluation de la LCNS : catégories principales, domaines, critères d'évaluation, outils de mesure. Les catégories principales sont au nombre de quatre et sont : le *nombre de décès* (raison spécifique à la maladie ou à l'intervention), *l'impact sur la vie* (incluant les domaines de l'ICF [Organization, 2001] et les domaines relevant du concept de qualité de vie liée à la santé), *l'utilisation des ressources et l'impact économique* (décrivant l'impact économique des problèmes de santé à la fois sur la société et sur l'individu) et les *manifestations physiopathologiques* (manifestations réversibles, irréversibles et les biomarqueurs) [Organization, 2001]. Dans chacune des catégories principales ont été répertoriés les domaines définis par Chiarotto et al. [Chiarotto *et al.*, 2015], en fonction des critères d'évaluation retrouvés dans chaque étude. Pour finir, les outils de mesure ont été répertoriés dans chaque critère d'évaluation.

2.2.2.7 Évaluation du risque de biais de l'étude

L'échelle PEDro [Brosseau *et al.*, 2015] a été utilisée pour évaluer la qualité méthodologique. L'échelle PEDro comprend 11 éléments méthodologiques spécifiques aux études randomisées contrôlées : 1) la spécification des critères d'éligibilité ; 2) l'assignation aléatoire ; 3) la distribution secrète ; 4) la comparabilité de base ; l'intervention à l'insu 5) des participants ; 6) des thérapeutes et 7) des évaluateurs ; 8) la présence de mesures pour au moins 85% des participants à la fin de l'étude ; 9) l'analyse des données de tous les par-

ticipants inscrits au début de l'étude ; 10) les comparaisons statistiques entre les groupes et 11) les moyennes et les mesures de variation. Chaque élément est noté comme oui ou non et vaut respectivement 1 et 0 point [Brosseau *et al.*, 2015]. Le score total de l'échelle PEDro correspond au nombre de réponses oui pour les items 2 à 11, soit un score total exprimé sur 10 points [Brosseau *et al.*, 2015]. L'échelle PEDro est particulièrement utile pour la recherche en réhabilitation [Moseley *et al.*, 2015]. En effet, l'échelle PEDro est moins pénalisante pour les ECR portant sur l'efficacité des interventions physiques, qui ne peuvent être réalisées en triple aveugle [Moseley *et al.*, 2015]. L'échelle PEDro intègre donc trois de ses éléments constitutifs en évaluant séparément si le sujet, le thérapeute et l'évaluateur ne sont pas au courant de l'intervention reçue (items 5 à 7) [Brosseau *et al.*, 2015].

2.2.2.8 Méthodes de synthèse

Les résultats de cette revue systématique ont été résumés sous une forme narrative. La stratégie de recherche est présentée sur la figure 15. Les caractéristiques des études portant sur la population, le groupe interventionnel et le groupe contrôle, et l'évaluation de risque de biais sont présentées sous forme de tableaux (respectivement 1 et 2). Les caractéristiques des études portant sur les pays et l'année de publication sont représentées sous forme de figures (respectivement 16.a. et b.). La synthèse des résultats de la revue systématique portant sur les catégories principales et les domaines mesurés a été représentée dans deux graphiques : le nombre d'outils de mesure sur l'ensemble des études incluses (figure 17) et le nombre d'outils de mesure uniquement sur les études de bonne à excellente qualité méthodologique (figure 20).

2.2.3 Résultats

2.2.3.1 Sélection des études

La stratégie de recherche (figure 15) a permis d'identifier 323 études dans Cochrane Library, 837 dans Ebscohost, 140 dans EMBASE, 845 dans MEDLINE Pubmed, 427 dans PEDro, 535 dans ScienceDirect et 418 dans Scopus, soit 2445 études sans doublons. Selon les critères d'éligibilité, 32 études ont été incluses (2390 études ont été exclues après l'examen des titres et des résumés, et 71 après l'examen du texte intégral).

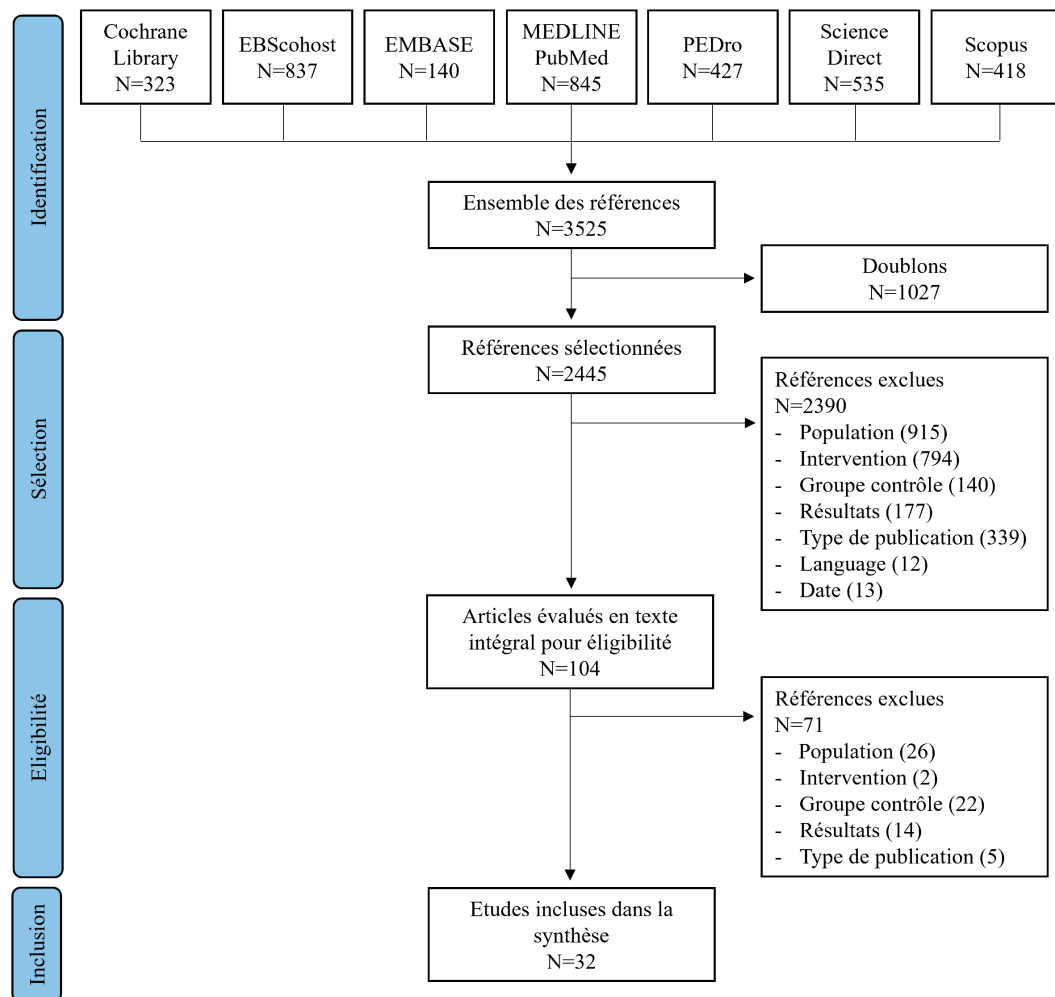


FIGURE 15 – Éléments de l'examen systématique sous forme de diagramme de flux montrant le processus d'identification, de sélection, d'éligibilité et d'inclusion.

2.2.3.2 Caractéristiques des études

2.2.3.2.1 Année de publication

L'étude la plus ancienne incluse dans cette revue a été publiée en 2010, qui est la date seuil fixée dans la méthode. Depuis 2016, on observe une tendance à la hausse du nombre de publications. Le nombre d'études par année est indiqué sur la figure 16.a.

2.2.3.2.2 Pays d'origine

Les publications incluses proviennent de 12 pays différents (les États-Unis d'Amérique, la Turquie, l'Espagne, le Brésil, l'Égypte, l'Inde, l'Italie, l'Arabie saoudite, la Chine, la Suisse, l'Iran et le Nigeria). Tous les continents sont représentés dans cette distribution, sauf l'Océanie. Les pays les plus représentés sont les États-Unis d'Amérique ($n = 7$), la Turquie ($n = 5$) et l'Espagne ($n = 4$). La répartition géographique complète des études incluses est présentée sur la figure 16.b.

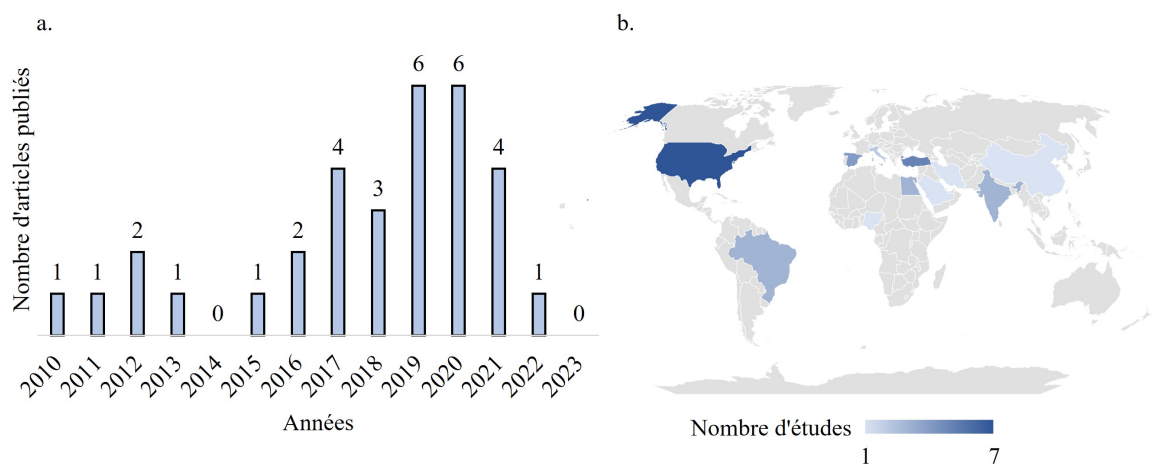


FIGURE 16 – Nombre d'études publiées par années (a.) et Nombre d'études publiées par pays (b.) entre 2010 et 2023.

2.2.3.2.3 Population

Les caractéristiques de la population sont décrites dans le tableau 1. Au total, 2 854 participants ont été recrutés dans les études incluses, avec une moyenne de 89,2 ($\pm 100,2$) et une médiane de 57,5 (24-455) participants par essai. Dans quatorze études, les participants ont été appariés par âge et par sexe [Ahmed *et al.*, 2021, Boff *et al.*, 2020, Castro-Sanchez *et al.*, 2016, Celenay *et al.*, 2019, Didehdar *et al.*, 2020, Fagundes Loss *et al.*, 2020, Grande-Alonso *et al.*, 2019, Hussien *et al.*, 2017, Licciardone *et al.*, 2013, Licciardone *et al.*, 2016, Nambi *et al.*, 2018, Tamer *et al.*, 2017, Zafereo *et al.*, 2018, Zangrando *et al.*, 2017]. Dans huit études, les participants ont été appariés par âge, mais pas par sexe [Bicalho *et al.*, 2010, Branchini *et al.*, 2015, Endamli *et al.*, 2019, Hussein *et al.*, 2021, Joshi

et al., 2021, Divya *et al.*, 2020, Sarker *et al.*, 2019, Senna et Machaly, 2011]. Neuf études ne précisent pas si les groupes ont été appariés par âge et par sexe [Arguisuelas *et al.*, 2017, Arguisuelas Martínez *et al.*, 2019, Auger *et al.*, 2021, Balthazard *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2012, Martí-Salvador *et al.*, 2018, Thomas *et al.*, 2020, Wang *et al.*, 2019, Yağcı *et al.*, 2020]. Une étude n'a pas fait état de l'appariement des sexes [Saracoglu *et al.*, 2022].

2.2.3.2.4 Interventions pour les groupes expérimentaux

Les interventions sont répertoriées pour chaque étude dans le tableau 1.

Dix-sept études ont évalué la mobilisation seule avec douze techniques différentes : libération fasciale [Branchini *et al.*, 2015, Endamli *et al.*, 2019], libération myofasciale [Arguisuelas *et al.*, 2017, Arguisuelas Martínez *et al.*, 2019, Boff *et al.*, 2020, Auger *et al.*, 2021], thérapie craniosacrale [Castro-Sanchez *et al.*, 2016], intervention sur le diaphragme [Martí-Salvador *et al.*, 2018], glissement apophysaire naturel soutenu au niveau lombaire [Hussien *et al.*, 2017, Hussein *et al.*, 2021], énergie musculaire [Ahmed *et al.*, 2021], mobilisation thoracique [Divya *et al.*, 2020], mobilisation des tissus mous [Yağcı *et al.*, 2020], technique d'inhibition du muscle sous-occipital [Joshi *et al.*, 2021], techniques de mobilisation des articulations [Saracoglu *et al.*, 2022], nouveau programme de massage rééducatif [Zan-grando *et al.*, 2017] et thérapie physique manuelle orthopédique [Grande-Alonso *et al.*, 2019].

Huit études ont évalué la manipulation et la mobilisation de la colonne vertébrale [Licciardone *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2013, Licciardone *et al.*, 2016, Tamer *et al.*, 2017, Balthazard *et al.*, 2012, Zafereo *et al.*, 2018, Celenay *et al.*, 2019, Thomas *et al.*, 2020] : toutes les études ont utilisé une technique de poussée à haute vitesse et faible amplitude pour la manipulation. Les techniques de mobilisation comprenaient l'étirement, le pétrissage et la pression des tissus mous, l'étirement et le relâchement myofascial, le traitement positionnel des points sensibles myofasciaux et l'activation musculaire isométrique du patient contre une force opposée égale et inflexible du thérapeute, des exercices de contrôle moteur, une thérapie manuelle locale et régionale, des mouvements courts et des rotations isométriques.

Sept études ont évalué la manipulation vertébrale seule : six d'entre elles utilisant une technique de poussée à haute vitesse et faible amplitude [Bicalho *et al.*, 2010, Senna et Machaly, 2011, Nambi *et al.*, 2018, Sarker *et al.*, 2019, Didehdar *et al.*, 2020, Fagundes Loss *et al.*, 2020] et une utilisant la traction oblique lombaire [Wang *et al.*, 2019].

Référence de l'étude	Nombre de participants (n)	Groupe Contrôle (GC)	Groupe Interventionnel (GI)	Âge mean ± std ou med(iqr)		Femme %	
				GC	GI	GC	GI
[Bicalho <i>et al.</i> , 2010]	40	SI	Manipulation vertébrale	26,5 ± 8,27	29,5 ± 9,64	60	75
[Senna et Machaly, 2011]	60	IF	1) Manipulation vertébrale maintenue 2) Manipulation vertébrale non maintenue	42 ± 10	1) 41,6 ± 11 2) 40,2 ± 12	24,3	1) 24 2) 27
[Balthazard <i>et al.</i> , 2012]	37	IF + AP	Manipulation + AP	42,0 ± 12,0	44,0 ± 12,0	30	36
[Licciardone <i>et al.</i> , 2012]	70	IF	MO	38 (20)	38 (27)	50	63
[Licciardone <i>et al.</i> , 2013]	455	IF	MO	40 (29-50)	41 (29-51)	62	63
[Branchini <i>et al.</i> , 2015]	24	PT	PT+ Manipulation	44 (8.2)	48 (12)	69.2	63.6
[Castro-Sanchez <i>et al.</i> , 2016]	64	IF	Thérapie cranio-sacré	53± 9	50± 11	59,4	71,8
[Licciardone <i>et al.</i> , 2016]	345	IF	MO	41 (29-51)	43 (31-53)	67	64
[Arguisuelas <i>et al.</i> , 2017]	54	IF	Libération myofasciale	46.4 (11.4)	46.6 (10.3)	62.9	40.7
[Hussien <i>et al.</i> , 2017]	42	AP	AP + SNAG	28.9 ± 7.7	27.1 ± 8.3	31.6	13
[Tamer <i>et al.</i> , 2017]	39	MO	MO viscérale	36 (29-47)	42 (34.2-51.5)	47.4	60
[Zangrando <i>et al.</i> , 2017]	51	M	Nouvelle technique de massage	50.54±9.13	50.77±6.80	58.33	55.56
[Martí-Salvador <i>et al.</i> , 2018]	66	MO	MO + manipulation du diaphragme	41.7 ± 10.3	43.4 ± 10.8	60.6	51.5
[Nambi <i>et al.</i> , 2018]	330	IF	1) MV - Thérapie au laser - IF 2) MV - Thérapie au laser	21-60	1) 21-60 2) 21-60	60.9	1) 62.7 2) 58.2
[Zafereo <i>et al.</i> , 2018]	40	PT	PT+ Mobilisation	38.2 (13.1)	46.7 (14.1)	50	75
[Arguisuelas Martínez <i>et al.</i> , 2019]	36	IF	Libération myofasciale	48.6 (10.1)	47.2 (9.8)	66.7	66.7
[Celenay <i>et al.</i> , 2019]	66	PT	1)PT + Mobilisation 2)PT + MV	55 (24 -65)	1) 53 (40-65) 2) 48 (39-63)	71.4	1) 90.5 2) 81
[Endamli <i>et al.</i> , 2019]	55	PT	PT + Manipulation	37.93 ± 10.87	37.14 ± 11.56	-	-
[Grande-Alonso <i>et al.</i> , 2019]	50	PT	PT + Thérapie manuelle orthopédique	38.29 (13.10)	39.88 (13.20)	56	56
[Sarker <i>et al.</i> , 2019]	90	AP	1) AP+ MV 2) AP	24.20±6.78	1) 25.10±7.75 2) 24.93±8.46	-	-
[Wang <i>et al.</i> , 2019]	60	AP	AP+ Manipulation	32.01 ± 4.59	30.45 ± 5.55	43.3	36.7
[Boff <i>et al.</i> , 2020]	72	MV	MV + Libération myofasciale	38.7 (6.8)	38.1 (7.0)	17	19
[Didehdar <i>et al.</i> , 2020]	25	IF	MV	37.2 ± 7.01	36 ± 8.61	46,7	40
[Fagundes Loss <i>et al.</i> , 2020]	24	IF	MV	43.9 ± 9.6	41.7 ± 12.8	50	50
[Thomas <i>et al.</i> , 2020]	162	IF	Au niveau dorsal : 1) Manipulation 2) Mobilisation	24.4 (5.9)	1) 26.8 (7.2) 2) 24.3 (5.3)	58	1) 59 2) 58
[Yağcı <i>et al.</i> , 2020]	112	PT	Mobilisation	53.47 ± 11.45	49.98 ± 9.77	28.1	56
[Auger <i>et al.</i> , 2021]	40	IF	1) MO 2) BREMER 3) MO + BREMER	25.3 ± 1.6	1) 25.9 ± 2.5 2) 24.6±1.6 3) 24.8±1.8	60	1) 40 2) 50 3) 60
[Divya <i>et al.</i> , 2020]	30	AP	Mobilisation + AP	40.33 ± 8.6	38.53 ± 7.8	-	-
[Joshi <i>et al.</i> , 2021]	45	AP	1) Inhibition musculaire + Mobilisation + AP 2) Mobilisation + AP	38.20 ± 7.27	1) 34.93 ± 9.43 2) 42.47 ± 10.15	-	-
[Hussein <i>et al.</i> , 2021]	64	IF	SNAG	22.00 ± 1.4	22.00 ± 1.46	-	-
[Ahmed <i>et al.</i> , 2021]	137	PT	1) Mobilisation + AP 2) AP	41.22 ± 8.4	1) 38.76 ± 9.87 2) 39.21 ± 8.62	28.9	1) 43.9 2) 35.9
[Saracoglu <i>et al.</i> , 2022]	69	AP	1) Mobilisation + AP 2) Education à la douleur + Manipulation + AP	40.25 ± 9.70	1) 41.38 ± 12.70 2) 39.67 ± 13.71	55	1) 53 2) 60

IF : Intervention fictive; PT : Physiothérapie; MO : Manipulation ostéopatique; AP : Activité physique; M : Massage; MV : Manipulation vertébrale.

TABLEAU 1 – Caractéristiques des études incluses.

2.2.3.2.5 Interventions des groupes contrôlés

Trois types de groupes contrôle ont été répertoriés, selon les recommandations d'Alessandro et al. [D'Alessandro *et al.*, 2022] : sans intervention, intervention fictive ou placebo, et interventions manuelles ou autres.

Vingt-et-une études ont utilisé des interventions telles que de la thérapie manuelle [Boff *et al.*, 2020, Castro-Sanchez *et al.*, 2016, Zangrando *et al.*, 2017, Tamer *et al.*, 2017], de l'activité physique [Nambi *et al.*, 2018, Sarker *et al.*, 2019, Wang *et al.*, 2019, Joshi *et al.*, 2021, Balthazard *et al.*, 2012, Saracoglu *et al.*, 2022], de la thérapie au laser [Nambi *et al.*, 2018, Thomas *et al.*, 2020], de la thérapie aux ultra-sons [Balthazard *et al.*, 2012] et des protocoles de physiothérapies conventionnelles [Hussien *et al.*, 2017, Zafereo *et al.*, 2018, Celenay *et al.*, 2019, Endamli *et al.*, 2019, Grande-Alonso *et al.*, 2019, Yağcı *et al.*, 2020, Ahmed *et al.*, 2021].

Neuf études ont simulé le groupe d'intervention (thérapie fictive ou placebo), en plaçant uniquement les mains dans les mêmes zones que l'intervention expérimentale [Senna et Machaly, 2011, Fagundes Loss *et al.*, 2020, Arguisuelas Martínez *et al.*, 2019, Auger *et al.*, 2021, Martí-Salvador *et al.*, 2018, Hussein *et al.*, 2021, Licciardone *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2013, Licciardone *et al.*, 2016].

Deux études n'ont pas utilisé d'interventions : les participants sont placés dans la même position que le groupe expérimental (par exemple, allongés sur le dos) mais aucune intervention supplémentaire n'est administrée [Bicalho *et al.*, 2010, Didehdar *et al.*, 2020].

2.2.4 Risque de biais des études

L'évaluation des études incluses à l'aide de l'échelle PEDro est présentée dans le tableau 2. Trois études étaient d'excellente qualité méthodologique [Licciardone *et al.*, 2013, Arguisuelas *et al.*, 2017, Martí-Salvador *et al.*, 2018]. La majorité des études (18 études) étaient de bonne qualité méthodologique [Senna et Machaly, 2011, Balthazard *et al.*, 2012, Castro-Sanchez *et al.*, 2016, Licciardone *et al.*, 2016, Zangrando *et al.*, 2017, Nambi *et al.*, 2018, Zafereo *et al.*, 2018, Arguisuelas Martínez *et al.*, 2019, Grande-Alonso *et al.*, 2019, Sarker *et al.*, 2019, Boff *et al.*, 2020, Didehdar *et al.*, 2020, Fagundes Loss *et al.*, 2020, Thomas *et al.*, 2020, Auger *et al.*, 2021, Hussein *et al.*, 2021, Ahmed *et al.*, 2021, Saracoglu *et al.*, 2022]. Neuf études étaient de qualité méthodologique moyenne [Bicalho *et al.*, 2010, Licciardone *et al.*, 2012, Branchini *et al.*, 2015, Hussien *et al.*, 2017, Tamer *et al.*, 2017, Celenay *et al.*, 2019, Endamli *et al.*, 2019, Yağcı *et al.*, 2020, Joshi *et al.*, 2021]. Pour ces études, les critères manquants d'évaluation de la qualité étaient les suivants : allocation dissimulée, participants, thérapeutes et évaluateurs en aveugle, suivi adéquat et

analyse en intention de traiter. Deux études étaient de faible qualité méthodologique [Divya *et al.*, 2020, Wang *et al.*, 2019].

Référence des études	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
[Licciardone <i>et al.</i> , 2013]		1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
[Arguisuelas <i>et al.</i> , 2017]	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
[Martí-Salvador <i>et al.</i> , 2018]	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
[Senna et Machaly, 2011]	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	8
[Licciardone <i>et al.</i> , 2016]	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8
[Didehdar <i>et al.</i> , 2020]	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	8
[Fagundes Loss <i>et al.</i> , 2020]	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8
[Hussein <i>et al.</i> , 2021]	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	8
[Ahmed <i>et al.</i> , 2021]	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	8
[Castro-Sanchez <i>et al.</i> , 2016]	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	7
[Nambi <i>et al.</i> , 2018]	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	7
[Zafereo <i>et al.</i> , 2018]	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	7
[Sarker <i>et al.</i> , 2019]	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	7
[Boff <i>et al.</i> , 2020]	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	7
[Thomas <i>et al.</i> , 2020]	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	7
[Saracoglu <i>et al.</i> , 2022]	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	7
[Balthazard <i>et al.</i> , 2012]	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	6
[Zangrando <i>et al.</i> , 2017]	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	6
[Arguisuelas Martínez <i>et al.</i> , 2019]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
[Grande-Alonso <i>et al.</i> , 2019]	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
[Auger <i>et al.</i> , 2021]	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	6
[Bicalho <i>et al.</i> , 2010]	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5
[Tamer <i>et al.</i> , 2017]	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	5
[Yağcı <i>et al.</i> , 2020]	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5
[Joshi <i>et al.</i> , 2021]	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	5
[Licciardone <i>et al.</i> , 2012]	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
[Branchini <i>et al.</i> , 2015]	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	4
[Hussien <i>et al.</i> , 2017]	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
[Celenay <i>et al.</i> , 2019]	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	4
[Endamlı <i>et al.</i> , 2019]	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	4
[Wang <i>et al.</i> , 2019]	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3
[Divya <i>et al.</i> , 2020]	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	3

TABLEAU 2 – Évaluation du risque de biais pour chaque étude.

2.2.5 Synthèse des résultats

2.2.5.1 Critères d'évaluation et outils de mesure sur l'ensemble des études

Au total, 144 outils de mesure ont été répertoriés et sont présentés sur la figure 17. Trois catégories principales ont été retenues : *l'impact sur la vie*, les *manifestations physiopathologiques* et *l'utilisation des ressources et impact économique*.

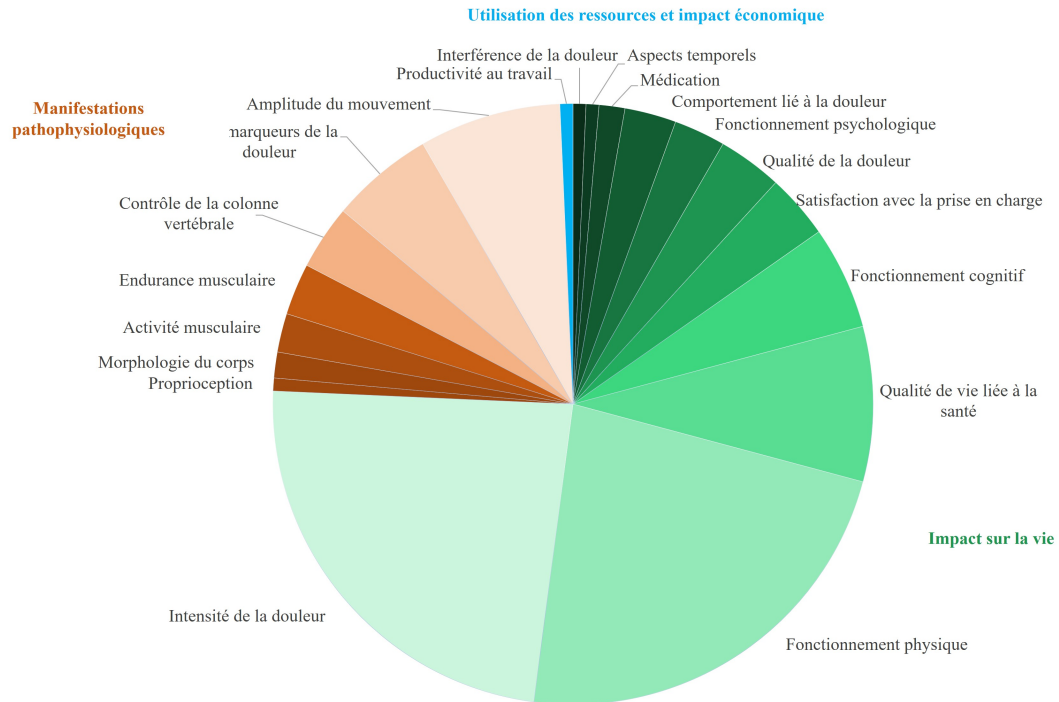


FIGURE 17 – Représentation graphique du nombre d’outils de mesure répertoriés par catégories principales et domaines pour l’ensemble des études incluses.

109 outils de mesure ont été répertoriés dans la catégorie principale, *impact sur la vie*, et classés dans onze domaines : *intensité de la douleur*, *fonctionnement physique*, *qualité de vie liée à la santé*, *fonctionnement cognitif*, *satisfaction à l’égard des services de soin*, *qualité de la douleur*, *fonctionnement psychologique*, *comportement face à la douleur*, *médication*, *aspect temporel de la douleur* et *interférence de la douleur*. Les deux domaines, dans lesquels le plus d’outils de mesure ont été retrouvés, sont l’*intensité de la douleur* (35 outils de mesure), mesurée principalement par des échelles auto-administrées (EVA ou EEN), et les *difficultés fonctionnelles* (34 outils de mesure), mesurées uniquement par des questionnaires auto-administrés (ODI, RMDQ, QBP, WDI, MAIA). Les outils de mesures sont répertoriés sur la figure 18.

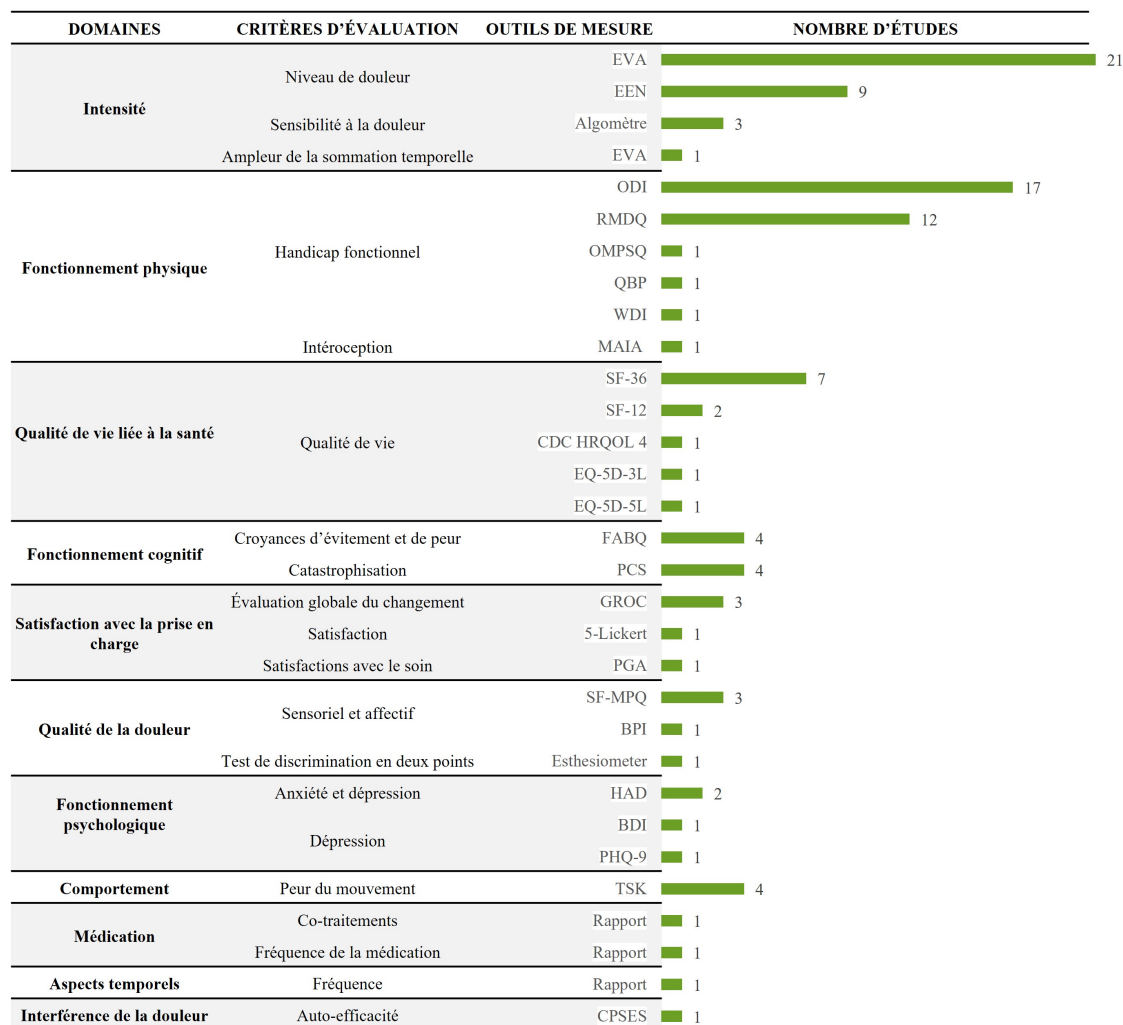


FIGURE 18 – Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés dans la catégorie principale "Impact sur la vie", par domaines et par critères d'évaluation.

34 outils de mesure ont été mis en place dans la catégorie principale, *manifestations physiopathologiques* et classés dans sept domaines : *amplitude des mouvements*, *biomarqueurs de la douleur*, *contrôle de la colonne vertébrale*, *endurance musculaire*, *activité musculaire*, *structure corporelle* et *proprioception*. Les deux domaines dans lesquels on trouve le plus d'outils de mesure sont ceux de l'*amplitude de mouvement* (11 outils de mesure), évaluée par des mouvements de flexion/ extension du tronc (test de la distance doigt-sol, test de Schober et ses versions modifiées) et mesurée principalement par un mètre, et des *biomarqueurs de la douleur* (8 outils de mesure), évalués par un échantillon de sang et mesurés par un scanner électro-interstitiel. Les outils de mesures sont répertoriés sur la figure 19.

Dans la catégorie principale *utilisation des ressources et impact économique*, un seul domaine a été identifié : *productivité au travail*.

2.2. Revue systématique : Domaines d'évaluation et outils de mesure utilisés pour évaluer la prise en charge de la lombalgie chronique non spécifique en thérapie manuelle

DOMAINES	CRITÈRES D'ÉVALUATION	OUTILS DE MESURE	NOMBRE D'ÉTUDES	
Amplitude du mouvement	Flexion lombaires	Test Schober modifié-modifié	3	
		Test doigt-sol	2	
	Flexion-Extension-Inclinaison latérale lombaires	Test Schober modifié	1	
		Analyse du mouvement	1	
		Back Performance Scale	1	
		Inclinaison latérale lombaires	Mètre	1
		Flexion-Extension lombaires	Test Assis-Debout	1
Angle d'inclinaison	Inclinomètre	1		
Biomarqueurs de la douleur	Tension artérielle systolique	Scanner electro-interstitiel	1	
	Mesure des métabolites cérébraux	Niveaux NAA, Cho, Cr	1	
	Mesures hémodynamiques	Scanner electro-interstitiel	1	
	Variabilité de la fréquence cardiaque	Photoplethysmogram	1	
	Pression sanguine diastolique	Scanner electro-interstitiel	1	
	Concentrations de cytokines	Echantillon de sang	1	
Contrôle de la colonne vertébrale	Balancements posturaux	Plateforme de force	2	
	Précision	Test Y-Balance	1	
	Balancements posturaux	Analyse du mouvement	1	
	Flexion de la hanche et du genou	Biofeedback de pression	1	
Endurance musculaire	Muscles abdominaux	Sorensen	1	
		Ito	1	
	Muscles extenseurs du tronc	Shirado	1	
		McQuade	1	
Activité musculaire	Activation musculaire flexion-extension	EMG	2	
	Force musculaire maximale du dos	Taiwan	1	
Morphologie	Lordose lombaire	Formulaire d'ostéopathie	1	
	Examen structurel ostéopathique	Règle flexible	1	
Proprioception	Erreur de repositionnement lombaires	Dynamomètre	1	

FIGURE 19 – Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés dans la catégorie principale "Manifestations pathophysiologiques" par domaines et par critères d'évaluation.

2.2.5.2 Critères d'évaluation et outils de mesure utilisés dans les études d'excellente et de bonne qualité méthodologique

Les critères d'évaluation et outils de mesure sont répertoriés sur la figure 20. Au total, 94 outils de mesure ont été répertoriés et indexés dans trois catégories principales : *impact sur la vie*, *manifestations physiopathologiques* et *utilisation des ressources et impact économique*.

67 outils de mesure ont été organisés dans la catégorie principale de l'*impact sur la vie* et classés dans les onze domaines précédemment cités : *intensité de la douleur*, *fonctionnement physique*, *qualité de vie liée à la santé*, *fonctionnement cognitif*, *satisfaction à l'égard des services de soin*, *qualité de la douleur*, *fonctionnement psychologique*, *comportement face à la douleur*, *médication*, *aspect temporel de la douleur* et *interférence de la douleur*.

Les deux domaines dans lesquels les outils de mesure étaient les plus répandus étaient *l'intensité de la douleur* (21 outils de mesure), mesurée principalement par des échelles auto-administrées (EVA ou EEN), et les *difficultés fonctionnelles* (20 outils de mesure) mesurées uniquement par des questionnaires auto-administrés (ODI, RMDQ, QBP).

24 outils de mesure ont été organisés dans la catégorie principale des *manifestations physiopathologiques* et classés parmi cinq domaines : *amplitude de mouvement*, *biomarqueurs de la douleur*, *contrôle de la colonne vertébrale*, *endurance musculaire* et *activité musculaire*. Les domaines dans lesquels les outils de mesure sont les plus répandus sont ceux de *l'amplitude de mouvement* (7 outils de mesure), évaluée à travers les mouvements du tronc et mesurée principalement par un mètre, et des *biomarqueurs de la douleur* (7 outils de mesure).

Dans la catégorie principale de *l'utilisation des ressources et impact économique*, un domaine a été identifié : la *productivité au travail*.

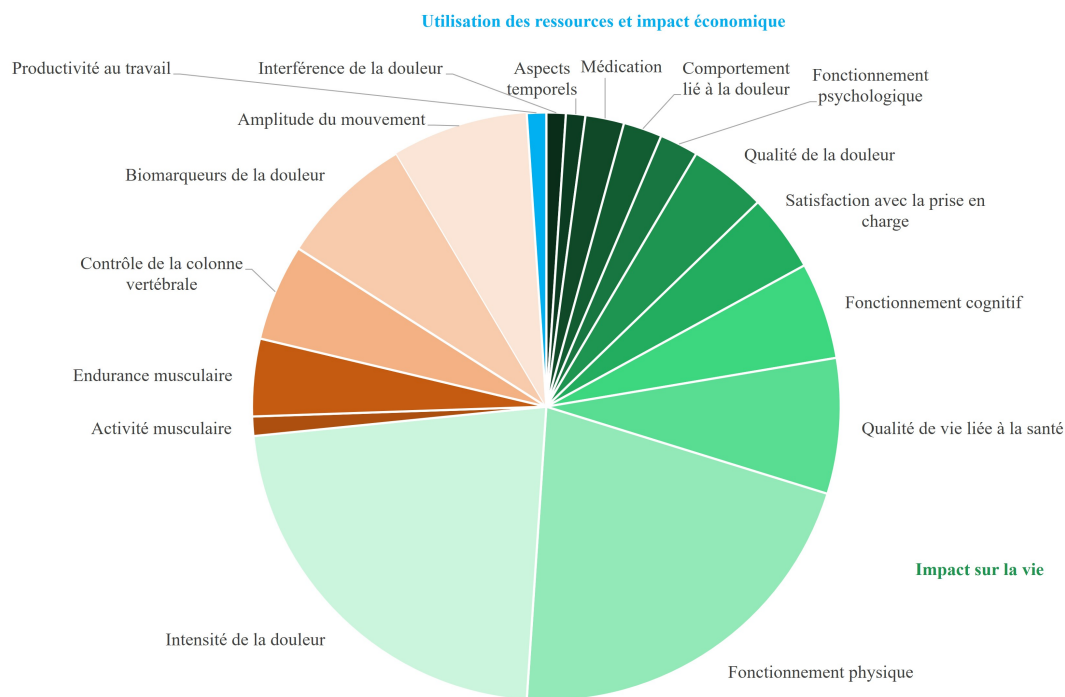


FIGURE 20 – Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés par catégories principales et domaines pour les études avec une bonne et une excellente qualité méthodologique.

2.2.5.3 Critères d'évaluation et outils de mesure concernant uniquement les études portant sur l'ostéopathie

Il existe 5 études portant exclusivement sur la manipulation et/ou la mobilisation ostéopathique [Bicalho *et al.*, 2010, Licciardone *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2013, Licciardone *et al.*, 2016, Auger *et al.*, 2021]. Toutes ces études ont utilisé des outils de mesure pour quantifier l'*impact sur la vie*, en particulier les critères d'évaluation suivants : *intensité de la douleur* (EVA, toutes les études), *fonctionnement physique* (ODI : [Bicalho *et al.*, 2010, Auger *et al.*, 2021] et RMDQ : [Licciardone *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2013, Licciardone *et al.*, 2016]), *qualité de vie* (SF-12 : [Auger *et al.*, 2021] et SF-36 : [Licciardone *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2013]), *co-traitements* [Licciardone *et al.*, 2013] et *satisfaction du patient vis-à-vis du traitement* [Licciardone *et al.*, 2013]. Deux études ont porté sur les *manifestations physiopathologiques*, la première examinant la concentration de cytokines dans le sang et les structures corporelles (SOAP) [Licciardone *et al.*, 2012] et la seconde l'*activité musculaire* avec un examen EMG pendant la flexion-extension du tronc et l'amplitude des mouvements avec le test doigt-sol [Bicalho *et al.*, 2010]. Une étude s'est intéressée à l'*utilisation des ressources et l'impact économique* en posant des questions sur le nombre de jours travaillés au cours du dernier mois [Licciardone *et al.*, 2013].

2.2.6 Discussion

Cette revue systématique visait à répertorier les critères d'évaluation et les outils de mesure utilisés dans les ECR pour évaluer l'effet des TM sur la prise en charge de la douleur chez les adultes LCNS puis de discuter des points forts et des limites de ces outils afin de proposer de nouvelles approches pour évaluer les TM.

2.2.6.1 Synthèse des résultats

Les échelles ou questionnaires auto-administrés sont les outils de mesure les plus couramment utilisés pour mesurer les effets des TM sur la prise en charge de la douleur. Sur les 144 outils de mesure répertoriés, 109 sont des échelles ou des questionnaires auto-administrés, couvrant 21 domaines d'évaluation et comprenant 28 outils de mesure. Ainsi, la catégorie principale la plus représentée est *impact sur la vie* et les domaines les plus fréquemment représentés sont l'intensité de la douleur et le fonctionnement physique. Concernant la deuxième catégorie principale la plus représentée, *manifestations physiopathologiques*, 23 critères d'évaluation et 25 outils de mesure ont été répertoriés et les domaines les plus fréquemment représentés sont l'amplitude des mouvements et les biomarqueurs de la douleur. En ce qui concerne les critères d'évaluation et les outils de mesure utilisés dans les études d'excellente et bonne qualité méthodologique, les résultats sont similaires.

2.2.6.2 Comparaison avec les recommandations basées sur les preuves

Les auteurs de revues systématiques sur la prise en charge des patients LCNS ont signalé que les résultats sont souvent mesurés et rapportés de manière incohérente dans les ECR [Innocenti *et al.*, 2023]. Une proposition pour remédier à ce biais consisterait à utiliser un ensemble standardisé de paramètres [Innocenti *et al.*, 2023]. Un ensemble de résultats de base (COS) a été proposé en 1998 par Deyo *et al.* [Deyo *et al.*, 1998] puis mis à jour en 2015 par Chiarotto *et al.* [Chiarotto *et al.*, 2015]. Il propose des recommandations spécifiques pour 4 domaines de résultats : le *fonctionnement physique*, l'*intensité de la douleur*, la *qualité de vie liée à la santé* (HRQOL) et le *nombre de décès*. Dans cette revue systématique, aucun essai n'a rendu compte des quatre domaines de résultats : l'un d'entre eux a rapporté le *nombre de décès* et onze essais ont rapporté des résultats sur les trois autres domaines [Auger *et al.*, 2021, Boff *et al.*, 2020, Branchini *et al.*, 2015, Celenay *et al.*, 2019, Joshi *et al.*, 2021, Licciardone *et al.*, 2012, Licciardone *et al.*, 2013, Nambi *et al.*, 2018, Senna *et Machaly*, 2011, Tamer *et al.*, 2017, Zangrando *et al.*, 2017]. Au-delà des critères d'évaluation, les chercheurs doivent s'accorder sur les meilleurs outils pour mesurer ces résultats, afin de standardiser et de comparer les résultats entre les différentes études [Innocenti *et al.*, 2023]. Ainsi, un consensus a été obtenu (COMS) pour proposer d'utiliser l'EEN pour évaluer l'intensité de la douleur, l'Oswestry Disability Index (ODI) version 2.1a ou le Roland-Morris Disability Questionnaire (RMDQ) en 24 éléments pour évaluer le fonctionnement physique, le questionnaire Short-Form Health Survey 12 (SF-12) ou le questionnaire en 10 éléments du Système d'information sur la mesure des résultats déclarés par les patients (PROMIS) pour la santé mondiale (PROMIS-GH-10) pour évaluer l'HRQOL, et une simple déclaration pour rapporter le nombre de décès au cours de l'essai [Chiarotto *et al.*, 2018b].

Dans cette revue systématique, les deux échelles les plus utilisées pour quantifier l'*intensité de la douleur* sont l'échelle visuelle analogique (EVA) et l'échelle d'évaluation numérique (EEN). Ces échelles sont fiables et valides [Santiago *et al.*, 2020] et montrent une forte corrélation entre elles [Hjermstad *et al.*, 2011]. L'EVA est plus sensible au changement et l'EEN est plus fiable lorsqu'elle est utilisée dans des populations spécifiques telles que les personnes âgées, les personnes souffrant de troubles cognitifs ou les personnes issues de niveaux socio-éducatifs faibles [Santiago *et al.*, 2020, Hjermstad *et al.*, 2011]. La capacité d'administrer l'EEN verbalement ou par écrit est un autre avantage [Santiago *et al.*, 2020]. Ce sont donc les conditions d'administration qui détermineront laquelle de ces deux échelles sera utilisée : la standardisation des descripteurs d'ancrage (c'est-à-dire les descripteurs définissant l'intensité de la douleur perçue), les modalités d'administration, les délais, l'interprétation des seuils et la signification clinique [Hjermstad *et al.*, 2011]. En plus de ces échelles, deux autres critères d'évaluation ont été identifiés : la *sensibilité*

à la douleur (à l'aide d'un algomètre) et l'amplitude de sommation temporelle (à l'aide de l'EVA). Ces critères d'évaluation visent à affiner les paramètres utilisés pour définir la sensibilité à la douleur [Hjermstad *et al.*, 2011]. À notre connaissance, il n'existe pas de recommandations concernant l'évaluation de la sensibilité à la douleur dans la prise en charge de la LCNS. Des travaux sont encore nécessaires pour inclure ces variables, malgré le nombre croissant d'essais et en particulier ceux montrant une corrélation entre les scores du questionnaire psychologique et le niveau de sensibilité à la douleur [Meints *et al.*, 2019].

En ce qui concerne le domaine du *fonctionnement physique*, le RMDQ et l'ODI étaient les deux questionnaires les plus couramment utilisés pour quantifier le fonctionnement physique. Ces questionnaires sont considérés comme fiables et valides [Chapman *et al.*, 2011, Chiarotto *et al.*, 2016b, Chiarotto *et al.*, 2016a]. L'ODI se concentre sur la manière dont les maux de dos affectent la capacité d'un individu à faire face à sa vie quotidienne et le RMDQ aborde les difficultés liées à l'exécution d'activités physiques quotidiennes directement liées aux lombalgies [Chiarotto *et al.*, 2016b]. Alors que le RMDQ comporte moins d'erreurs de mesure et une meilleure validité de construit, l'ODI a une meilleure fiabilité test-retest [Chiarotto *et al.*, 2016b]. Des preuves contradictoires ont été trouvées concernant la sensibilité des deux instruments, et leur cohérence interne est inconnue en raison de la qualité méthodologique ou du manque d'essais sur la précision de cette mesure [Chiarotto *et al.*, 2016b]. En effet, le questionnaire ODI montre systématiquement des corrélations plus élevées avec d'autres instruments mesurant des concepts identiques ou non liés tels que l'intensité de la douleur perçue, l'état de santé général, la santé mentale et le fonctionnement social [Chiarotto *et al.*, 2016b]. Ces résultats suggèrent que le construit mesuré par l'ODI pourrait être plus large que celui mesuré par le RMDQ, ce dernier permettant de mesurer un construit plus étroit et fournissant ainsi une évaluation plus ciblée du fonctionnement physique chez les patients souffrant de lombalgie [Chiarotto *et al.*, 2016b]. Il n'y a donc pas de raison impérieuse de privilégier l'un de ces deux outils par rapport à l'autre lors de l'évaluation du fonctionnement physique des patients LCNS, mais des recherches plus fiables sont nécessaires pour étayer cette conclusion [Chiarotto *et al.*, 2016b]. En plus de ces questionnaires, trois autres critères d'évaluation ont été identifiés : le Waddell Disability Index (WDI), le Quebec Back Pain Questionnaire (QBP) et le Orebro Musculoskeletal Pain Screening Questionnaire (OMPSQ). Le WDI et le QBP sont faciles à administrer et à évaluer [Garg *et al.*, 2020]. Le WDI offre un avantage pour les études cliniques avec sa fiabilité test-retest modérée, sa bonne fiabilité inter-évaluateurs, sa validité de concept et sa capacité de mise en commun des données [Garg *et al.*, 2020]. Cet indice permet de détecter des changements significatifs chez les patients après un intervalle d'un mois suivant le traitement mais sa réactivité n'a pas été étudiée de manière approfondie et il devrait être utilisé en association avec d'autres systèmes

de notation du handicap pour fournir une évaluation complète de la douleur [Garg *et al.*, 2020]. Le QBP est facile à administrer et à évaluer, avec une fiabilité test-retest élevée, une bonne validité de contenu et de construit, et présente de fortes corrélations avec d'autres outils du handicap (ODI, RMDQ) [Garg *et al.*, 2020]. L'OMPSQ est utilisé pour identifier les patients lombalgiques à risque de chronicité et d'invalidité prolongée [Garg *et al.*, 2020]. Bien que l'OMPQS présente une grande fiabilité et était autrefois fortement corrélé au temps de récupération [Gabel *et al.*, 2012], une récente revue de la littérature indique que les instruments de dépistage des lombalgies administrés en soins primaires ne parviennent pas à attribuer des scores de risque plus élevés aux personnes qui développent une douleur persistante, et recommande de nouveaux essais avec des cohortes plus importantes et une prolongation de la période de contrôle [Karran *et al.*, 2017].

En ce qui concerne le domaine de la *qualité de vie liée à la santé*, le questionnaire abrégé sur la santé (SF-36) composé de 36 éléments a été le plus utilisé pour évaluer la qualité de vie des patients. Le SF-36 mesure la santé physique (PCS) et la santé mentale (MCS) [LoMartire *et al.*, 2020]. D'autres questionnaires auto-administrés ont été mentionnés dans cette étude : le Short Form (12) Health Survey, qui est une version abrégée du SF-36 et mesure les huit mêmes concepts de santé [Riddle *et al.*, 2001], et l'EQ-5D- 5L et EQ-5D-3L, qui couvrent la mobilité, les soins personnels, les activités habituelles, la douleur/l'inconfort et la dépression/l'anxiété associés à une échelle visuelle analogique verticale [Van Hout *et al.*, 2012]. La différence entre ces deux derniers outils de mesure réside dans le nombre d'options de réponse, 5 contre 3 [Van Hout *et al.*, 2012]. À l'heure actuelle, la littérature n'identifie aucune propriété de mesure supérieure pour aucun de ces tests pour l'évaluation des lombalgies persistantes, ce qui s'explique en partie par le fait que ces outils ne sont pas suffisamment spécifiques lorsqu'il s'agit de lombalgies [Chiarotto *et al.*, 2016b]. Ainsi, le temps de passation est le principal facteur qui détermine laquelle de ces échelles doit être utilisée, par exemple l'enquête sur la santé SF-36 comprend davantage d'éléments et donc sa durée de passation est longue [Chiarotto *et al.*, 2016b].

2.2.6.3 Modèle biopsychosocial

D'autres domaines d'évaluation ont également été identifiés dans les études incluses où les auteurs ont considéré les contributions des facteurs biologiques, psychologiques et sociaux. Certaines études ont pris en compte les facteurs biologiques, en particulier la concentration de cytokines, les métabolites cérébraux, la variabilité du rythme cardiaque et l'hémodynamique [Licciardone *et al.*, 2012]. À notre connaissance, il n'existe pas de recommandations concernant ces facteurs dans l'évaluation de la LCNS. Une seule étude s'est intéressée au facteur social en comptabilisant le nombre de jours non travaillés [Licciardone *et al.*, 2013].

Les facteurs psychologiques ont été évalués en utilisant différents domaines tels que le fonctionnement cognitif, la qualité de la douleur, l'anxiété, la dépression et la peur du mouvement. Le fonctionnement cognitif a été évalué à l'aide de deux outils de mesure : le Fear avoidance beliefs questionnaire (FABQ) et le Pain Catastrophizing Scale (PCS). Le FABQ, qui mesure la peur de la douleur causée par l'activité physique, est fiable et valide [Wertli *et al.*, 2014]. Il évalue en particulier les attitudes à l'égard des activités physiques et des activités professionnelles [Wertli *et al.*, 2014]. Le Pain Catastrophizing Scale (PCS) évalue trois dimensions : la rumination, l'amplification et l'impuissance [Sullivan *et al.*, 1995]. La catastrophisation désigne le processus cognitif au cours duquel les patients anxieux s'attardent sur les conséquences les plus négatives et se réfère ici à l'interprétation de la douleur comme extrêmement menaçante [Christe *et al.*, 2021b]. La qualité de la douleur a été évaluée à l'aide des questionnaires Short-form McGill Pain (SF-MPQ) [Melzack et Raja, 2005] et Brief Pain Inventory (BPI) [Cleeland et Ryan, 1994], qui sont utilisés pour mesurer l'intensité de la douleur ainsi que les aspects qualitatifs qui l'accompagnent. Les facteurs émotionnels ont été évalués à l'aide de trois questionnaires : l'Hospital Anxiety Depression Scale (HADS) [Zigmond et Snaith, 1983], le Beck Depression Inventory (BDI) [Beck *et al.*, 1987] et le Patient Health Questionnaire-9 (PHQ-9) [Kroenke *et al.*, 2001], qui mesurent le niveau d'anxiété et de dépression. Le niveau de peur du mouvement a été mesuré par la Tampa Scale Kinesiophobia (TSK) [Lundberg *et al.*, 2004]. En recherche clinique, ces échelles et questionnaires permettent d'avoir une vue précise des symptômes qui accompagnent la douleur et ces questionnaires ont été validés dans la population lombalgique : FABQ [Waddell *et al.*, 1993], PCS [Van Damme *et al.*, 2002], SF-MPQ [Dworkin *et al.*, 2015], HADS [Trudeau *et al.*, 2012], BPI [Song *et al.*, 2016], TSK [Vlaeyen *et al.*, 1995a].

2.2.6.4 Outils de mesure biomécanique

Une autre approche de l'évaluation des conséquences de la LCNS est l'analyse biomécanique du patient. Les études cliniques se sont intéressées principalement à l'*amplitude de mouvement*, le *contrôle de la colonne vertébrale*, la *proprioception*, l'*endurance* et l'*activité musculaire*. L'*amplitude de mouvement*, l'*endurance musculaire* et l'*activité musculaire* ont été évaluées en demandant aux participants d'effectuer une flexion-extension du tronc et/ou une flexion latérale. L'*amplitude de mouvement* était mesurée principalement à l'aide d'un mètre (test doigt-sol), le *contrôle du tronc* par des marqueurs cinétiques (balancement du tronc), l'*endurance musculaire* par le score total de répétitions effectuées par le patient pour un mouvement donné et la *proprioception* par un dynamomètre. Les critères d'évaluation et outils de mesure utilisés sont en accord avec les récents résultats d'une revue systématique et d'une méta-analyse s'intéressant à identifier une liste de biomarqueurs pertinents pour différencier les patients atteints de LCNS d'une population

asymptomatique [Moissenet *et al.*, 2021]. Les résultats ont montré que l’amplitude de mouvement, les balancements du corps dans l’axe antéro-postérieur, la coordination intersegmentaire et/ou musculaire et la variabilité intra-individuelle du mouvement étaient les biomarqueurs les plus pertinents pour discriminer les patients lombalgiques [Moissenet *et al.*, 2021]. Cependant, aucune étude ne considère les mouvements avec déplacement de la base d’appui, c’est-à-dire avec le déplacement des pieds. Ainsi, aucune étude n’a évalué les participants douloureux dans un contexte proche des conditions de la vie quotidienne. Pour autant, de plus en plus d’études se sont intéressées à l’effet de la lombalgie sur la marche et une récente revue systématique a montré que les patients LCNS présentaient une vitesse de marche de confort plus lente, une amplitude de rotation au niveau du bassin et de la colonne lombaire plus petite, et une coordination plus en phase pour les patients LCNS que chez les participants asymptomatiques [Koch et Hänsel, 2018]. De plus, les difficultés motrices des patients LCNS semblent corrélées avec certains domaines psychologiques comme la peur du mouvement, le niveau de catastrophisation et l’anxiété [Christe *et al.*, 2021b]. Les outils de mesure portant sur l’étude du mouvement du patient semblent apporter des informations complémentaires importantes dans l’évaluation de la prise en charge des patients.

2.2.6.5 Forces et limites

Cette revue systématique, à notre connaissance, est l’une des premières à identifier et discuter les paramètres et les outils de mesure utilisés en TM dans le cadre de la prise en charge de la LCNS. L’ensemble du processus de sélection des études a été effectué par trois évaluateurs puis l’extraction des données a été effectuée par deux évaluateurs, tous indépendants. Cependant, plusieurs biais peuvent être relevés. Premièrement, la restriction des critères d’éligibilité et notamment, bien que cela soit intentionnel, le choix de n’inclure que les études portant sur des populations générales : les études portant spécifiquement sur une profession particulière, comme celle concernant les soins infirmiers ou l’armée, qui nous semblaient ouvrir un contexte social différent, n’ont pas été incluses. Deuxièmement, seules les études portant sur les TM suivantes : ostéopathie, physiothérapie et chiropraxie, ont été incluses. Troisièmement, ont été incluses uniquement les études publiées depuis 2010, ce qui ne permet de tirer des conclusions que pour cette période. Par ailleurs, en ne considérant que les publications en anglais et en français, d’autres études pertinentes ont peut-être été omises.

2.2.6.6 Implications pour la recherche, la pratique clinique et l’éducation

Cette revue systématique a pour ambition de mieux informer les cliniciens sur les évaluations possibles des patients lombalgiques, en leur fournissant une liste des outils de mesure les plus utilisés dans la littérature, et en discutant des limites de ceux-ci.

L'un des constats majeurs est qu'aucune étude n'a évalué l'effet des TM en corrélant les résultats obtenus dans les domaines biologiques, psychologiques et sociologiques. Ainsi, aucune étude ne s'est basée sur le modèle BPS pour évaluer la prise en charge. Ce constat laisse à penser que les études actuelles en TM sont trop restrictives en ce qui concerne les différents facteurs qui entourent la douleur, alors qu'ils pourraient permettre une meilleure compréhension de l'effet des TM sur la prise en charge des patients. Cela signifie également qu'il est essentiel d'expliquer la méthodologie de détermination des résultats du traitement à l'aide de mesures basées sur le modèle BPS applicables en milieu clinique, et d'encourager les praticiens à participer à des réseaux de recherche basés sur la pratique pour soutenir l'effort de recherche [Steel *et al.*, 2020].

Alors que les questionnaires sont majoritairement utilisés pour évaluer l'effet des TM dans le cadre de la prise en charge de la douleur, le deuxième constat de cette revue systématique est que l'évaluation de la capacité fonctionnelle des patients dans les situations de la vie quotidienne par l'analyse du mouvement n'a été que très peu explorée dans la littérature. Plusieurs auteurs ont proposé différents types d'évaluation, principalement basés sur l'amplitude articulaire ou l'endurance musculaire. Bien que présentant un intérêt majeur, ces variables ne permettent pas d'avoir une vision exhaustive et complète de l'évaluation de la LCNS, et notamment des mouvements dans la vie quotidienne du patient, comme par exemple la marche. À titre d'illustration, des travaux antérieurs ont montré que, pour effectuer une action dans un environnement spécifique, les marcheurs tiennent compte de leurs caractéristiques anthropométriques, comme leur largeur d'épaules [Higuchi *et al.*, 2006], ainsi que de leurs capacités de mouvement [Wilmot *et al.*, 2015]. La perspective de nouvelles méthodologies portant sur d'autres paradigmes, incluant cette dimension dite écologique (évaluation de la lombalgie dans des tâches de la vie quotidienne) pourrait nous permettre d'étudier l'influence de la douleur chronique par une approche prenant en compte les capacités perceptives et motrices (facteur biologique) de ces patients tout en incluant les facteurs psycho-sociaux (peur du mouvement, catastrophisation, etc.).

C'est dans cette perspective que nous présenterons, dans le troisième et dernier chapitre de notre revue de la littérature, les marqueurs biomécaniques de la LCNS. Nous discuterons ces résultats avec les facteurs caractéristiques de la douleur, puis présenterons de nouvelles méthodes d'évaluation se basant sur des tâches de la vie quotidienne, comme passer une porte ou croiser un piéton, qui ont montré leur intérêt dans l'étude des stratégies perceptivo-motrices des individus.

VERS DE NOUVELLES MÉTHODES D'ANALYSE DE LA LOMBALGIE CHRONIQUE NON SPÉCIFIQUE : ANALYSE DU MOUVEMENT

Comme présenté dans le chapitre précédent, aucune étude n'a, à notre connaissance, évalué l'effet des TM sur la LCNS en utilisant des tâches se rapprochant de situations de la vie quotidienne dans des environnements complexes, telles que marcher en contournant un obstacle, en passant entre deux objets ou monter des escaliers. De plus, des limites de l'évaluation du fonctionnement physique des patients via les questionnaires ont été suggérées. Dans ce chapitre, nous présenterons les marqueurs biomécaniques permettant de discriminer les participants LCNS d'une population sans douleur, puis les paradigmes expérimentaux ayant montré leur intérêt pour étudier les coordinations perceptivo-motrices mises en jeu durant la locomotion.

3.1 Marqueurs biomécaniques de la lombalgie chronique non spécifique

Dans cette section, nous commencerons par décrire dans une première sous-section les paramètres posturaux discriminant les participants LCNS des participants sans douleur puis, dans une seconde sous-section, les paramètres de la mobilité comprenant les paramètres de la locomotion et les paramètres de mouvements sans déplacement de la base d'appui. Dans une dernière sous-section, nous décrirons comment les facteurs caractéristiques de la LCNS (intensité douloureuse, facteurs psychologiques, etc.) peuvent influencer les paramètres biomécaniques.

3.1.1 Contrôle postural et lombalgie chronique non spécifique

Le contrôle postural émerge de l'interaction entre l'individu, la tâche et l'environnement, et consiste à contrôler la position du corps dans l'espace à des fins de stabilité

et d'orientation [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. La stabilité est la capacité à contrôler la position du centre de masse, en relation avec la base d'appui, définie comme l'aire du corps qui est en contact avec la surface de support [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. L'orientation est l'habileté à maintenir une relation appropriée entre les segments du corps, et entre le corps et l'environnement [Horak *et al.*, 1996]. Le maintien de la position du corps dans l'espace est sous-tendu par une interaction optimale entre le système musculosquelettique, comprenant les amplitudes articulaires, la flexibilité de la colonne vertébrale et les propriétés musculaires, et le système neuronal, incluant 1) les processus moteurs (organisation musculaire en synergie), 2) les processus sensoriels (systèmes visuel, vestibulaire et somatosensoriel) et 3) les processus cognitifs de haut niveau (ressources cognitives et stratégies permettant d'établir une correspondance entre la sensation et l'action, c'est-à-dire les aspects anticipatifs et adaptatifs du contrôle postural) [Shumway-Cook *et al.*, 2023].

L'effet de la LCNS sur le contrôle postural, pendant une station debout, a été décrit dans trois récentes revues systématiques et méta-analyses comparant des participants LCNS et des participants sans douleur sur des données cinétiques (estimées par l'analyse du déplacement du centre de pression (CdP)), des données cinématiques (caractérisées par la vitesse et les angles articulaires) et des données sur l'activité musculaire (définie par les paramètres spatio-temporels et d'intensité) [Koch et Hänsel, 2019, Park *et al.*, 2023, Moissenet *et al.*, 2021]. Les études incluses ont utilisé différentes conditions faisant varier la difficulté de la tâche : effet de la vision (yeux ouverts ou yeux fermés), effet de la surface de support (surface ferme ou surface en mousse), effet du temps de réalisation de la tâche (durée courte ou durée longue), effet d'une perturbation interne (mouvement balistique des bras), effet d'une perturbation extérieure (vibrations appliquées aux muscles) et effet d'une seconde tâche réalisée simultanément (paradigme de double tâche) [Koch et Hänsel, 2019, Park *et al.*, 2023].

Tout d'abord, les résultats portant sur la stabilité pendant la station debout à l'état stable, c'est-à-dire dans un espace prédictible et sans perturbation, ont montré que pour les données cinétiques, l'amplitude de mouvement du CdP des participants LCNS était plus importante que celle des participants sans douleurs dans la direction Antéro-Postérieure (AP) et Antéro-Postérieure/Médio-Latérale (AP-ML) [Park *et al.*, 2023]. Aucune différence n'a été observée pour la vitesse du CdP [Park *et al.*, 2023]. Concernant les données cinématiques et de l'activité musculaire, la seule étude qui a évalué l'inclinaison du tronc par rapport au bassin n'a pas montré de différence significative entre les participants [Brumagne *et al.*, 2008], et la seule étude qui a comparé l'activité électromyographique des muscles du tronc en position debout pendant une période prolongée a démontré un niveau d'activation plus élevé du muscle érecteur du rachis au début de la tâche chez les

participants LCNS [Ringheim *et al.*, 2015].

Pour les conditions avec contrainte de la tâche et/ ou de l'environnement, les résultats sur les données cinétiques ont montré que [Park *et al.*, 2023] l'amplitude des balancements du CdP des participants LCNS était plus importante que celle des participants sans douleur, que ce soit pour des tâches avec les yeux fermés sur une surface ferme ou les yeux ouverts sur une surface en mousse dans les directions AP, ML et AP-ML, ou pour une tâche avec les yeux fermés sur une surface en mousse dans les directions ML et AP-ML [Park *et al.*, 2023]. De plus, le balancement postural était plus important lorsque la vision était occultée [Park *et al.*, 2023]. Aucune différence de la vitesse de déplacement du CdP n'a été observée pour chacune de ces conditions [Park *et al.*, 2023]. Les résultats sur les données cinématiques ont montré que les participants LCNS présentaient une flexion du tronc sur le bassin plus importante que les participants sans douleur lorsque la vision était occultée ou qu'une perturbation interne (mouvement balistique des bras) ou externe (vibrations appliquées au muscle triceps sural) était appliquée [Brumagne *et al.*, 2008]. Cette différence était d'autant plus importante dans le cas d'une perturbation externe [Brumagne *et al.*, 2008]. Concernant les résultats portant sur les données musculaires lors d'une perturbation extérieure, les participants LCNS présentaient une latence d'apparition de l'activation musculaire supérieure et une durée d'activation inférieure à celles des participants sans douleur [Koch et Hänsel, 2019, Park *et al.*, 2023].

Ces résultats suggèrent que la LCNS est associée à une altération du contrôle postural [Park *et al.*, 2023, Koch et Hänsel, 2019]. Cette altération proviendrait de la combinaison de stratégies restrictives et protectrices du tronc, associées à une proprioception altérée [Park *et al.*, 2023, Koch et Hänsel, 2019]. La proprioception traduit la sensibilité des récepteurs musculo-articulaires qui nous renseignent sur nos sensations conscientes du mouvement et de la position de nos articulations et de nos segments corporels dans l'espace [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. Une diminution de l'acuité proprioceptive a été mesurée chez les patients LCNS, impliquant des mouvements plus importants pour que l'estimation de la position du CdP soit mise à jour avec une correction dans la direction opposée disproportionnée [Park *et al.*, 2023]. De plus, dans la population générale, les schémas moteurs utilisés pour le contrôle de l'équilibre sont caractérisés par un continuum selon lequel, pour des petites perturbations, les stratégies du maintien de l'équilibre se produisent autour du point fixe de la cheville, et, à mesure que les perturbations augmentent, le point fixe se déplace au niveau des hanches, jusqu'à provoquer des stratégies de changement d'appui, comme par exemple faire un pas pour ne pas tomber [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. Cependant, dans la population LCNS, les participants présentent une plus grande dépendance à la "*stratégie de la cheville*", ce qui signifie que l'équilibre est principalement régulé par les mouvements de la cheville, et que les capacités à maintenir

l'équilibre par les mouvements des hanches et de la région lombaire sont restreintes [Koch et Hänsel, 2019]. En effet, dans la "*stratégie de la hanche*", le déplacement du CdP est adapté par la flexion et l'extension de l'articulation de la hanche [Horak et Nashner, 1986]. Ces résultats pourraient donc expliquer pourquoi l'amplitude du balancement du CdP est d'autant plus importante pour des tâches plus exigeantes.

Ces résultats sont primordiaux mais ne s'appliquent pas à des situations au plus près de la vie quotidienne, impliquant d'effectuer plus d'une tâche à la fois. Ainsi, lorsque deux tâches sont exécutées simultanément, la compétition pour l'utilisation des ressources attentionnelles disponibles peut entraîner une diminution des performances sur une ou l'autre tâche. Ce phénomène est appelé l'interférence d'une double tâche [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. L'une des façons d'examiner les exigences attentionnelles du contrôle postural consiste à effectuer une tâche posturale seule, puis simultanément avec une autre tâche qui est la plupart du temps une tâche cognitive [Petrigna *et al.*, 2020], et de mesurer le changement de performance entre les conditions de la tâche seule et de la tâche double [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. L'interaction entre les tâches posturales et cognitives dépend de divers facteurs tels que la difficulté de la tâche cognitive, la difficulté de la tâche posturale et l'intégrité des processus sensorimoteurs et cognitifs [Salavati *et al.*, 2009].

Une récente revue systématique et méta-analyse s'est intéressée à évaluer l'effet des conditions de double tâche sur le contrôle postural chez des personnes LCNS en comparaison avec des personnes sans douleur [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Les conditions répertoriées sont le niveau de difficulté de la tâche posturale (facile - surface rigide, et difficile - surface en mousse ou équilibre sur une seule jambe) et les catégories des tâches cognitives (tâche de temps de réaction, tâche de discrimination et prise de décision, tâche de suivi visuel et mémoire de travail, et tâche de fluidité verbale) [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Les paramètres relevés pour le contrôle postural portaient sur les paramètres du CdP (déplacement, vitesse, aire et amplitude) et le temps de réaction qui correspond à la durée entre le moment où la perturbation a commencé et la réponse du CdP [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Les résultats ont montré que pendant des tâches posturales faciles et difficiles, l'exécution d'une tâche secondaire cognitive ne semble pas être un facteur discriminant de la LCNS pour les paramètres du CdP [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Seul le temps de réaction, qui était plus long chez les participants LCNS, est significativement différent des participants sans douleur dans une tâche posturale facile et une tâche secondaire cognitive ; cependant, la différence n'est pas significative pour une tâche posturale difficile [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Une seule étude s'intéressait dans cette méta-analyse à l'effet de la chronicité ; elle a montré que les participants lombalgiques présentaient un temps de réaction plus long pour les tâches posturales faciles et difficiles en double tâche si les participants présentaient également un niveau d'anxiété élevé [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Ainsi, cette

méta-analyse suggère que la lombalgie n’interfère pas dans une situation de doubles tâche sauf dans le cas de la lombalgie chronique avec un niveau d’anxiété élevé [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Ces résultats sont cependant à modérer d’après les auteurs à cause d’une forte hétérogénéité entre les études examinées (variabilité importante du contexte et des méthodes utilisées, différence de la qualité des études et différence entre les populations comparées : âge, sexe, intensité de la douleur, durée de la lombalgie) [Pourahmadi *et al.*, 2023]. Regardons maintenant si ces résultats sont retrouvés dans le cas de tâches plus complexes, telles que la marche ou le changement de position.

3.1.2 Contrôle de la mobilité et lombalgie chronique non spécifique

La mobilité est définie comme la capacité à produire un mouvement de manière autonome et en toute sécurité d’un point de départ jusqu’à l’objectif visé [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. La mobilité englobe de nombreux types de tâches comme la capacité de bouger et de changer de position, de se lever, de marcher ou de courir et de naviguer dans des environnements souvent assez complexes qui nécessitent l’utilisation d’entrées sensorielles pour aider au contrôle et à l’adaptation du mouvement [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. Dans le cas de la LCNS, la mobilité a été étudiée dans la locomotion [Koch et Hänsel, 2018] et dans des tâches de changements de position [Moissenet *et al.*, 2021] telles que l’inclinaison du tronc en ML, la flexion/extension du tronc (assis-debout), le soulevé d’objets et la rotation du tronc.

3.1.2.1 La locomotion

La locomotion implique tout le corps et nécessite donc la coordination de nombreux muscles et articulations tout en naviguant dans des environnements complexes et souvent encombrés [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. Le comportement locomoteur comprend la capacité d’initier et de terminer un déplacement, d’adapter la démarche pour éviter les obstacles et de changer de vitesse et de direction selon les besoins [Patla, 1991]. Ainsi, la locomotion est caractérisée par trois exigences essentielles : la progression, le contrôle postural et l’adaptation [Patla, 1991]. La progression est assurée grâce à un schéma locomoteur de base qui produit et coordonne des schémas rythmiques d’activation musculaire dans les jambes, le tronc et les bras, qui déplacent avec succès le corps dans la direction souhaitée [Shumway-Cook *et al.*, 2023] et nécessite la capacité d’initier, de terminer et de guider la locomotion vers des points finaux [Patla, 1997]. Au cours d’une démarche normale à l’état d’équilibre, la progression et le contrôle postural travaillent en synergie pour assurer un mouvement vers l’avant stable [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. L’adaptation fait référence aux stratégies utilisées pour réaliser la progression et le contrôle postural en fonction de l’évolution de la tâche et des exigences de l’environnement [Shumway-Cook

et al., 2023].

Deux récentes revues systématiques [Koch et Hänsel, 2018] et méta-analyses [Smith *et al.*, 2022] ont investigué les différences biomécaniques et neuromusculaires entre les participants LCNS et asymptomatiques (AA) pendant la marche effectuée soit sur un tapis roulant, soit dans un couloir de marche. Les variables biomécaniques étudiées étaient la vitesse de marche, la longueur de la foulée, la durée de la foulée, la force de réaction au sol, les amplitudes de rotation, la coordination entre le bassin et le tronc, et la variabilité des différents paramètres cinématiques [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Les résultats sur certains paramètres de la marche sont différents si la tâche est réalisée sur tapis roulant ou dans un couloir de marche [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Les résultats principaux montrent que la vitesse de marche et la longueur de foulée des participants LCNS ne sont pas différentes de celles des participants sans douleur lorsque la tâche est effectuée dans un couloir de marche, mais qu'elles sont différentes si la tâche est réalisée sur un tapis roulant, les participants LCNS marchant alors significativement plus lentement et ayant une longueur de foulée plus courte [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Concernant la durée de la foulée, qui n'a été étudiée que pendant une tâche de marche sur tapis roulant, les résultats montrent que la durée de la foulée a tendance à être plus courte chez les personnes souffrant de lombalgie que chez les participants AA. Néanmoins seules trois études ont évalué cette variable, et les auteurs concluent donc que d'autres études sont nécessaires pour confirmer ce résultat [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Pour la force de réaction au sol, qui n'a été étudiée que pendant une tâche dans un couloir de marche, les résultats montrent que les participants LCNS ont une force de réaction au sol plus faible que les participants sans douleur. A nouveau, seules trois études ont évalué cette variable, et d'autres travaux sont nécessaires pour confirmer ce résultat [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Pour les amplitudes de rotation du bassin, des hanches et de la colonne lombaire, les participants LCNS ont tendance à présenter des amplitudes plus faibles [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Pour ces variables, l'ensemble des tâches ont été réalisées sur tapis roulant, sauf une, qui obtient des résultats similaires [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Pour la coordination entre le bassin et la colonne lombaire dans le plan frontal et sagittal, les participants LCNS présentent une coordination plus en phase que les participants AA, c'est-à-dire que la colonne lombaire et le bassin se déplacent dans la même direction [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Ces résultats ont un effet d'autant plus important lorsque la tâche demandée est exigeante comme courir ou porter un objet [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Concernant la variabilité intra-individuelle des différents paramètres cinématiques, une plus forte variabilité intra-individuelle chez les participants LCNS a été trouvée sur le modèle cinématique d'une foulée à l'autre et sur les rotations du bassin et du thorax [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. De plus, une augmentation de la variabilité a été observée quand intervenaient

de grands changements de vitesse [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022]. Concernant l'activité musculaire pendant la marche, les participants LCNS présentent une activité musculaire de l'érecteur du rachis plus élevée que les participants AA. Les preuves sont toutefois contradictoires concernant les muscles abdominaux, avec la mise en évidence d'une activation plus élevée ou moindre selon les études [Koch et Hänsel, 2018, Smith *et al.*, 2022].

Les auteurs suggèrent que ces différences peuvent être expliquées par le modèle de Hodges et Tucker [Hodges et Tucker, 2011] qui propose une relation de cause à effet entre l'activité musculaire et les paramètres cinématiques pour créer un mécanisme de protection réduisant les mouvements afin d'éviter de solliciter davantage la zone douloureuse. Ainsi, une activation musculaire plus importante peut entraîner une coordination plus en phase et un raidissement des articulations, amenant à une vitesse de marche réduite [Hodges et Tucker, 2011]. Le ralentissement ou le raccourcissement de la longueur de la foulée sont, de plus, des mécanismes permettant de minimiser les forces de réaction au sol [Hodges et Tucker, 2011]. Enfin, la restriction des mouvements lors de la marche et la diminution des mécanismes de compensation peuvent également expliquer une plus grande variabilité intra-individuelle sur l'ensemble des paramètres de la marche d'une foulée à l'autre [Hodges et Tucker, 2011]. Cependant, il est difficile de conclure si les stratégies mises en place par les participants LCNS sont adaptatives ou inadaptées [Smith *et al.*, 2022]. D'autres études longitudinales portant sur le passage à la chronicité des patients LCNS seraient à envisager pour mieux comprendre les modifications du contrôle moteur au fil du temps [Smith *et al.*, 2022].

A notre connaissance, très peu d'études ont évalué les patients LCNS dans des tâches de locomotion se rapprochant de situations quotidiennes, plus exigeantes, telles que marcher en résolvant une tâche cognitive [Lamoth *et al.*, 2008, Hamacher *et al.*, 2014, Hamacher *et al.*, 2016, Homs *et al.*, 2022]. Dans les quatre études que nous avons trouvées, les variables étudiées portaient sur les paramètres biomécaniques de la marche : vitesse de marche, longueur de la foulée, coordinations inter-segmentaires (jambes, bassin et tronc) et variabilité du mouvement. Chez les personnes AA, la performance de la marche se détériore lorsque l'attention est divisée (diminution de la vitesse de marche, diminution de la longueur de la foulée et du déphasage entre les segments de la colonne lombaire et du bassin) [Al-Yahya *et al.*, 2011]. Les résultats ont montré que les participants LCNS ont une vitesse de marche plus faible, une longueur de foulée plus petite et une phase relative thorax-bassin moyenne plus faible que les participants AA en situation de double tâche [Lamoth *et al.*, 2008, Homs *et al.*, 2022]. De plus, les participants LCNS semblent présenter une variabilité intra-individuelle de la durée et de la longueur de la foulée plus élevée pendant la marche en double tâche [Hamacher *et al.*, 2016, Hamacher *et al.*, 2014].

Ces résultats seraient en partie expliqués par une mauvaise priorisation de la tâche, avec une performance pour la tâche cognitive similaire à celle des participants AA mais différente au niveau de la tâche motrice [Hamacher *et al.*, 2014, Hamacher *et al.*, 2016].

La mobilité comprend également des tâches faisant intervenir des mouvements sans déplacement de la base d'appui. Nous présenterons dans la prochaine sous-section les difficultés que peuvent rencontrer les patients LCNS dans de telles tâches.

3.1.2.2 Mouvements sans déplacement de la base d'appui

Bien que la mobilité soit souvent considérée en relation avec la locomotion, de nombreux autres aspects de la mobilité sont essentiels dans les activités de la vie quotidienne, comme la capacité de changer de position, qu'il s'agisse de passer de la position assise à la position debout, de s'asseoir dans son lit ou de se baisser [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. Ces différents types d'activités sont souvent regroupés et appelés *tâches de transfert* [Shumway-Cook *et al.*, 2023]. Ces tâches partagent, comme pour la locomotion, trois exigences : le mouvement dans une direction souhaitée (progression), le contrôle postural (orientation et stabilité) et la capacité de s'adapter à l'évolution de la tâche et des conditions environnementales (adaptation) [Shumway-Cook *et al.*, 2023].

Une récente revue systématique et méta-analyse s'est intéressée à identifier et établir une liste des biomarqueurs pertinents pour discriminer les patients LCNS d'une population sans douleur dans des tâches sans déplacement de la base d'appui [Moissenet *et al.*, 2021]. Les tâches permettant de discriminer les patients LCNS portaient sur le changement de position (flexion latérale du tronc, de la position assise à la position debout, de la position debout à la position assise et rotation du tronc dans le plan transversal) et le soulevé d'objets [Moissenet *et al.*, 2021]. Les résultats ont montré que les participants LCNS pendant une flexion latérale du tronc présentaient une amplitude inférieure, dans le plan frontal, pour l'angle du pelvis, des lombaires inférieures et supérieures, et des thoraciques supérieures [Moissenet *et al.*, 2021]. De plus, ils présentaient une vitesse angulaire inférieure par rapport aux participants sans douleur [Moissenet *et al.*, 2021]. Concernant le changement de position de la position assise à debout, les participants LCNS présentaient une stratégie de hanche, c'est-à-dire que, contrairement aux participants AA commençant le mouvement par une inclinaison du tronc sur les hanches puis une extension de hanche, les participants LCNS utilisaient préférentiellement un mouvement d'extension des hanches avant l'extension lombaire pour se redresser [Moissenet *et al.*, 2021]. Cette stratégie s'accompagne d'amplitudes angulaires inférieures pour les segments hanche et lombaires basses [Moissenet *et al.*, 2021]. Concernant le transfert de la position debout à la position assise, les participants LCNS utilisent comme les participants AA une stratégie de hanche, c'est-à-dire que la flexion de hanche précède la flexion lombaire,

mais l’angle des hanches est inférieur à celui des participants AA [Moissenet *et al.*, 2021]. Pour la rotation du tronc dans le plan transversal, les participants LCNS présentent une amplitude de l’angle de rotation lombaire et de la ceinture scapulaire inférieure aux participants AA [Moissenet *et al.*, 2021]. De plus, la vitesse angulaire est inférieure chez les participants LCNS [Moissenet *et al.*, 2021]. Pour finir, pendant le soulevé d’objets, un seul paramètre a été retenu avec un angle lombo-pelvien dans le plan sagittal inférieur chez les participants LCNS [Moissenet *et al.*, 2021].

Les auteurs proposent deux interprétations de ces résultats selon la tâche demandée : l’une porte sur les tâches de flexion latérale et de rotation dans le plan transverse du tronc, et la seconde concerne les tâches de transfert de la position assise à la position debout et le soulevé d’objets [Moissenet *et al.*, 2021]. La première interprétation se base sur les travaux de Cholewicki et al. [Cholewicki *et al.*, 2019], qui décrivent des dysfonctions mécaniques intervertébrales chez les patients LCNS présentant une diminution de la translation et de la laxité intervertébrale [Cholewicki *et al.*, 2019]. La seconde interprétation concerne la stabilité de la colonne vertébrale, en particulier les difficultés des patients LCNS concernant la coordination entre la colonne lombaire et le bassin, induites par un dysfonctionnement des muscles extenseurs du tronc [Moissenet *et al.*, 2021].

D’autres facteurs, notamment psychologiques, pourraient cependant également intervenir pour expliquer ces résultats [Van Wesemael *et al.*, 2023]. Nous présenterons dans la prochaine sous-section les facteurs psychologiques de la douleur pouvant influencer les différences entre les participants LCNS et AA dans des tâches posturales et de mobilité.

3.1.3 Implication des facteurs psychologiques de la lombalgie chronique non spécifique sur le contrôle postural et le contrôle de la mobilité

Une récente revue systématique et méta-analyse s’est intéressée à examiner la relation entre les variables psychologiques (peur du mouvement et catastrophisation) relatives à la douleur et leur influence sur les paramètres du contrôle postural pendant une station debout faisant varier la difficulté de la tâche : effet de la vision (yeux ouverts ou yeux fermés) et effet de la surface de support (surface ferme ou surface en mousse) [Van Wesemael *et al.*, 2023]. Ces résultats n’ont pas révélé d’association entre les variables psychologiques et le contrôle postural chez les patients LCNS par le biais de l’analyse des variables du CdP présentées précédemment [Van Wesemael *et al.*, 2023].

Les auteurs suggèrent que ces résultats proviendraient de l’utilisation de questionnaires génériques (TSK et FABQ), qui ne sont pas spécifiques à la tâche demandée [Van Wese-

mael *et al.*, 2023]. Une autre étude s'est intéressée à comparer deux outils portant sur la peur du mouvement : le TSK et le PHOBA (Photograph Series of Daily Activities). Dans cette étude, il était demandé aux participants lombalgiques de hiérarchiser des photos représentant des activités de la vie quotidienne en fonction de l'impact qu'ils jugeaient traumatisant pour leur dos [Oliveira et Pinto, 2021]. Les résultats ont montré que l'amplitude des mouvements lombaires était prédite par le score au PHOBA, présenté comme une mesure spécifique à la peur du mouvement liée à la douleur [Oliveira et Pinto, 2021]. À l'inverse, le score au TSK, décrit comme un questionnaire générique à la peur du mouvement, n'était pas associé à l'amplitude des mouvements lombaires [Matheve *et al.*, 2019]. Ces résultats ont été confortés dans une étude portant sur l'association entre le balancement postural et l'utilisation du TSK accompagné de questions personnalisées faisant référence à la peur d'effectuer une flexion ou une inclinaison latérale du tronc dans le plan frontal et sagittal [Meinke *et al.*, 2022]. Alors que les résultats entre le score au TSK et les amplitudes de balancement du tronc n'étaient pas corrélés, la peur d'effectuer une flexion ou une inclinaison latérale du tronc était corrélée à l'amplitude des balancements du tronc dans le plan frontal et sagittal ainsi qu'à la vitesse de déplacement [Meinke *et al.*, 2022]. Ces résultats suggèrent que la peur du mouvement liée à la douleur pourrait en partie expliquer les comportements posturaux des patients LCNS mesurés grâce aux variables du CdP mais des études sont encore nécessaires pour spécifier le meilleur outil de mesure à utiliser.

Une seconde explication porterait sur la définition même de la peur du mouvement liée à la douleur. En effet, comme présenté précédemment, la kinésiophobie et les croyances portant sur l'évitement du mouvement désignent une peur irrationnelle de tout mouvement ou activité susceptible de provoquer une douleur ou de se blesser à nouveau [Demirbüken *et al.*, 2016, Du *et al.*, 2018]. Les résultats porteraient ainsi à croire que l'analyse du contrôle postural pendant une station debout peut être une tâche peu menaçante où la peur de se blesser est limitée. Cette hypothèse a notamment été étayée dans une étude portant sur des tâches posturales statiques (tâches posturales pendant une station debout) et dynamiques (tâches posturales en testant les limites de la stabilité) [Kahraman *et al.*, 2018]. Les résultats ont montré une association modérée à forte entre la peur du mouvement et le balancement postural lors d'une tâche dynamique où, plus le niveau de peur lié au mouvement était important, plus la stabilité posturale était diminuée [Kahraman *et al.*, 2018].

Pour finir, certaines études ont montré que l'intensité de la douleur est associée à l'ampleur du balancement postural [Ruhe *et al.*, 2011] : ainsi une réduction de l'intensité de la douleur est corrélée à un mouvement de balancement postural moins important [Ruhe *et al.*, 2012]. Une explication possible de l'association observée est que la douleur peut

contribuer à une augmentation de l'inhibition pré-synaptique des afférences musculaires, entraînant une diminution de la rétroaction du fuseau musculaire et une latence prolongée dans le contrôle postural [Yu *et al.*, 2021]. Aucune revue systématique et méta-analyse, à notre connaissance, n'a cependant évalué l'association entre les facteurs psychologiques et les caractéristiques de la douleur, comme l'intensité douloureuse par exemple, ce qui ne nous permet pas à ce jour de tirer de conclusion sur l'influence de ces facteurs sur le contrôle postural. Dans la perspective où la peur du mouvement liée à la douleur serait associée à la menace et à la difficulté de la tâche, nous pouvons nous interroger sur son effet dans des tâches plus complexes telles que des tâches de mobilité.

Une récente revue systématique et méta-analyse s'est intéressée à examiner la relation entre la menace liée à la douleur (peur du mouvement et catastrophisation) et le comportement moteur lors de tâches fonctionnelles chez les adultes lombalgiques [Ippersiel *et al.*, 2022]. Les tâches retenues portaient sur la flexion et l'extension du tronc et la marche [Ippersiel *et al.*, 2022]. Les variables examinées étaient l'amplitude du mouvement du tronc, l'activité musculaire, la coordination des mouvements et la variabilité intra-individuelle [Ippersiel *et al.*, 2022]. Les résultats ont montré que le niveau de peur du mouvement et de catastrophisation était lié à une réduction de l'amplitude de mouvement de la colonne vertébrale en flexion, mais n'était pas lié à l'extension [Ippersiel *et al.*, 2022]. Une plus grande activité des muscles extenseurs du tronc pendant la flexion était modérément liée à la peur du mouvement et à la catastrophisation [Ippersiel *et al.*, 2022]. Concernant la marche, la catastrophisation était liée à une activité du tronc plus élevée, c'est-à-dire une activité musculaire plus importante de l'érecteur du rachis, mais n'était pas liée à la peur du mouvement [Ippersiel *et al.*, 2022]. Enfin, pour la coordination et la variabilité de mouvement intra-individuelle, aucune relation n'a été déterminée, ni pendant une tâche de flexion, ni pendant la marche [Ippersiel *et al.*, 2022]. Ces résultats suggèrent que la menace de la douleur, retrouvée par exemple dans une tâche basée sur la flexion, est associée à un comportement moteur plus prudent chez les patients LCNS [Ippersiel *et al.*, 2022]. Ces résultats seraient expliqués par les croyances des patients sur la "vulnérabilité" de leur colonne vertébrale [Darlow *et al.*, 2014]. Cette menace perçue induirait ainsi une activité musculaire protectrice accrue [Koch et Hänsel, 2018]. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que lors d'une activité telle que la marche, dans un environnement sans contrainte et moins menaçant, les comportements moteurs des patients LCNS ne sont pas corrélés à la peur du mouvement, traduisant ainsi qu'une flexion du tronc semble plus menaçante pour les patients LCNS que la marche en ligne droite [Ippersiel *et al.*, 2022]. De plus, la différence de résultat portant sur la relation entre la peur du mouvement et la catastrophisation sur certains paramètres du comportement moteur semble indiquer que les adaptations motrices à la douleur sont très hétérogènes, et que la peur du mouvement et la catastrophisation ont des relations distinctes avec le comportement moteur [Ippersiel

et al., 2022].

Une seconde revue systématique et méta-analyse a examiné d'autres facteurs psychologiques (dépression, anxiété et auto-efficacité), afin de déterminer si ces derniers étaient associés à une diminution des amplitudes articulaires et à une activité musculaire du tronc plus élevée chez les patients lombalgiques [Christe *et al.*, 2021b]. Les résultats ont révélé que des niveaux plus élevés de peur du mouvement, de catastrophisation et de dépression liés à la douleur étaient associés à des amplitudes de mouvement réduites et à une activité musculaire plus importante [Christe *et al.*, 2021b]. Cette méta-analyse a également évalué si l'intensité de la douleur affectait l'association entre ces facteurs psychologiques et le comportement moteur de la colonne vertébrale [Christe *et al.*, 2021b]. Les résultats n'ont pas montré d'association significative [Christe *et al.*, 2021b]. De plus, une forte intensité douloureuse n'était pas corrélée avec une modification du comportement moteur de la colonne vertébrale [Christe *et al.*, 2021b].

En conclusion, la LCNS semble avoir un effet sur le comportement postural et le comportement moteur, eux-mêmes modulés par les facteurs psychologiques accompagnant la douleur. D'autres résultats portant sur les caractéristiques de la douleur (intensité, durée) laissent penser que ces facteurs influenceraient également les stratégies posturales et motrices, mais d'autres études sont encore à mener pour établir une relation précise. Ces résultats montrent également que plus la tâche à réaliser est complexe et menaçante, comme par exemple réaliser une flexion du tronc à la différence d'une de tâche de locomotion en ligne droite, plus les difficultés des patients LCNS sont importantes. Dans la vie de tous les jours lors d'un déplacement à pieds, il est fréquent de rencontrer des obstacles sur sa trajectoire, nécessitant de s'adapter. Ainsi nous pouvons nous interroger sur l'influence de la LCNS dans des tâches de locomotion faisant intervenir des mouvements plus menaçants, comme tourner les épaules pour passer entre deux objets ou se baisser pour passer sous une barrière. Nous présenterons dans la prochaine section des paradigmes de marche qui se rapprochent de situations de la vie quotidienne et qui ont été éprouvés pour étudier les stratégies perceptivo-motrices des individus dans des environnements complexes, et qui pourraient nous donner de nouvelles informations sur les stratégies de marche des patients LCNS rapportant des difficultés fonctionnelles.

3.2 Navigation dans un environnement encombré

Les paradigmes expérimentaux largement utilisés pour étudier les coordinations perceptivo-motrices mises en jeu durant la locomotion en présence d'obstacles sont ceux de la marche encombrée, i.e. avec un obstacle sur la trajectoire [Patla et Greig, 2006, Vallis et McFadyen, 2003]. Les études précédentes ont par exemple exploré la manière dont un marcheur franchit [Patla et Greig, 2006] ou contourne un obstacle [Vallis et McFadyen, 2003] et

passé à travers des ouvertures horizontales ou verticales [Franchak *et al.*, 2012]. Warren en 1987 [Warren Jr et Whang, 1987] a notamment suggéré que les possibilités fonctionnelles d'action sont déterminées par l'adéquation entre les propriétés de l'environnement et celles du système d'action de l'individu, et qu'elles font appel au concept d'affordance, décrit par Gibson [Gibson, 1979]. Nous présenterons en premier lieu le concept d'affordance, puis trois paradigmes portant sur l'interaction entre un individu et son environnement : tout d'abord dans un environnement statique, puis dans un environnement impliquant des facteurs sociaux et enfin dans un environnement dynamique impliquant deux marcheurs.

3.2.1 Concept d'affordance

3.2.1.1 Affordances et perception directe

Les affordances décrivent les possibilités d'action offertes par l'environnement à un individu [Gibson, 1979, Gibson, 1986]. Le concept d'affordance repose tout d'abord sur l'approche basée sur l'information de la théorie écologique [Fajen *et al.*, 2008]. Cette approche cherche à comprendre le contrôle perceptif de l'action en terme de relation entre l'information qui spécifie les propriétés de l'environnement pertinentes pour l'action et le mouvement réalisé [Fajen *et al.*, 2008]. Dans la théorie écologique, le mouvement émerge du système individu-environnement [Luyat et Regia-Corte, 2009]. Le terme écologique correspond ici à la triangulation entre l'individu, les capacités d'action de cet individu et l'environnement dans lequel il réalise ses actions [Luyat et Regia-Corte, 2009]. Les affordances rendent compte de la réciprocité de la perception et de l'action basée sur la théorie de la perception directe [Fajen *et al.*, 2008]. Celle-ci stipule que la perception de notre environnement n'est pas traitée par l'intermédiaire des représentations internes, comme par exemple des processus cognitifs de haut niveau tels que l'interprétation, et que les informations qui entourent l'individu sont suffisantes pour spécifier les propriétés de l'environnement pertinentes pour l'action [Fajen *et al.*, 2008]. Les affordances n'ont donc pas besoin d'être conçues par l'individu par le biais d'un traitement cognitif mais elles peuvent être directement perçues [Turvey, 1992]. Un environnement donné peut permettre à un individu d'adopter une multitude de comportements [Fajen *et al.*, 2008]. Les affordances permettent cependant de percevoir comment agir lorsqu'un individu est confronté à un ensemble particulier de conditions environnementales [Fajen *et al.*, 2008]. C'est pourquoi les affordances permettent un contrôle prospectif des comportements moteurs des individus [Turvey, 1992], c'est-à-dire que les mouvements sont guidés sur la base d'informations des états futurs de l'environnement [Turvey, 1992]. Le contrôle prospectif désigne les moyens par lesquels les acteurs adaptent à l'avance leur comportement aux contraintes et aux opportunités comportementales qu'induit l'environnement [Turvey, 1992]. La perception joue ici un rôle de préparation dans l'action au fur et à mesure qu'elle se déroule, ainsi qu'un rôle dans l'ajustement de l'action [Fajen *et al.*, 2008]. De plus, les affordances

se baseraient sur la fonction de l'environnement, c'est-à-dire ce que l'environnement offre comme possibilité d'action et non pas sur ses caractéristiques propres telles que sa taille, sa forme, sa couleur [Fajen *et al.*, 2008]. Pour finir, les affordances sont dynamiques [Fajen *et al.*, 2008] : elles peuvent en effet apparaître et disparaître avec les mouvements de l'individu même si l'environnement reste statique, et la réciprocité est vraie, dans le cas où des changements environnementaux se produisent mais que l'individu reste statique [Fajen *et al.*, 2008]. Nous allons ainsi dans la suite de cette section présenter les stratégies d'action décrites dans la littérature se basant sur deux types d'affordances : les affordances à l'échelle du corps et les affordances à l'échelle des capacités d'action [Fajen, 2007].

3.2.1.2 La perception des possibilités d'action à l'échelle du corps

Les affordances à l'échelle du corps décrivent comment un individu réalise ses choix de mode d'action en mettant les propriétés de l'environnement à l'échelle de ses dimensions corporelles [Warren, 1984]. Les premiers travaux s'intéressant aux affordances à l'échelle du corps ont été menés par Warren [Warren, 1984]. Dans une première expérience, utilisant une tâche de jugement visuel, une marche d'escalier de hauteur variable était présentée à deux groupes de participants, petits et grands [Warren, 1984]. Les participants devaient indiquer si oui ou non ils se sentaient capables de monter cette marche sans l'aide de leurs mains [Warren, 1984]. Les résultats ont montré qu'il existait une hauteur critique de marche, définie par un rapport entre la longueur des jambes et la hauteur de la marche égal à 0,88, à partir de laquelle les participants ne se sentaient plus capables de monter la marche uniquement en posture bipède [Warren, 1984]. Alors que la hauteur de marche en valeur absolue était différente entre les deux groupes, cette hauteur exprimée de manière relative à la longueur des jambes était la même entre les participants petits et grands [Warren, 1984]. Des résultats similaires ont été obtenus pour des tâches de hauteur d'assise maximale [Mark et Vogele, 1987], de passage à travers des ouvertures horizontales [Warren Jr et Whang, 1987] et de préhension d'objet [Choi et Mark, 2004]. Ces résultats soutiennent que des points critiques émergent lorsque les limites d'une action sont atteintes et qu'une transition de phase vers une action qualitativement différente se produit.

3.2.1.3 La perception des possibilités d'action à l'échelle de l'action

Dans une seconde expérience, Warren [Warren, 1984] s'est demandé s'il existait une valeur optimale de la hauteur de la marche, correspondant à une dépense énergétique minimale [Warren, 1984]. Cette expérience s'intéressait ainsi aux affordances à l'échelle de l'action, c'est-à-dire comment un individu détermine si un environnement donné permet une action, en prenant en compte les propriétés de l'environnement analysées par rapport à ses propriétés dynamiques. Cette tâche a été réalisée en réel et les résultats ont montré

que la hauteur de marche demandant une dépense énergétique minimale était de 0,25 fois la longueur des jambes et que cette valeur était constante entre les participants petits et grands [Warren, 1984]. Warren [Warren, 1984] a répliqué ensuite cette tâche dans une tâche de jugement visuel et les résultats étaient identiques [Warren, 1984]. Ces résultats soutiennent donc que les individus sont capables de percevoir les possibilités d'action, y compris leurs points optimaux, c'est-à-dire des états préférés dans lesquels une action donnée est la plus confortable ou la plus efficace, en utilisant les propriétés à l'échelle du corps mais également à l'échelle de l'action [Warren, 1984]. D'autres études se sont également intéressées aux capacités d'actions mais cette fois-ci dans un environnement dynamique [Fajen *et al.*, 2011]. Deux conditions ont été comparées, la première où le participant était positionné debout et ne devait pas bouger et une seconde où le participant pouvait se mouvoir [Fajen *et al.*, 2011]. Deux tâches de jugement visuel ont été proposées : la première considérait une tâche de préhension d'une balle qui volait et la seconde le passage à travers un espace qui se rétrécissait [Fajen *et al.*, 2011]. Les résultats ont montré que les jugements étaient tout aussi précis, que les participants soient immobiles ou autorisés à bouger pendant une brève période [Fajen *et al.*, 2011]. Ces résultats indiquent alors que les individus stationnaires et en mouvement semblent connaître aussi bien leurs capacités locomotrices et qu'ils ne se fient pas qu'aux informations perçues au cours du mouvement. Ainsi Gibson [Gibson, 1979] suggère que les humains guident leurs comportements en percevant ce que l'environnement offre ou permet de faire sur la base des informations visuelles disponibles.

3.2.1.4 Les possibilités d'action sont perçues directement à partir des informations contenues dans le flux optique

L'environnement se compose de structures matérielles limitées par des surfaces où la lumière se réfléchit et permet ainsi la perception visuelle [Gibson, 1950]. Les surfaces ne réfléchissent pas la lumière de manière uniforme, et contribuent ainsi à caractériser l'environnement qui nous entoure [Gibson, 1950]. Chaque point d'observation offre un tableau optique unique [Gibson, 1950]. Quand la tête bouge par rapport à l'environnement, un nouveau tableau est observable [Gibson, 1950]. Les transformations se produisant dans la structure de la lumière ambiante liées au mouvement font référence au flux optique [Gibson, 1950]. Le flux optique peut être global, i.e. relatif aux changements de configuration optique générés par le mouvement de l'observateur dans l'environnement et local, i.e. relatif au déplacement des éléments de l'environnement [Gibson, 1950]. Le flux optique contient des informations sur les mouvements propres de l'observateur, sur les éléments qui l'entourent et sur la disposition de l'environnement en trois dimensions qui permet la perception et le contrôle de la mobilité [Gibson, 1950]. Dans le cas de la navigation, deux grandes stratégies ont été décrites pour se diriger vers un but : la première consiste à utiliser le flux optique pour contrôler la direction [Gibson, 1950, Gibson *et al.*, 1955] et

la deuxième consiste à utiliser la distance égocentrique de la cible [Warren, 2021]. Dans le cas d'un déplacement rectiligne d'un observateur, le flux optique véhicule deux paramètres importants identifiés comme le foyer d'expansion et la parallaxe du mouvement (décrit section 3.2.4.1), qui spécifie la direction du déplacement actuel de l'individu [Gibson *et al.*, 1955]. De plus, le flux optique permet de donner des informations sur la vitesse de déplacement propre de l'observateur et/ou de son environnement [Warren, 2021].

3.2.1.5 La perception des possibilités d'action doit être recalibrée à la suite d'un changement à l'échelle du corps ou à l'échelle de l'action

Pour finir, les dimensions du corps et les capacités d'action ne sont pas figées dans le temps. Ainsi, de nombreuses tâches modifient les dimensions corporelles, par exemple porter un objet, et les capacités d'action, par exemple la fatigue [Fajen *et al.*, 2008]. Ainsi, lorsque les dimensions corporelles et les capacités d'action changent, des actions qui étaient auparavant possibles deviennent impossibles. De tels changements impliquent qu'un apprentissage doit être effectué dans la perception des affordances pour permettre aux individus de s'adapter [Fajen *et al.*, 2008]. Cet apprentissage a été par exemple évalué dans une tâche de jugement visuel où les participants devaient dire si oui ou non ils pouvaient s'asseoir sur une chaise selon sa hauteur d'assise [Mark, 1987]. Les conditions prenaient en compte des hauteurs de chaises plus petites et plus grandes que la hauteur de chaise optimale ainsi que des facteurs portant sur la dimension corporelle, i.e. le port de semelles augmentant la taille des participants [Mark, 1987]. Les résultats ont montré que les participants prenaient en compte la taille des semelles en choisissant de s'asseoir sur des hauteurs d'assises auxquelles ils n'auraient pas pu accéder avec leur taille réelle [Mark, 1987]. Une seconde expérience portant sur une tâche de freinage simulé s'est intéressée cette fois-ci au contexte d'affordance à l'échelle de l'action [Fajen, 2005]. Cette tâche comprenait un écran où était projeté un environnement dans lequel les participants avançaient virtuellement [Fajen, 2005]. Un joystick leur était fourni et leur permettait de freiner lorsqu'un panneau STOP s'affichait sur l'écran [Fajen, 2005]. Pendant les premiers blocs de la tâche, tous les participants pouvaient freiner à une décélération constante [Fajen, 2005]. A partir du cinquième bloc, la force de freinage a été augmentée pour un premier groupe, diminuée pour un second et est restée constante pour un troisième groupe [Fajen, 2005]. Les résultats ont montré que immédiatement après la modification de la force de freinage, les participants du premier groupe ont eu tendance à freiner plus fort que nécessaire et les participants du deuxième groupe ont eu tendance à ne pas freiner assez fort. Cependant, au bout d'un ou deux blocs, les participants des deux groupes se sont recalibrés pour freiner au bon moment [Fajen, 2005]. L'ensemble de ces résultats amène à penser que lorsque les dimensions du corps ou les capacités d'action sont modifiées, les individus réajustent leurs affordances pour réaliser l'action.

C'est dans cette perspective que nous présenterons dans la prochaine sous-section trois paradigmes de marche dans différents environnements faisant varier le contexte situationnel et social en s'appuyant sur la théorie des affordances décrite par Gibson [Gibson, 1979, Gibson, 1986], et qui nous semblent intéressants à porter dans de nouvelles études évaluant l'effet de la douleur sur les stratégies de marche dans des environnements complexes.

3.2.2 Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique : tâche de passage à travers des ouvertures horizontales

Les ouvertures sont omniprésentes dans les environnements de la vie quotidienne, qu'il s'agisse d'interstices entre des objets, d'obstacles bas comme une branche d'arbre, d'une porte partiellement fermée ou de passages longs et étroits tels que des couloirs. Ces ouvertures posent un problème de navigation pour la locomotion, notamment lorsqu'elles sont de largeurs plus étroites que les dimensions frontales du corps [Warren Jr et Whang, 1987] ou plus basses que la hauteur du corps [Franchak *et al.*, 2012] (figure 21). Dans certaines situations, les individus doivent alors faire pivoter leur corps [Warren Jr et Whang, 1987] ou se baisser [van der Meer, 1997, Stefanucci et Geuss, 2010] afin de réduire suffisamment leur largeur et hauteur pour passer à travers l'espace. De plus, lorsqu'un itinéraire alternatif est disponible, il est parfois préférable d'éviter complètement l'obstacle et de le contourner [Hackney *et al.*, 2013].

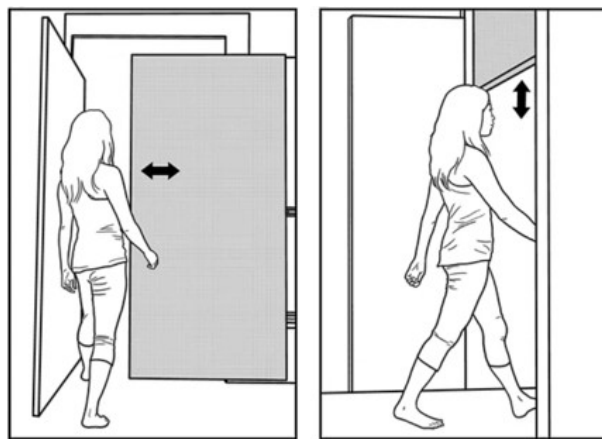


FIGURE 21 – Paradigme de passage à travers une ouverture horizontale (a.) et verticale (b.) d'après Franchak et al. [Franchak *et al.*, 2012].

La perception des possibilités d'action de l'individu détermine alors les stratégies utilisées : (1) l'individu peut franchir l'ouverture sans changer de comportement moteur, (2) l'individu doit réorganiser ses configurations posturales pour franchir l'ouverture ou (3)

l'individu doit modifier son itinéraire pour faire un détour et contourner l'obstacle [Hackney *et al.*, 2013]. Un des paradigmes les plus étudiés récemment est celui du passage à travers des ouvertures horizontales (figure 22) [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney *et al.*, 2014, Hackney *et al.*, 2015b, Warren Jr et Whang, 1987, Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut et Barnett, 2010, Wilmut et Barnett, 2011, Wilmut *et al.*, 2015]. Ce paradigme permet d'investiguer l'adéquation entre les propriétés de l'environnement et celles de l'individu, notamment grâce à la mise en évidence de conditions optimales où l'action est la plus confortable ou efficace et du seuil critique, qui correspond à la largeur d'ouverture pour laquelle les participants changent de mode d'action : en deçà de ce seuil, les participants tournent les épaules pour franchir l'ouverture tandis que pour des largeurs supérieures, ils la franchissent sans les tourner [Warren, 1984]. Cette tâche demande de placer un participant en situation de marche à quelques mètres d'une ouverture, de faire varier la largeur de cette ouverture d'une valeur plus petite à plus grande que la largeur des épaules du participant et de lui demander de la franchir [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney *et al.*, 2014, Hackney *et al.*, 2015b, Warren Jr et Whang, 1987, Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut et Barnett, 2010, Wilmut et Barnett, 2011, Wilmut *et al.*, 2015]. Cette tâche a été utilisée dans différents contextes et populations que nous présenterons dans les prochaines sous-sections, permettant d'évaluer les affordances à l'échelle du corps et de l'action.

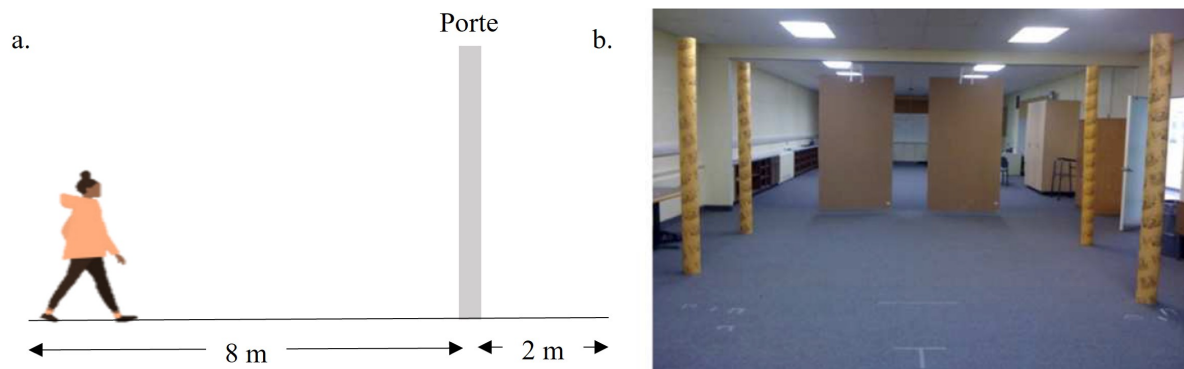


FIGURE 22 – Vue latérale (a.) et vue frontale (b.) du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales d'après Hackney et al. [Hackney et Cinelli, 2011].

3.2.2.1 Affordances à l'échelle du corps

Une des premières études utilisant ce paradigme s'est intéressée à la capacité de franchir différentes largeurs d'ouverture, en faisant varier la vitesse de marche (de confort ou rapide) [Warren Jr et Whang, 1987]. Pour ce faire, ont été comparés deux groupes de participants comprenant des personnes de petites et grandes tailles [Warren Jr et Whang, 1987]. Les participants ont été placés à 7 m de l'ouverture à franchir, délimitée par des murs occultants et dont l'objectif était d'atteindre un but placé derrière cette ouver-

ture [Warren Jr et Whang, 1987]. Les largeurs d'ouvertures allaient d'une largeur de 40 à 80 cm [Warren Jr et Whang, 1987]. Les résultats montrent que l'angle absolu moyen de rotation des épaules varie en fonction de la largeur d'ouverture de façon similaire entre les deux groupes et pour les deux vitesses de marche : il décroît linéairement en fonction de l'élargissement de l'ouverture, jusqu'à atteindre une asymptote [Warren Jr et Whang, 1987]. Concernant la différence entre les groupes, il apparaît que les personnes de petite largeur d'épaules présentent des angles absolus moyens de rotation moins importants que les personnes de grande largeur d'épaules, dans les deux conditions de vitesse [Warren Jr et Whang, 1987]. Concernant la vitesse de marche, il apparaît que cet angle est plus grand pour les essais de marche rapide que pour ceux de marche normale [Warren Jr et Whang, 1987]. Les auteurs ont ensuite examiné l'hypothèse selon laquelle les points critiques sont constants si l'on rapporte la largeur des épaules à la largeur de l'ouverture (rapport E/O). Ils ont montré que les deux groupes avaient environ la même valeur de seuil critique, 1,3, c'est-à-dire que la limite entre les ouvertures franchissables et non franchissables, i.e. sans adaptation de la configuration posturale, se situe à une largeur d'ouverture environ égale à 1,3 fois la largeur des épaules, quelle que soit la largeur des épaules [Warren Jr et Whang, 1987]. Ce paradigme a été répliqué dans de nombreuses études qui montrent des résultats similaires avec une variation du seuil critique compris entre 1,3 et 1,4, suggérant que les participants utilisent une stratégie à partir des propriétés à l'échelle du corps mais laissent également une marge de sécurité [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney *et al.*, 2014, Hackney *et al.*, 2015b, Warren Jr et Whang, 1987, Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut et Barnett, 2010, Wilmut et Barnett, 2011, Wilmut *et al.*, 2015].

3.2.2.2 Affordances à l'échelle de l'action

Les affordances à l'échelle du corps ne suffisent pas à elles seules pour expliquer les choix des modes d'action. En effet, des recherches menées auprès d'adultes plus âgés, qui présentaient une plus grande instabilité posturale caractérisée par des balancements ML du tronc plus élevés et une vitesse de marche plus lente à l'approche de l'ouverture, ont montré qu'ils maintenaient un seuil critique lié au ratio largeur des épaules sur largeur d'ouverture plus élevé que leurs homologues plus jeunes [Hackney et Cinelli, 2011]. Le seuil critique était positivement corrélé à un balancement du tronc accru, c'est-à-dire que les personnes dont le tronc se balançait davantage pendant la marche faisaient pivoter leurs épaules pour des ouvertures plus larges que leurs homologues plus stables [Hackney et Cinelli, 2011]. Ces résultats suggèrent ainsi que la largeur d'ouverture qui évoque le fait de tourner ou non les épaules tient compte de la largeur occupée par l'individu en mouvement. Celle-ci correspond à la somme de la largeur des épaules et du déplacement ML de ces dernières, reflétant les capacités d'action de l'individu.

Hackney et al. [Hackney *et al.*, 2015a] se sont alors intéressés à identifier l'impact des

propriétés à l'échelle de l'action sur les capacités d'action d'adultes jeunes en bonne santé entre différentes largeurs d'ouverture. Pour ce faire, la capacité d'un individu à maintenir son équilibre a été mise à l'épreuve en manipulant le niveau de menace posturale pendant qu'il marchait, soit en réduisant la largeur du chemin de marche et donc en réduisant la taille de la base d'appui, soit en surélevant un chemin de marche pour augmenter le risque associé à l'incapacité de maintenir l'équilibre [Hackney *et al.*, 2015a] (figure 23). Les résultats ont montré tout d'abord que la menace posturale a provoqué une diminution de la vitesse de marche et un balancement du corps plus important à la fois sur le chemin étroit et le chemin surélevé [Hackney *et al.*, 2015a]. De plus, les participants ont commencé à tourner leurs épaules pour des ouvertures plus grandes que pour les essais sans menace posturale dans la situation du chemin surélevé [Hackney *et al.*, 2015a]. Le seuil critique était ainsi plus élevé, ce qui est considéré comme un indicateur d'une approche prudente du franchissement des ouvertures [Comalli *et al.*, 2013, Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b]. Selon les auteurs, la différence de seuil critique entre le chemin étroit et le chemin surélevé s'expliquerait par la peur de la chute, en accord avec les travaux de Comalli et al. [Comalli *et al.*, 2013], qui ont montré que les individus prenaient des décisions plus conservatrices concernant le passage à travers les ouvertures lorsque la pénalité pour l'erreur était la chute, par rapport à une condition où le risque de chute n'était pas présent. Ce comportement plus prudent lors du chemin surélevé a été confirmé par l'évaluation des amplitudes de rotation des épaules au moment de la traversée et montre que, pour une largeur d'ouverture donnée, les rotations d'épaules effectuées sont moins importantes que lors de la marche sur terrain plat [Hackney *et al.*, 2015a]. En effet, il a été notamment montré que la rotation des épaules modifie la vitesse à laquelle le centre de masse se déplace et que plus la rotation des épaules serait importante, plus cela augmenterait le risque d'instabilité [Hackney *et al.*, 2015a]. Ainsi, en tournant moins les épaules sur le chemin surélevé, les individus réduisent le risque d'instabilité et aident à maintenir la trajectoire vers l'avant de leur centre de masse [Hackney *et al.*, 2015a]. Cette stratégie a également été observée dans une population d'adultes plus âgés sur terrain plat, où le seuil critique était plus important, mais la quantité de rotation produite au moment de la traversée était significativement moindre [Hackney et Cinelli, 2011]. Ces résultats soutiennent l'idée que les affordances peuvent être guidées par les capacités d'action d'un individu et que, pendant la locomotion, le niveau de stabilité d'une personne influence le comportement de franchissement des ouvertures [Hackney *et al.*, 2015a]. Nous pouvons nous demander alors quand et comment interviennent la mise en place de ces stratégies d'adaptation ?

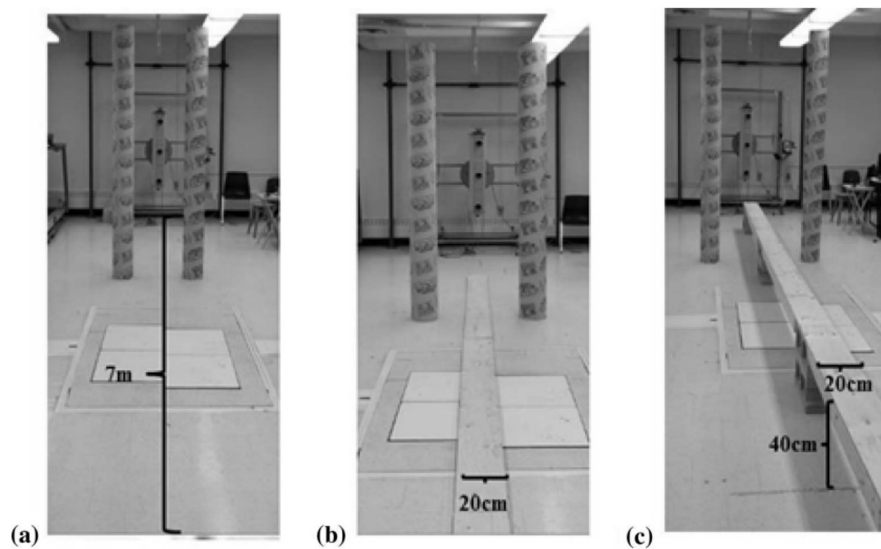


FIGURE 23 – Vue frontale du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir une modification du contexte situationnel : sans modification (a.), chemin étroit (b.) et chemin étroit et surélevé (c.) d’après Hackney et al. [Hackney *et al.*, 2015a].

3.2.2.3 Quand et comment intervient l’adaptation ?

Wilmot et al. [Wilmot et Barnett, 2011] ont examiné comment un individu adapte son mouvement locomoteur pour franchir une ouverture. Ils décrivent trois phases. La première phase est appelée phase de planification initiale et correspond au début du mouvement lorsque l’individu peut percevoir pour la première fois la situation. La seconde phase est appelée phase d’approche : elle débute deux secondes après le début du mouvement et s’achève dans les derniers pas [Montagne *et al.*, 2002] ou dans les deux dernières secondes [Cinelli *et al.*, 2008] avant l’obstacle. Enfin, la troisième phase, l’adaptation, correspond aux derniers pas avant l’obstacle pendant lesquels une adaptation du mouvement est opérée. Ces auteurs ont analysé l’angle de rotation des épaules et la vitesse de marche avant le franchissement d’une ouverture et ont montré que pendant la phase d’approche, l’angle de rotation des épaules et la vitesse de marche ne dépendaient pas de la largeur d’ouverture [Wilmot et Barnett, 2011]. D’après les auteurs, ce résultat suggère que les participants initient leur mouvement locomoteur selon un modèle généralisé qui est ensuite mis à jour et adapté à la taille de l’ouverture [Wilmot et Barnett, 2011]. Pendant la phase d’adaptation, cette étude montre que l’angle de rotation des épaules est proportionnel au rapport entre la largeur de l’ouverture et la largeur des épaules, comme décrit précédemment [Wilmot et Barnett, 2011]. Concernant la vitesse de marche, cette étude montre qu’une réduction de la vitesse est observée indépendamment de la nécessité d’une rotation des épaules, c’est-à-dire même pour des ouvertures où un changement n’est pas nécessaire [Wilmot et Barnett, 2011]. L’objectif de la réduction de la vitesse peut être

triple : (1) donner au système visuo-moteur plus de temps pour traiter l'information et planifier une réponse [Cinelli *et al.*, 2008], (2) être lié à un changement de direction [Patla, 1991], et (3) être un mécanisme de protection pour minimiser les blessures en cas de collision. Cette troisième option est suggérée par Wilmut *et al.*, [Wilmut et Barnett, 2011], qui propose que l'adaptation de la vitesse de marche a une fonction distincte du besoin de rotation des épaules pour des ouvertures moins larges que la taille des épaules. Ainsi, la réduction de la vitesse se produit plus tard dans le mouvement si la taille de l'ouverture augmente [Wilmut et Barnett, 2011]. Comme présenté dans la section 3.2.1.5, de nombreuses tâches modifient les dimensions corporelles et les capacités d'action [Fajen *et al.*, 2008]. Lorsque ces modifications interviennent, quelles sont les stratégies utilisées par les individus ?

3.2.2.4 Modification des conditions à l'échelle du corps, de l'action et recalibration

Les dimensions du corps ne sont pas toujours constantes au cours des activités locomotrices. Par exemple, tenir un sac de course ou porter un objet plus large que soi les modifient. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'effet des modifications des dimensions corporelles et des possibilités d'action dans une tâche de franchissement d'une ouverture [Higuchi *et al.*, 2006, Hackney *et al.*, 2014]. Higuchi *et al.* [Higuchi *et al.*, 2006] se sont notamment intéressés à l'effet de modification corporelle artificielle : port d'une barre permettant la rotation des épaules, d'une barre ne permettant pas la rotation des épaules et déplacement en fauteuil roulant, tout en franchissant une ouverture étroite (figure 24). Les résultats ont montré que lorsque la contrainte artificielle du corps permettait une rotation des épaules, les mêmes stratégies d'adaptation (mesurées par l'angle absolu moyen de rotation et la vitesse de marche) que dans la condition sans contrainte artificielle du corps ont été utilisées par les participants [Higuchi *et al.*, 2006]. Cependant, lorsque les rotations des épaules étaient restreintes (marche avec une barre empêchant la rotation ou un fauteuil roulant), une forte réduction de la vitesse de déplacement a été observée alors que les participants s'approchaient de l'ouverture, et ce ralentissement dépendait de la largeur de l'ouverture : plus l'ouverture était étroite plus la vitesse diminuait [Higuchi *et al.*, 2006]. Ces résultats révèlent que les contraintes de mouvement sur la rotation des épaules sont probablement un facteur critique pour déterminer si une adaptation rapide et réussie a lieu [Higuchi *et al.*, 2006].

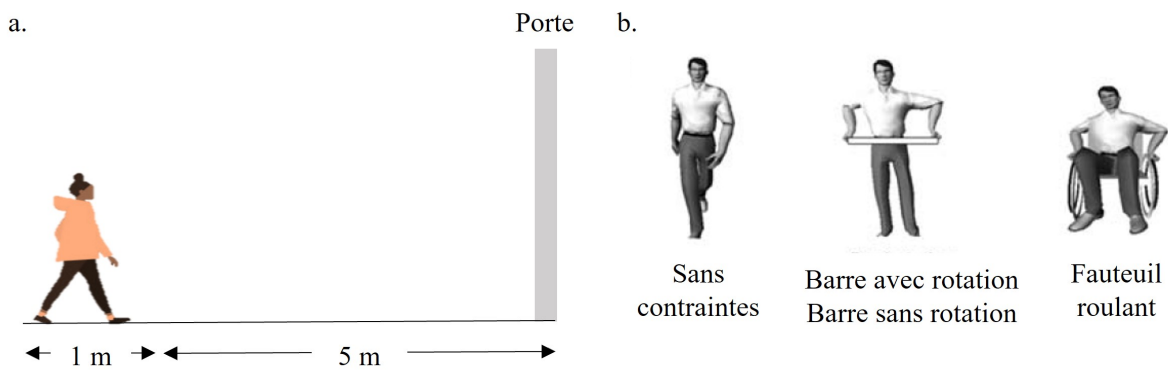


FIGURE 24 – Vue latérale (a.) et conditions expérimentales (b.) du protocole de passage à travers des ouvertures horizontales d’après Higuchi et al. [Higuchi *et al.*, 2006].

Hackney et al., [Hackney *et al.*, 2014], ont voulu aller plus loin en déterminant si les individus adaptaient leur point critique à leur dimension corporelle ou à la dimension horizontale la plus large (largeur d’une barre latérale), dans un espace non-confiné où les participants pouvaient décider de franchir l’ouverture ou de la contourner [Hackney *et al.*, 2014] (figure 25). Pour l’ensemble des essais sans contrainte de largeur corporelle, les participants ont préféré franchir l’ouverture tout en tournant les épaules quand les largeurs d’ouverture étaient inférieures à 1,3 fois la largeur de leurs épaules [Hackney *et al.*, 2014]. Pour les essais avec une contrainte de largeur corporelle, les participants ont toujours préféré contourner l’obstacle lorsque la largeur de l’ouverture était de la même largeur que la barre latérale ; ils n’ont donc pas tourné les épaules [Hackney *et al.*, 2014]. Les seuils critiques obtenus pour les essais sans contrainte de largeur corporelle étaient significativement inférieurs à ceux obtenus pour les essais avec une contrainte de largeur corporelle [Hackney *et al.*, 2014]. Les auteurs se sont alors intéressés à l’ordre de présentation des essais. Les résultats ont montré que pour les deux premiers essais (sur trois), le seuil critique était significativement supérieur pour la condition avec contrainte de largeur corporelle en comparaison avec la condition sans contrainte [Hackney *et al.*, 2014]. Ces résultats suggèrent que les participants s’adaptent aux contraintes à l’échelle du corps au cours des essais [Hackney *et al.*, 2014]. Pour aller plus loin, les auteurs ont regardé s’il existait un profil d’adaptation entre les individus [Hackney *et al.*, 2014]. Les résultats ont montré qu’il existait deux profils : un profil avec une adaptation rapide (ces participants présentaient un point critique semblable entre les essais sans et avec contrainte de largeur corporelle) et un profil lent (ces participants surestimaient leur largeur corporelle lors des premiers essais pour atteindre au troisième essai le même point critique que dans la condition sans contrainte de largeur corporelle) [Hackney *et al.*, 2014]. Ces résultats suggèrent que les individus peuvent s’adapter à l’augmentation de la largeur de leur corps en modifiant leurs actions en fonction de leurs nouvelles caractéristiques corporelles, mais que cette adaptation s’effectue à des rythmes différents selon les individus.

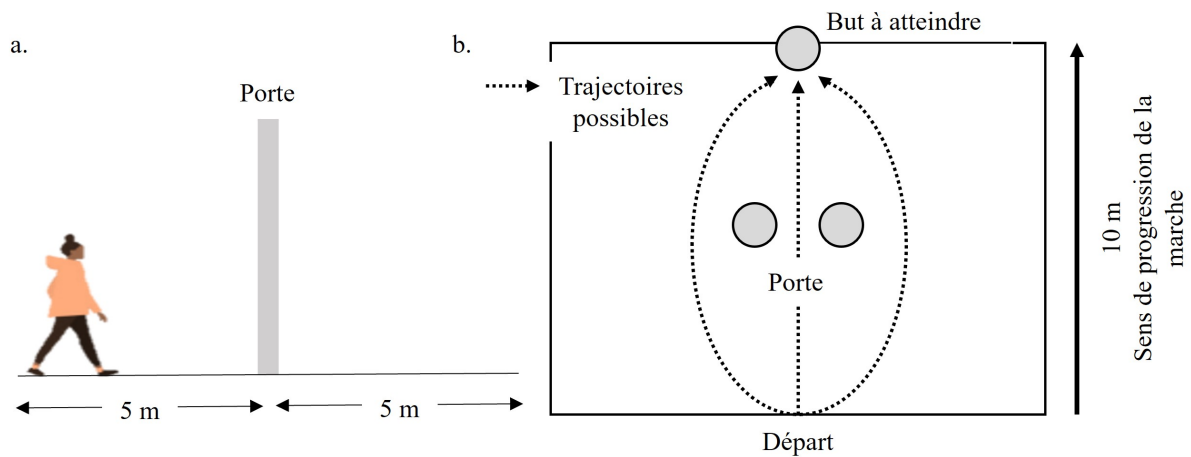


FIGURE 25 – Vue latérale (a.) et vue du dessus (b.) du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales dans un espace non-confiné d’après Hackney et al. [Hackney *et al.*, 2014].

En conclusion, le paradigme de locomotion à travers des ouvertures horizontales montre que les individus utilisent les affordances à l’échelle du corps et de l’action pour répondre aux contraintes de l’environnement. Les individus sont également capables de s’adapter à de nouvelles contraintes portant sur les dimensions corporelles et sur l’action. Dans la vie quotidienne, ce paradigme de passage à travers des ouvertures est fréquent mais ne porte pas toujours sur une ouverture unique, ni sur un obstacle ressemblant à une porte. En effet, ce paradigme pourrait être généralisé dans des situations telles que slalomer entre plusieurs obstacles ou bien contourner une personne sur sa trajectoire. Dans la prochaine sous-section, nous présenterons les travaux menés sur le paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique faisant varier des facteurs situationnels mais également sociaux.

3.2.3 Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement statique faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux : tâche de passage à travers des ouvertures horizontales

3.2.3.1 Modification des facteurs situationnels

Semblable aux travaux portant sur le franchissement d’ouvertures, une étude s’est intéressée cette fois-ci à une tâche de franchissement d’ouverture dans un espace non-confiné : les participants pouvaient contourner l’ouverture s’ils le souhaitaient [Hackney *et al.*, 2013]. Cette étude a révélé que les individus modifiaient leurs actions lorsque la largeur des ouvertures devenait inférieure à 1,4 fois la taille de leurs épaules [Hackney *et al.*,

2013]. Ces résultats suggèrent que même lorsque de jeunes adultes ne sont pas confinés à un chemin ou à une action particulière, ils continuent d'utiliser les informations à l'échelle du corps comme paramètres de contrôle pour déterminer si une ouverture est franchissable ou non [Hackney *et al.*, 2013]. De plus, il a été montré que lorsque des poteaux créaient une ouverture inférieure à celle du seuil critique, les individus choisissaient de modifier leur trajectoire et de les contourner plutôt que de passer par l'ouverture [Hackney *et al.*, 2013]. Cette différence de stratégie entre espace confiné et espace non confiné peut être due à un désir de maintenir la stabilité et/ou l'élan [Hackney *et al.*, 2013]. En effet, les participants ont utilisé majoritairement une stratégie par étapes, en augmentant la base d'appui au point de déviation de trajectoire dans les essais d'évitement, indiquant une stratégie d'action stable [Hackney *et al.*, 2013]. Pour les essais dans lesquels la base d'appui était réduite, l'élan a été préservé par le placement du pied dans la direction du déplacement [Hackney *et al.*, 2013]. Les auteurs suggèrent que ces stratégies suivent les lois de contrôle pour les comportements de changement de direction, d'évitement d'obstacles et de sélection d'itinéraire décrites par Fajen et Warren [Fajen et Warren, 2003, Warren et Fajen, 2008]. La sélection du chemin serait guidée par l'attraction des buts à atteindre et par la répulsion des obstacles, et les individus choisiraient le chemin le plus approprié tenant compte de ces dynamiques [Fajen et Warren, 2003]. Ce modèle est basé sur la distance aux buts et aux obstacles ainsi que sur le changement de signe de l'angle de gisement [Warren et Fajen, 2008]. L'angle de gisement est l'angle sous lequel apparaissent les buts et les obstacles par rapport à la direction de la marche [Warren et Fajen, 2008]. Hackney *et al.* [Hackney *et al.*, 2013] suggèrent alors que dans la présente tâche, la présence de deux poteaux situés côte à côte créerait une force de répulsion non seulement entre l'individu et les poteaux, mais également entre les poteaux, c'est-à-dire l'ouverture [Hackney *et al.*, 2013]. Lorsque l'ouverture est plus grande que le seuil critique, les poteaux seraient suffisamment éloignés et la force d'attraction de l'objectif serait supérieure aux forces de répulsion entre les poteaux, amenant les individus à franchir l'ouverture [Hackney *et al.*, 2013]. Au contraire, lorsque l'ouverture est inférieure au seuil critique, la répulsion des poteaux convergerait et l'emporterait sur l'attraction du but, obligeant les individus à modifier leur trajectoire [Hackney *et al.*, 2013]. De plus, les résultats ont montré que les individus n'ajustaient pas leur vitesse de marche avant de contourner l'ouverture [Hackney *et al.*, 2013]. Cela peut s'expliquer par le fait que les réductions de vitesse sont liées à des tâches où une rotation des épaules est nécessaire, ou que la distance entre le point de départ et l'ouverture à franchir n'est pas suffisante pour atteindre une vitesse de marche assez rapide pour justifier une réduction avant d'initier le changement de direction de la locomotion [Hackney *et al.*, 2013]. Pour finir, ces auteurs ont également montré que les individus initiaient le changement de direction pour contourner les poteaux à une distance constante quelle que soit la largeur de l'ouverture [Hackney *et al.*, 2013]. Ces résultats révèlent que les actions d'évitement d'obstacles se basent sur

les informations de temps de contact (décrit dans la section 3.2.4.2), grâce à la mise en évidence d'une distance d'évitement et d'une vitesse de marche constantes entre les obstacles, et non sur la stabilité dynamique, c'est-à-dire un angle de déviation constant qui aurait été mis en évidence par une amorce de changement de direction plus précoce pour les ouvertures plus larges [Hackney *et al.*, 2013].

3.2.3.2 Modification des facteurs situationnels et sociaux

Naviguer dans des environnements dans lesquels sont présents d'autres personnes est une tâche que nous rencontrons quotidiennement. Un des concepts fondamentaux permettant de décrire l'évitement de collision est celui de la proxémie, qui décrit la manière dont les humains gèrent l'espace au cours de leurs interactions avec leur environnement [Hall, 1963]. L'espace personnel peut être considéré comme un territoire autour d'un individu qui se déplace en même temps que lui et que les autres ne doivent pas envahir. Celui-ci régule la distance psychophysique que l'individu doit maintenir pour se sentir à l'aise [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005, Gérin-Lajoie *et al.*, 2008]. Cet espace, lors du contournement d'obstacles chez les jeunes adultes durant la locomotion, a une forme elliptique, et montre que le déplacement du centre de masse autour de l'obstacle n'est pas effectué au hasard, mais plutôt avec des transitions systématiques et graduelles [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Le fait que l'axe longitudinal de l'espace personnel soit plus long qu'en latéral permet de fournir une zone de sécurité suffisamment grande pour garantir un temps acceptable pour percevoir les dangers à venir et pour adapter la démarche [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. L'axe latéral de l'espace personnel quant à lui garantit le maintien d'un espace libre à tout moment pour permettre au corps de se déplacer dans l'environnement tout en évitant les contacts avec les obstacles [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Ainsi, l'espace personnel est une zone de sécurité flexible maintenue autour du corps pendant la marche [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Il est utilisé par le système de contrôle de la locomotion pour naviguer entre les obstacles en toute sécurité [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. La préservation systématique d'un espace personnel ajusté en fonction de différents contextes situationnels a notamment été montré et indique que les participants ont pris en compte les dimensions de leur espace de protection pour réguler les adaptations locomotrices lorsqu'ils évitent les obstacles (point d'initiation de déviation de la trajectoire, vitesse de marche, raccourcissement du pas) [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005, Gérin-Lajoie *et al.*, 2008]. De plus, l'espace personnel semble être impacté par la nature de l'obstacle à contourner, comme l'ont montré Sanz *et al.* [Sanz *et al.*, 2015], comparant un obstacle humain et un obstacle non anthropométrique (une boîte en carton). Les résultats ont montré que la déviation initiale (début du contournement) est plus précoce et la zone de dégagement (distance entre l'individu et l'obstacle) plus importante dans le cas d'un obstacle humanoïde que dans le cas d'un obstacle inanimé [Sanz *et al.*, 2015]. L'orientation de l'obstacle humain avait aussi son importance, puisque les participants laissaient une plus grande distance lorsqu'ils passaient en face de ce dernier,

plutôt que à côté ou dans son dos.

Des études se sont ainsi intéressées à complexifier la tâche de passage à travers une ouverture horizontale en comparant si le choix du mode d'action différait selon que l'ouverture était encadrée par des poteaux ou des humains [Hackney *et al.*, 2015b] (figure 26). Les résultats ont montré que lorsque des humains étaient placés de chaque côté de l'ouverture, le seuil critique était plus élevé (i.e., les participants tournaient les épaules pour des ouvertures plus larges) que lorsque l'ouverture était délimitée par des poteaux. De plus, les participants effectuaient des rotations plus importantes, laissant un espace plus large entre leurs épaules et les humains au moment de l'exécution de l'action, et ils marchaient plus lentement [Hackney *et al.*, 2015b]. Il semble donc que la capacité à franchir des ouvertures change lorsqu'on marche entre deux personnes ou deux objets, et que les individus prennent plus d'espace et sont plus prudents lorsque les obstacles sont humains [Hackney *et al.*, 2015b]. Il est possible que la plus grande prudence observée soit due au fait que les personnes tiennent compte d'un espace personnel plus important pour les obstacles humains, et ainsi que le degré de prudence soit lié à des facteurs sociaux [Hackney *et al.*, 2015b].

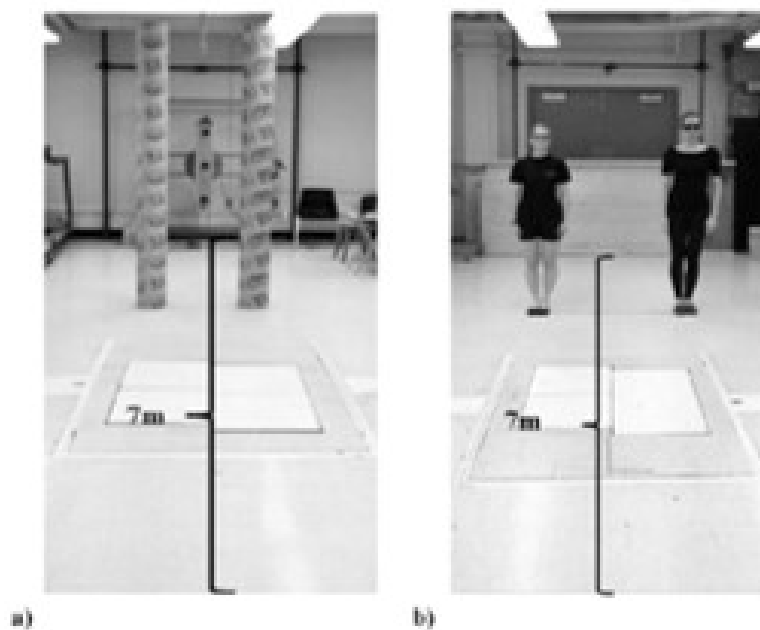


FIGURE 26 – Vue frontale du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux : ouverture formée par deux poteaux (a.) et ouverture formée par deux humains (b.) d'après Hackney et al. [Hackney *et al.*, 2015b].

Deux nouveaux éléments sont proposés par Tomono et al. [Tomono *et al.*, 2019] pour compléter les résultats. Le premier concerne la structure anisotrope de l'espace person-

nel, renvoyant à sa forme elliptique [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005] (figure 27.a.). Ces auteurs suggèrent que les participants ne vont pas se comporter de la même façon si des humains placés à la place des poteaux sont tournés vers l'ouverture à franchir, dans le sens opposé, face aux participants ou dos aux participants [Tomono *et al.*, 2019] (figure 27.b.). Le second élément concerne la taille de l'obstacle à franchir : les auteurs suggèrent qu'il n'est pas possible de savoir pour quelle largeur d'ouverture les participants ont changé de comportement moteur dans le cas d'obstacles humains, car la largeur variait en fonction du niveau du corps humain (niveau des yeux, niveau des épaules, etc.) [Tomono *et al.*, 2019] (figure 27.d.). Pour pallier ce biais, les auteurs ont placé les humains dans des cadres en forme de boîte pour contrôler la largeur entre les deux obstacles humains [Tomono *et al.*, 2019] (figure 27.e.). Les résultats ont montré que la rotation des épaules était plus importante pour les essais où les obstacles humains étaient tournés vers l'ouverture que lorsque l'ouverture était formée par des poteaux [Tomono *et al.*, 2019]. Les auteurs suggèrent que les participants ont observé l'espace personnel anisotrope des obstacles humains, qui chevauche l'ouverture dans la condition "face à face" [Tomono *et al.*, 2019]. De plus, la direction préférée de la rotation des épaules différait selon la configuration des obstacles humains [Tomono *et al.*, 2019]. En particulier, pour les conditions où les deux obstacles humains étaient tournés soit vers la gauche, soit vers la droite [Tomono *et al.*, 2019], les participants ont préféré tourner leurs épaules de manière à tourner le dos à l'obstacle humain tourné vers eux [Tomono *et al.*, 2019]. En outre, les participants ont tourné les épaules plus tôt lorsque les obstacles humains étaient tournés vers eux [Tomono *et al.*, 2019]. Concernant la zone de dégagement le participant modifiait sa position lorsque l'ouverture était suffisamment large pour pouvoir mettre plus d'espace entre lui et l'obstacle humain tourné vers lui [Tomono *et al.*, 2019]. Pour finir, la vitesse de marche n'est pas différente selon les conditions [Tomono *et al.*, 2019]. Cependant, les participants semblent avoir opté pour des stratégies différentes selon la largeur de l'ouverture [Tomono *et al.*, 2019]. Ainsi, pour les grandes largeurs d'ouverture, les participants ont dévié leur trajectoire pour s'éloigner des obstacles humains et lorsque les largeurs d'ouverture étaient plus étroites les participants ont plus tourné les épaules [Tomono *et al.*, 2019]. Le seuil critique a été calculé pour chaque condition et les résultats montrent que quand les obstacles humains regardaient dans la direction du participant, le seuil critique était alors plus élevé [Tomono *et al.*, 2019].

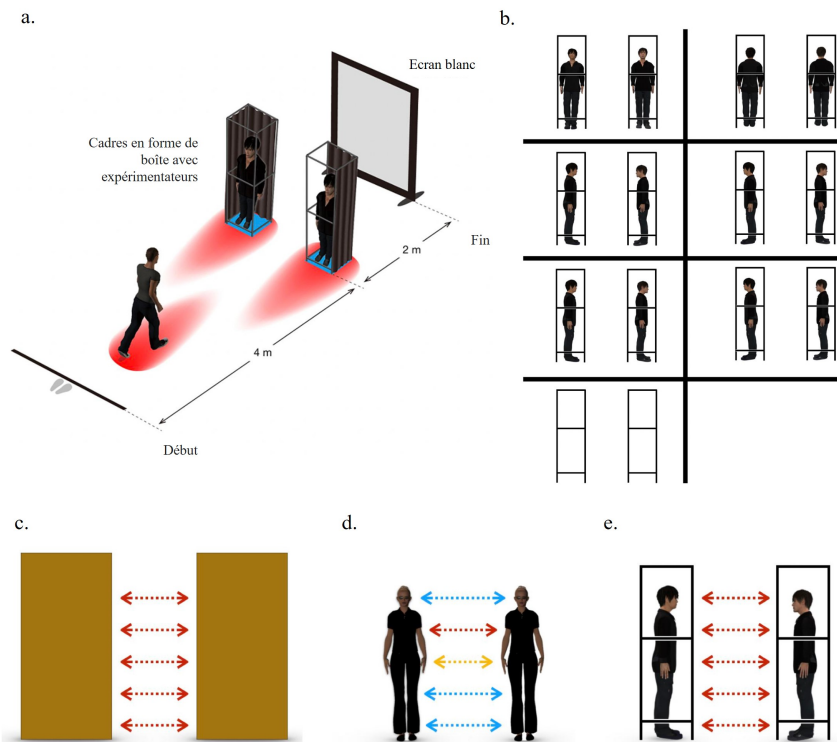


FIGURE 27 – Dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir des facteurs sociaux et environnementaux : a. mise en évidence de la forme anisotrope de l'espace personnel et b. configuration des humains placés à la place des poteaux, c. ouverture formée par deux panneaux, d. ouverture formée par deux humains et e. ouverture formée par deux humains placés dans des cadres en forme de boîte normalisant les niveaux du corps humain d'après Tomono et al. [Tomono *et al.*, 2019].

Une troisième étude s'est quant à elle intéressée à déterminer la préférence des participants entre deux ouvertures délimitées par trois formes humanoïdes et orientées selon différentes configurations : "face à face", "dans la même direction" ou "dos à dos" [Makino *et al.*, 2023] (figure 28). Les résultats montrent tout d'abord que les participants perçoivent un espace de passage plus large pour la condition "dos à dos" que "face à face" [Makino *et al.*, 2023]. Concernant le choix de l'ouverture franchie, en comparant les configurations, les résultats ont montré que les participants préféreraient franchir la configuration "dos à dos" aux deux autres configurations [Makino *et al.*, 2023]. Pour la configuration "dans la même direction", les participants ont préférentiellement choisi de passer derrière la forme humanoïde placée au centre des deux ouvertures [Makino *et al.*, 2023]. Les auteurs suggèrent, comme pour l'étude précédente, que ces résultats sont basés sur l'anisotropie de l'espace personnel [Makino *et al.*, 2023]. La direction dans laquelle la forme humanoïde est orientée indique une possibilité ou une tendance de déplacement dans cette direction [Makino *et al.*, 2023]. Ainsi, la préférence des participants peut se baser sur la perception de la direction potentielle dans laquelle la forme humanoïde pourrait se déplacer [Makino *et al.*, 2023]. Dans ce cas, les participants choisiraient une option plutôt qu'une autre pour éviter

de passer par l'ouverture qui pourrait entraîner une collision [Makino *et al.*, 2023].

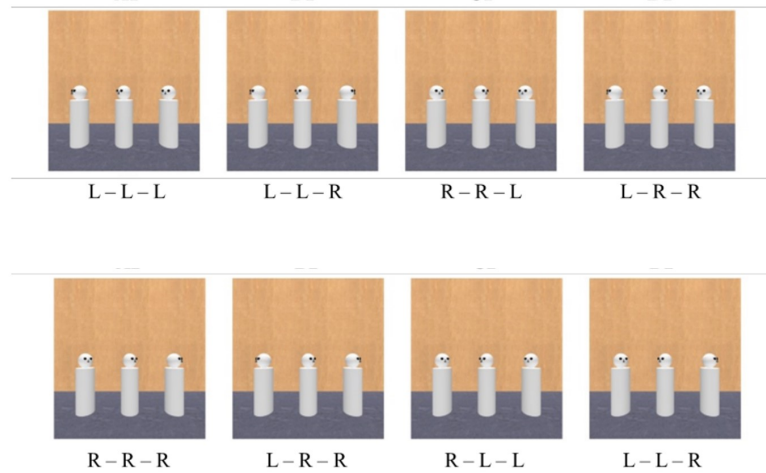


FIGURE 28 – Conditions expérimentales d'une tâche décisionnelle de passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir des facteurs sociaux et environnementaux d'après Makino *et al.* [Makino *et al.*, 2023]. "L" correspond à la direction gauche vers laquelle est tournée la forme humanoïde. "R" correspond à la direction droite vers laquelle est tournée la forme humanoïde.

En conclusion, la généralisation du paradigme de passage à travers une ouverture dans des situations se rapprochant de la vie quotidienne, comme avoir la possibilité de contourner l'ouverture, semble basée sur des lois de contrôle. Ainsi, la sélection du chemin est guidée par l'attraction des objectifs et la répulsion des obstacles. Une force d'attraction de l'objectif supérieure à celle de la répulsion des obstacles permet de maintenir la sélection du chemin. A l'inverse, dans d'autres situations, une répulsion des obstacles trop importante conduit à modifier la sélection du chemin pour atteindre l'objectif. Cependant, dans la situation où le paradigme de passage à travers une ouverture fait intervenir des facteurs sociaux avec la présence d'un individu, d'autres facteurs semblent intervenir, comme notamment la structure anisotrope de l'espace personnel du marcheur mais également celle de la personne qu'il faut contourner. L'ensemble des études précédemment citées ont été effectuées dans des environnements statiques. Qu'en est il dans un environnement dynamique où les possibilités d'action sont plus incertaines ?

3.2.4 Paradigme de locomotion en interaction avec un environnement dynamique : tâche de croisement entre deux marcheurs

La locomotion dans des environnements complexes et dynamiques fait partie intégrante des nombreuses activités quotidiennes, notamment la marche dans des espaces très

fréquentés, la conduite sur des routes ou la pratique d'un sport. Ces tâches impliquent des interactions avec des objets en mouvement, c'est-à-dire qu'elles nécessitent que les individus coordonnent leurs propres mouvements avec ceux d'autres objets [Fajen *et al.*, 2008]. Dans le cas de la locomotion, lorsqu'il se déplace dans un environnement encombré, le piéton doit acquérir des informations pour détecter les dangers potentiels et pour surveiller l'évolution de l'environnement [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Les adaptations de la marche, c'est-à-dire les déviations d'orientation, la tendance à réduire la vitesse et à raccourcir le pas avant de contourner un obstacle en mouvement, reflètent les stratégies adoptées par les individus pour contourner les obstacles [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Reagan et Gray [Regan et Gray, 2000] ont proposé deux analyses pour la détection et l'évitement d'obstacle : la première porte sur la trajectoire et la seconde sur la vitesse. L'analyse de la trajectoire, c'est-à-dire " *Est-ce que la trajectoire de l'individu va croiser l'obstacle?* " et l'analyse de la vitesse, c'est-à-dire " *Est-ce qu'un changement de vitesse doit se produire pour éviter l'obstacle?* " font appel à deux notions : le flux optique [Gibson, 1950, Cutting *et al.*, 1995] et le temps restant avant le contact, appelé *time-to-contact* (TTC) [Lee, 1976].

3.2.4.1 Flux optique

Tout d'abord, la capacité à percevoir le mouvement d'objets pendant son propre mouvement et à le coordonner avec celui d'autres objets est obtenue en s'appuyant sur les informations contenues dans le flux optique, c'est-à-dire le modèle de mouvement optique généré par le déplacement dans l'environnement [Gibson, 1950]. Deux caractéristiques du flux optique sont décrites : le foyer d'expansion et la parallaxe du mouvement qui décrit l'impression de profondeur obtenue lorsque l'individu se déplace par rapport aux objets environnants [Cutting *et al.*, 1995]. Ainsi, lorsqu'un individu se déplace dans un environnement, les objets à proximité semblent se rapprocher très vite et dans le sens opposé alors que l'environnement au loin semble se déplacer lentement et dans le même sens que l'individu [Cutting *et al.*, 1995]. Cette différence de vitesse est appelée déplacement parallaxique différentiel et permet de déterminer si une collision va avoir lieu [Cutting *et al.*, 1995]. Trois situations sont décrites pour connaître l'emplacement de l'objet mobile sur la trajectoire [Cutting *et al.*, 1995]. Dans la première situation où l'observateur passe devant l'obstacle mobile, les objets ou texture de l'arrière plan se déplacent de façon rétrograde par rapport à l'obstacle, il n'y a pas de collision [Cutting *et al.*, 1995]. Dans la deuxième situation où l'observateur passe derrière l'obstacle mobile, les objets ou texture de l'arrière plan et de l'obstacle se déplacent à la même vitesse et il n'y a pas de collision. Dans la dernière situation où un risque de collision est apparent, les objets ou textures du premier plan se déplacent plus vite que ceux de l'arrière plan et une collision est imminente [Cutting *et al.*, 1995]. Un second élément pour estimer si une collision va se produire est l'angle de gisement formé entre la direction du regard sur l'objet mobile et la direction de marche de l'observateur [Cutting *et al.*, 1995]. Dans les trois situations

précédemment citées, si l'angle augmente, l'observateur passe devant l'obstacle, si l'angle diminue, l'observateur passe derrière et si l'angle est constant, l'observateur se dirige vers une collision imminente [Cutting *et al.*, 1995].

3.2.4.2 Time-to-Contact

Le deuxième élément pour appréhender un obstacle est la détermination du temps restant avant la collision (TTC) [Lee, 1976]. Le TTC est ainsi défini comme le temps qui sépare la position actuelle d'un objet de sa position spatiale finale [Baurès *et al.*, 2018]. L'une des variables utilisées pour aborder ce paramètre est le modèle tau-dot ($\dot{\tau}$) décrit par Lee [Lee, 1976] en 1976, où $\dot{\tau}$ est la dérivée temporelle première de τ définie comme le rapport entre l'angle optique et le taux d'expansion de l'objet [Lee, 1976]. Le taux d'expansion permet d'expliquer comment le TTC peut être directement perçu dans le flux optique sans estimer au préalable la distance et la vitesse d'approche de l'objet et est ainsi invariant [Fajen *et al.*, 2008]. D'autres variables seraient également utilisées comme les informations binoculaires, qui correspondent à la différence de position d'un objet dans l'image entre l'oeil droit et l'oeil gauche [Rushton *et al.*, 1999] et l'influence de la taille de l'objet et de sa vitesse d'approche [Fajen et Devaney, 2006].

3.2.4.3 Syntonie

Sur la base de ces études, des auteurs ont proposé qu'il existait une harmonisation des perceptions faisant appel à la notion de syntonie perceptive [Fajen *et al.*, 2008]. Celle-ci implique que les individus sont flexibles dans leur capacité à s'adapter aux changements de contraintes de la tâche, des critères de réussites et de la disponibilité de l'information [Fajen *et al.*, 2008]. L'adaptation des comportements serait alors issue des apprentissages et, par exemple dans le cas de la pratique sportive, les experts et les novices s'appuieraient sur des informations différentes pour l'action [Fajen *et al.*, 2008]. Il a notamment été montré que les novices utilisaient des variables optiques qui n'étaient pas invariantes comme la taille et la vitesse de l'objet, entraînant des biais de performances, alors que les individus experts utilisaient des stratégies basées sur des variables optiques invariantes, qui permettaient d'accomplir la tâche avec plus de succès [Fajen *et al.*, 2008]. Ces résultats suggèrent que différents facteurs peuvent influencer les informations sur lesquelles s'appuie l'individu pour produire une action.

3.2.4.4 Tâche de croisement de piétons

L'un des paradigmes permettant d'évaluer une tâche de locomotion dans un environnement dynamique est celui de l'interaction entre deux marcheurs. En effet, lorsque deux humains marchent à proximité l'un de l'autre, chacun peut être considéré comme un obstacle mobile pour l'autre (figure 29). Olivier et al. [Olivier *et al.*, 2012] se sont intéressés

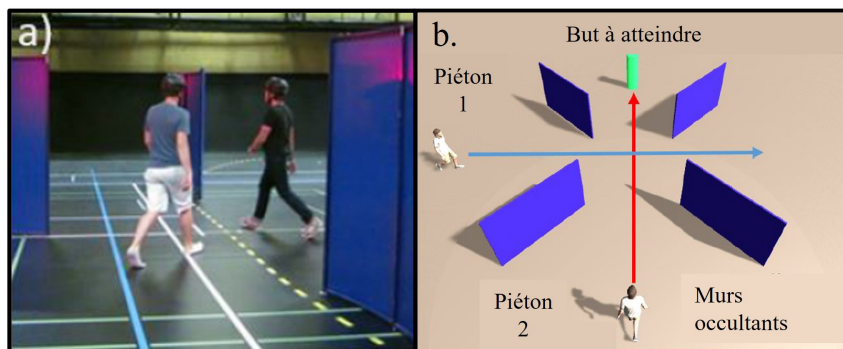


FIGURE 29 – Dispositif expérimental de la tâche de croisement de piéton : a. Photo du dispositif et b. représentation du dispositif d'après Berton et al. [Berton *et al.*, 2019].

aux métriques permettant de caractériser la situation d'interaction. Ils ont alors considéré le risque futur de collision. Étant données les positions et orientations relatives des marcheurs et leurs vitesses de marche, cette variable est calculée comme la distance future de croisement si aucunes modifications de la vitesse et de l'orientation ne sont effectuées par les marcheurs [Olivier *et al.*, 2012]. Cette métrique a été nommée "Minimum Predicted Distance" (MPD) [Olivier *et al.*, 2012]. Elle peut être calculée à chaque instant de l'interaction. Les études antérieures ont montré qu'une modification de la trajectoire de marche était observée si la MPD au début de l'interaction était inférieure à un mètre [Olivier *et al.*, 2012]. Cette valeur indique que les marcheurs adaptent leur trajectoire de marche uniquement si cela est nécessaire i.e. si la distance future de croisement au début de l'interaction est trop faible [Olivier *et al.*, 2012]. Trois phases ont été mises en évidence pendant l'interaction grâce à l'analyse de l'évolution de la MPD au cours du temps [Olivier *et al.*, 2012] : 1) une phase d'observation pendant laquelle les marcheurs ne modifient pas leur trajectoire de marche (la MPD est constante), 2) une phase de réaction pendant laquelle les marcheurs modifient leur trajectoire de marche afin d'augmenter la distance future de croisement (la MPD augmente), 3) et enfin une phase de régulation pendant laquelle la MPD est maintenue à un niveau constant. L'adaptation de la trajectoire de marche pendant la phase de réaction s'effectue par une modification de la vitesse (accélération, décélération) et/ou de la direction (contournement) [Olivier *et al.*, 2012]. La phase de régulation quant à elle montre que l'adaptation des trajectoires de locomotion est terminée avant la fin de l'interaction et donc que ces stratégies sont anticipées [Olivier *et al.*, 2012]. Pour finir, il a été observé que, bien que la situation d'évitement de collision soit une tâche impliquant la collaboration entre les deux marcheurs, des rôles seraient attribués à chaque marcheur en fonction de leur ordre de passage au moment du croisement [Olivier *et al.*, 2013] : le marcheur qui passe second contribuerait plus à augmenter la MPD pendant l'interaction que celui qui passe premier. En effet, dans la population générale, l'ordre de passage est très peu modifié au cours des interactions et peut être prédit 2,5 m avant le croisement [Knorr *et al.*, 2016].

Des modèles de navigation ont été proposés dans la littérature pour simuler le comportement locomoteur du piéton dans un environnement encombré. Ainsi, comme présenté dans la section 3.2.3.1, Warren et Fajen [Warren et Fajen, 2008] ont proposé de modéliser le marcheur et son environnement comme un système dynamique couplé : la trajectoire du marcheur résulte de l'ensemble des forces qui agissent sur lui, les buts étant considérés comme des attracteurs vers lesquels les trajectoires convergent et les obstacles étant assimilés à des répulseurs et correspondant à des obstacles à éviter autour desquels les trajectoires divergent. Cependant ce modèle ne prend pas en compte la taille physique de la personne ou des objets, les capacités d'action ou la manière dont la vitesse et la direction sont coordonnées [Fajen, 2013]. Pourtant, les comportements humains semblent changer en fonction de la connaissance ou de l'incertitude des mouvements des obstacles, de facteurs situationnels (angle de croisement, distance à l'objet) et/ou individuels (taille de l'objet, sexe) [Cinelli et Patla, 2008, Fajen, 2013, Gérin-Lajoie *et al.*, 2005, Knorr *et al.*, 2016, Bourgaize *et al.*, 2019].

3.2.4.4.1 Influence de l'incertitude des mouvements des obstacles

L'incertitude des mouvements des obstacles a notamment été testée par Gérin et Lajoie [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005] en étudiant les adaptations locomotrices pendant un contournement d'obstacles de forme humaine, statiques ou mobiles, dans deux conditions : la première où les informations relatives au mouvement et à la position finale du mannequin n'étaient pas disponibles initialement (condition incertaine), et la seconde où ces informations étaient révélées à l'avance (condition connue). Les résultats ont montré que les participants amorçaient le début de l'adaptation locomotrice plus tôt en condition connue qu'en condition incertaine [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Une étude plus récente s'est intéressée aux comportements d'évitement de jeunes adultes lors d'une trajectoire où un participant et un expérimentateur avançaient frontalement l'un vers l'autre [Pfaff et Cinelli, 2018]. Quatre conditions ont été proposées où l'expérimentateur initiait un changement de trajectoire à 2,5 m après le début de l'essai (figure 30 : 1) il s'arrêtait (condition 1), 2) il marchait le long de la ligne médiane du parcours aligné avec la position de départ du participant (condition 2), 3) il déviait de la ligne médiane pour marcher à 1 m sur la droite (condition 3) ou 4) à 1 m sur la gauche (condition 4) [Pfaff et Cinelli, 2018]. Les résultats ont montré que l'amorce du changement de trajectoire était plus précoce pour les essais où l'expérimentateur s'arrêtait que dans les trois autres conditions [Pfaff et Cinelli, 2018]. Les auteurs suggèrent que l'arrêt de l'expérimentateur à 2,5 m enlevait toute ambiguïté sur sa trajectoire future [Pfaff et Cinelli, 2018]. Ainsi, le mouvement de l'expérimentateur devenait prévisible, alors que dans les autres conditions, la trajectoire de l'expérimentateur restait incertaine [Pfaff et Cinelli, 2018].

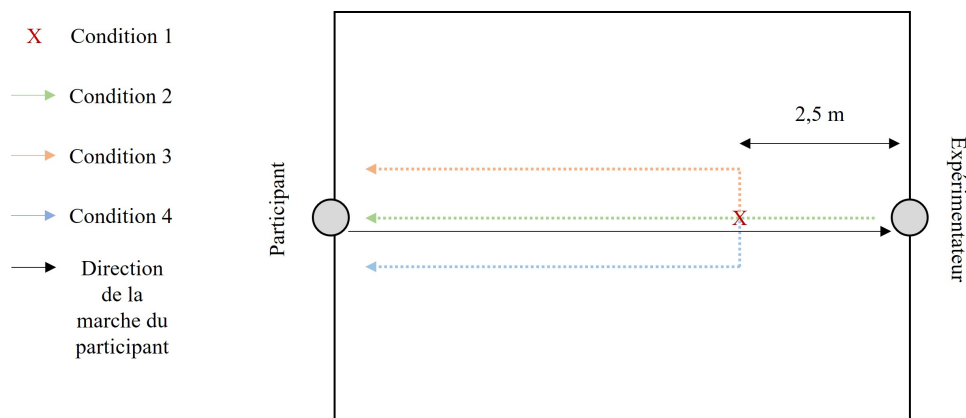


FIGURE 30 – Dispositif expérimental de la tâche de croisement de piétons arrivant l’un en face de l’autre d’après Pfaff et al. [Pfaff et Cinelli, 2018].

3.2.4.4.2 Influence des facteurs situationnels

D’autres auteurs se sont également intéressés à des facteurs situationnels tels que l’angle de croisement [Cinelli et Patla, 2008, Huber *et al.*, 2014, Olivier *et al.*, 2013]. Huber et al. [Huber *et al.*, 2014] ont par exemple étudié les stratégies d’évitement d’obstacles dans plusieurs configurations piétonnes (figure 31). Pour ce faire, ils ont observé l’influence de différentes vitesses de marche par les participants (rapide, normale et lente) en fonction de l’influence de différents angles de croisement avec un second marcheur (objet statique, seconde personne arrivant à : 45° , 90° , 135° et 180°). Les résultats ont montré que la trajectoire et la vitesse étaient ajustées différemment en fonction des situations : les trajectoires de marche étaient ajustées dans toutes les situations alors que la vitesse de marche n’était ajustée que pour certains angles de croisement aigus (45° et 90°) [Huber *et al.*, 2014]. Ces résultats suggèrent que, selon la situation, la stratégie d’évitement s’ajuste préférentiellement sur la trajectoire [Huber *et al.*, 2014]. Concernant la trajectoire, l’initiation du changement de direction était plus tardive pour les situations où l’angle de croisement était aigu en comparaison avec toutes les autres situations. Pour comprendre l’influence de la vitesse de marche pour les essais avec un angle de croisement aigu, les auteurs ont comparé le tracé de l’évolution temporelle de la trajectoire de marche des participants selon deux conditions : la trajectoire où la vitesse reste constante et la trajectoire avec une diminution de la vitesse [Huber *et al.*, 2014]. Les résultats ont montré que pour le tracé sans diminution de vitesse, la trajectoire était beaucoup plus longue que lorsqu’une diminution de vitesse était présente [Huber *et al.*, 2014]. Les auteurs suggèrent que la décélération permet une stratégie d’évitement de collision spatiale plus économique en diminuant également la longueur de la trajectoire de marche en comparaison avec une trajectoire si aucune modification de la vitesse n’avait été présente [Huber *et al.*, 2014]. De plus, les auteurs ont montré que les ajustements de trajectoire et de vitesse sont basés

sur la même estimation constamment mise à jour du TTC d'après deux résultats : 1) l'amorce du changement de direction et de la décélération dépendent tous les deux de la vitesse de marche des participants, c'est-à-dire que plus la vitesse de marche est élevée, plus les participants initient tôt un changement de direction et de vitesse et 2) l'initiation du changement de direction et de décélération ne diffèrent pas l'un de l'autre [Huber *et al.*, 2014].

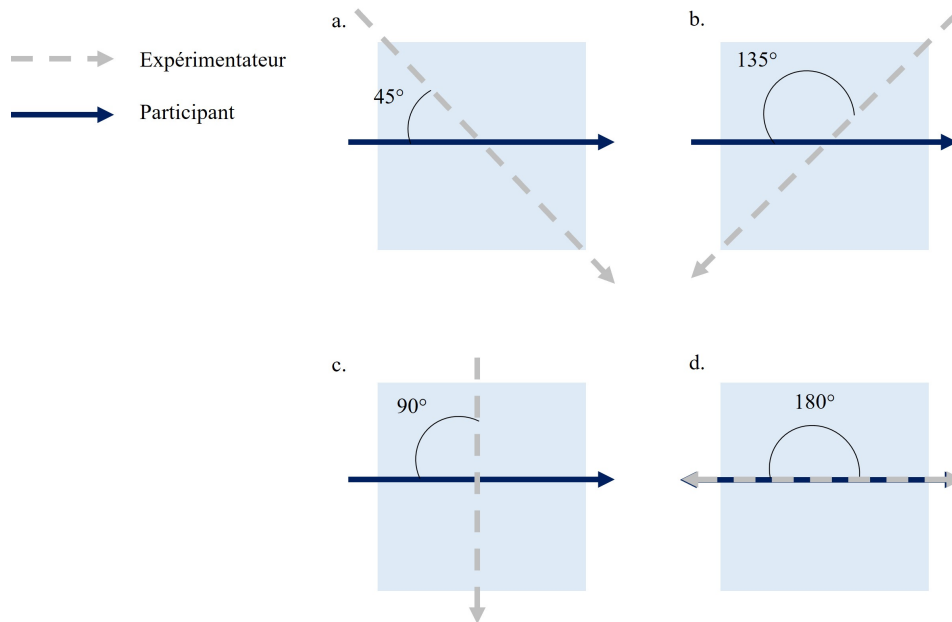


FIGURE 31 – Dispositif expérimental de la tâche de croisement de piéton selon différents angles de croisement d'après Huber *et al.* [Huber *et al.*, 2014].

3.2.4.4.3 Influence des facteurs individuels extrinsèques et intrinsèques

Pour observer l'influence de facteurs individuels extrinsèques, Bourgaize *et al.* [Bourgaize *et al.*, 2019] ont proposé, dans une tâche d'évitement de collision avec un expérimentateur statique, de déterminer si la taille du corps de la personne à éviter (homme de 1,75 m de haut et 0,50 m de large et homme de 1,85 m de haut et 0,56 m de large) pouvait influencer les stratégies d'adaptation, tout en faisant varier le contexte situationnel en modifiant l'orientation de l'expérimentateur (de face, à droite, à gauche et de dos) et la distance (2 m, 4 m et 6 m) entre le point de départ et l'expérimentateur à éviter [Bourgaize *et al.*, 2019] (figure 32). Les résultats ont montré que la largeur de l'expérimentateur influençait la zone de dégagement correspondant à la distance entre le centre de masse de l'expérimentateur et celui du participant au moment du croisement, de telle sorte que la zone de dégagement était plus importante pour les essais où l'expérimentateur était plus large [Bourgaize *et al.*, 2019]. Cependant, si la zone de dégagement est calculée comme étant la distance entre les extrémités les plus proches des épaules des deux participants, alors elle est constante entre les essais [Bourgaize *et al.*, 2019]. Ainsi, cela signifie que

le participant adapte sa trajectoire en fonction de la largeur de l'expérimentateur, tout en conservant une marge de sécurité constante. Concernant le début du comportement d'évitement, pour les essais à 2 m et 4 m, la déviation de la trajectoire était presque immédiate, alors qu'elle commençait en moyenne à 5,06 m pour les essais à 6 m [Bourgaize *et al.*, 2019]. Les auteurs suggèrent que pour les essais où la distance était petite, les participants modifiaient leur trajectoire dès le départ pour tenir compte de l'interférence avec leur espace personnel. En effet, des travaux antérieurs ont montré que les individus ont tendance à amorcer un comportement d'évitement à environ 4 m d'un obstacle [Cinelli et Patla, 2008, Fajen et Warren, 2003, Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Une vitesse de marche plus lente a également été observée pour les essais à 2 m et 4 m, expliquée par les auteurs par une distance trop courte pour atteindre une vitesse stable et de confort [Bourgaize *et al.*, 2019]. Pour finir, les conditions d'orientation à droite et à gauche de l'expérimentateur ont produit une diminution de la zone de dégagement correspondant à la distance entre le centre de masse de l'expérimentateur et celui du participant [Bourgaize *et al.*, 2019]. Cependant, les participants n'évitaient pas nécessairement la direction à laquelle l'expérimentateur faisait face [Bourgaize *et al.*, 2019]. Les auteurs suggèrent que cette différence serait surtout due à une diminution de la largeur corporelle contribuant à une zone de dégagement plus faible [Bourgaize *et al.*, 2019]. Cette étude a ainsi montré que des variables individuelles extrinsèques peuvent influencer le comportement d'évitement dans un environnement statique [Bourgaize *et al.*, 2019]. D'autres études se sont également intéressées aux facteurs individuels intrinsèques tels que le sexe sur les stratégies d'évitement et montrent des résultats différents d'une étude à l'autre [Knorr *et al.*, 2016, Van Basten *et al.*, 2009, Pfaff et Cinelli, 2018]. Ainsi, Knorr *et al.* [Knorr *et al.*, 2016] se sont intéressés à l'influence de la personnalité, du sexe et de la taille des marcheurs dans une tâche de croisement de piétons dynamique. Les résultats n'ont pas révélé de différences pour la distance de croisement, le début de la déviation de trajectoire et de la vitesse de marche [Knorr *et al.*, 2016]. Ces résultats sont différents de ceux de van Basten *et al.* [Van Basten *et al.*, 2009] qui montrent une influence du sexe sur la collaboration entre deux marcheurs et la distance de croisement. Ainsi, les hommes collaborent moins à l'évitement de collision et présentent une distance de croisement plus petite que lors d'une interaction faisant intervenir deux femmes [Van Basten *et al.*, 2009]. Les protocoles mis en place dans ces deux études utilisaient des angles de croisement et des longueurs de trajectoire différents, ce qui pourraient expliquer la différence entre les résultats car ces facteurs situationnels peuvent également influencer l'évitement de collision [Huber *et al.*, 2014, Bourgaize *et al.*, 2021]. Ainsi, d'autres études sont encore à mener pour étudier l'influence des variables individuelles intrinsèques et extrinsèques dans les stratégies d'évitement de collision.

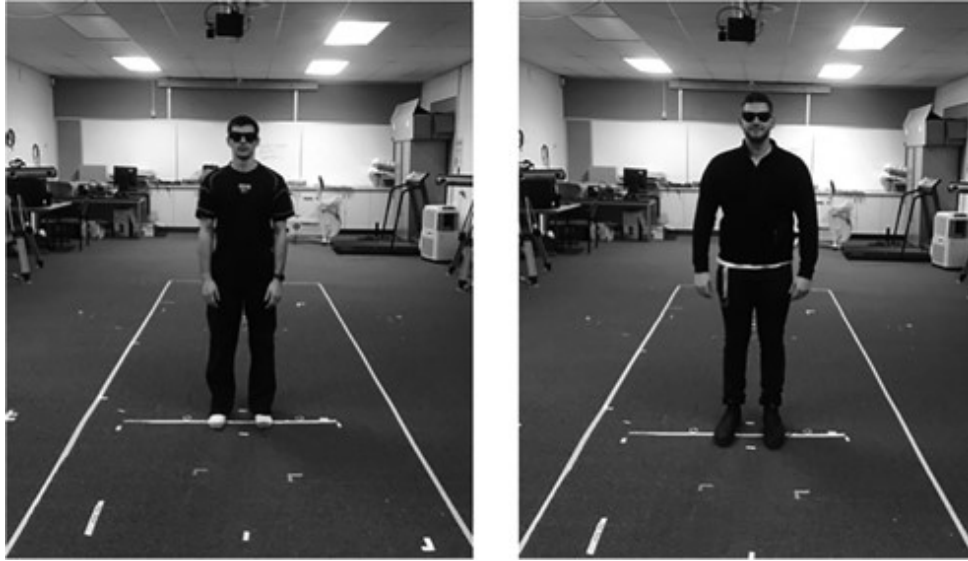


FIGURE 32 – Dispositif expérimental de la tâche d’évitement de piéton faisant varier le contexte situationnel et individuel d’après Bourgaize et al. [Bourgaize *et al.*, 2019].

En conclusion, pendant une tâche de locomotion dans un environnement statique et dynamique, les individus jeunes et en bonne santé utilisent des stratégies d’action basées sur des informations contenues dans le flux optique permettant notamment de détecter et de déterminer le temps restant avant la collision. Les études actuelles portant sur le paradigme de croisement de piétons ont montré qu’il existait des métriques permettant de décrire le comportement des individus. Les résultats montrent une forte cohérence dans les comportements locomoteurs pour un ensemble d’individus présentant les mêmes caractéristiques. Les auteurs se sont alors intéressés à observer si il existait des différences avec d’autres populations comme par exemple les personnes âgées, les personnes présentant une négligence visuospatiale à la suite d’un accident vasculaire cérébral (AVC) ou une commotion cérébrale [Rapos *et al.*, 2021, Aravind et Lamontagne, 2014, Snyder *et al.*, 2022]. Chez les personnes âgées, les résultats ont montré par exemple 1) un nombre plus important d’inversions de l’ordre de passage pour les interactions faisant intervenir deux personnes âgées ou une personne âgée avec une personne jeune quand celle-ci devait passer en premier, 2) un seuil d’adaptation plus important dans les interactions faisant intervenir une personne âgée, c’est à dire qu’une adaptation mutuelle s’est produite pour éviter une future collision à une distance de dégagement plus grande et 3) les personnes âgées présentaient une vitesse de marche plus lente que les personnes plus jeunes [Rapos *et al.*, 2021]. Les auteurs suggèrent que bien que les personnes âgées semblent avoir une approche plus prudente avec une vitesse de marche plus lente et un seuil d’adaptation plus important, les inversions dans l’ordre de passage plus fréquentes montre qu’ils ont été incapables de traiter efficacement les informations entraînant un comportement d’évitement plus risqué [Rapos *et al.*, 2021]. Chez les personnes présentant une négligence visuospatiale à la suite d’un AVC, une étude s’est intéressée en réalité virtuelle à examiner la capacité de ces

personnes à détecter et à éviter les collisions avec des obstacles en mouvement (du côté de la lésion, frontalement, et du côté opposé à la lésion) lors d'une tâche locomotrice dirigée vers un objectif [Aravind et Lamontagne, 2014]. Les résultats ont montré que les patients présentaient des difficultés pour les essais où le déplacement de l'obstacle était situé du côté opposé à la lésion cérébrale et face au participant avec : 1) une forte proportion de collision avec les obstacles, 2) des temps de détection plus longs et un début de la stratégie d'évitement d'obstacles plus tardive, 3) des distances minimales par rapport aux obstacles plus courtes et 4) aucune modification de la vitesse de marche [Aravind et Lamontagne, 2014]. Ces résultats suggèrent que les personnes présentant une négligence visuospatiale à la suite d'un AVC courent plus de risque de rentrer en collision avec des obstacles dynamiques venant du côté opposé à la lésion ou de face [Aravind et Lamontagne, 2014]. L'exemple de ces deux études montre l'intérêt d'utiliser de tels paradigmes de locomotion pour évaluer les difficultés perceptivo-motrices de certaines populations pour notamment proposer de nouveaux moyens d'évaluation.

SYNTHÈSE ET OBJECTIFS

La revue de la littérature nous a permis de mettre en avant que la LCNS est une douleur faisant intervenir des phénomènes neurophysiologiques impliquant un dérèglement de la sensibilisation périphérique et centrale qui pérenniserait la douleur dans le temps. De plus, des modifications structurelles et fonctionnelles ont été révélées par la neuro-imagerie au niveau des aires corticales responsables des voies sensori-discriminatives et affectivo-motivationnelles de la douleur, pouvant impliquer des altérations sensorielles mais également cognitives et émotionnelles. Les études en psychologie cognitive ont montré des résultats très hétérogènes sur la relation entre la LCNS et les difficultés cognitives. Cependant, il semble exister une association entre les caractéristiques de la douleur telles que le niveau d'intensité avec certaines fonctions cognitives comme la mémoire de travail et la résolution de problèmes, où à mesure que l'intensité de la douleur est importante, les capacités cognitives diminuent. De plus, des études ont révélé que les participants LCNS prennent des décisions plus risquées et ne modifient pas leur stratégie au cours du temps. Des études portant sur les facteurs émotionnels accompagnant la douleur ont montré que la chronicisation de la douleur peut être expliquée par des facteurs psychologiques tels que les troubles dépressifs, anxieux, la catastrophisation et la peur du mouvement. La dépression, la catastrophisation et, dans une moindre mesure, l'anxiété, sont associés à une aggravation de la douleur avec une augmentation de l'intensité douloureuse perçue, de la durée de la douleur et du handicap fonctionnel. De plus, la peur du mouvement joue un rôle dans son développement et son passage à la chronicité. Des modèles explicatifs des changements de comportements liés à la LCNS ont été proposés dans la littérature et soulignent la complexité de la douleur chronique nécessitant des recommandations sur sa prise en charge.

Les recommandations nationales et internationales présentent une orientation commune dans la prise en charge de la LCNS, s'appuyant sur l'activité physique et la physiothérapie comme traitement de première intention pour les lombalgies chroniques ou pour les patients présentant des facteurs de risque de chronicité [Nicol *et al.*, 2023]. Cependant, il existe une forte hétérogénéité entre les protocoles de prise en charge proposés [Nicol *et al.*, 2023]. Le modèle théorique actuel recommandé pour la prise en charge de la LCNS, qui associe les facteurs biologiques, psychologiques et sociaux accompagnant la douleur, est appelé le modèle biopsychosocial. Cependant, celui-ci est peu appliqué dans la littéra-

ture portant sur l'effet de la prise en charge des patients lombalgiques. C'est dans ce cadre que nous avons souhaité effectuer une revue systématique dans le but d'établir, d'après les recommandations actuelles [Innocenti *et al.*, 2023], les domaines d'évaluation et les outils de mesure de base à employer dans toutes les études cliniques évaluant l'efficacité des thérapies manuelles comme prise en charge de la LCNS. L'un des constats majeurs est qu'aucune étude n'a évalué l'effet des thérapies manuelles en corrélant les résultats obtenus dans les domaines biologiques, psychologiques et sociaux. Ce constat laisse à penser que les études actuelles en thérapie manuelle sont trop restrictives en ce qui concerne les différents facteurs qui entourent la douleur. Alors que les questionnaires sont majoritairement utilisés pour évaluer l'effet des thérapies manuelles dans le cadre de la prise en charge de la douleur, le deuxième constat de cette revue systématique est que l'évaluation de la capacité fonctionnelle des patients dans les situations de la vie quotidienne par l'analyse du mouvement n'a été que très peu explorée dans la littérature, celle-ci portant majoritairement sur les amplitudes de mouvements et l'endurance musculaire. Bien que ces résultats présentent un intérêt majeur, ces variables ne permettent pas d'avoir une vision exhaustive et complète de l'évaluation de la LCNS et notamment des situations de la vie quotidienne du patient.

En effet, la LCNS semble avoir un effet sur le comportement postural et moteur. Les patients présentent une altération du contrôle postural d'autant plus marquée que la tâche se complexifie. Cette altération est caractérisée par des mouvements du tronc plus importants que pour les personnes sans douleur et par une activité musculaire accrue. Concernant des tâches de mobilité, les patients LCNS présentent une plus grande variabilité de mouvements entre deux foulées, une activité musculaire accrue lors de la locomotion et une diminution de l'amplitude des mouvements dans des tâches de changement de position. Ces altérations proviendraient de la combinaison de stratégies restrictives et protectrices du tronc associées à une proprioception altérée. De plus, les caractéristiques (intensité, durée) et les facteurs psychologiques de la douleur semblent également moduler les stratégies posturales et motrices.

C'est dans ce cadre que l'objectif principal de cette thèse a été d'appliquer des paradigmes de locomotion, incluant la dimension dite écologique, dans la perspective de définir de nouvelles méthodologies pour étudier l'influence de la LCNS basée sur une approche prenant en compte les capacités perceptivo-motrices des patients et d'évaluer l'influence des caractéristiques de cette population sur les stratégies décisionnelles et d'adaptation du mouvement. Pour ce faire, nous avons utilisé des protocoles expérimentaux standardisés et les métriques communément employés pour l'analyse du mouvement. De plus, nous avons évalué l'influence des variables liées à la sensation douloureuse sur les stratégies locomotrices des patients.

Nous nous sommes intéressés dans une première étude (partie II) à évaluer l'influence de la LCNS sur les stratégies perceptivo-motrices dans un environnement statique. Nous avons utilisé la tâche de passage à travers des ouvertures horizontales, décrite section 3.2.2. Nous avons analysé la valeur de seuil critique à partir duquel les marcheurs décidaient de tourner ou non leurs épaules et les variables cinématiques susceptibles d'expliquer ce comportement.

Dans une seconde étude (partie III), nous avons considéré l'influence de la LCNS sur les stratégies perceptivo-motrices à travers une tâche de locomotion en interaction avec un environnement statique faisant intervenir des facteurs situationnels, en disposant trois poteaux encadrant deux ouvertures de différentes largeurs, et sociaux, en plaçant pour certains essais un expérimentateur au centre des deux ouvertures, décrit section 3.2.3. Nous avons analysé si la LCNS affecte la décision du participant de franchir l'une des deux ouvertures en fonction de la largeur de l'ouverture et de la présence ou non d'un expérimentateur. Les variables cinématiques susceptibles d'expliquer ce comportement ont été également analysées.

Pour finir, dans une troisième étude (partie IV), nous nous sommes intéressés à estimer l'influence de la LCNS sur les stratégies perceptivo-motrices à travers une tâche de locomotion en interaction avec un environnement dynamique faisant intervenir deux piétons, décrite section 3.2.4. Pour cela, les variables étudiées ont porté sur la vitesse de marche, la distance future de croisement, l'inversion dans l'ordre de passage et la contribution de chaque marcheur. L'étude de l'interaction entre deux participants a été effectuée sur les groupes d'interactions faisant intervenir deux personnes présentant une LCNS ou deux adultes asymptotiques et entre un participant LCNS et un adulte asymptotique.

DEUXIÈME PARTIE

**Paradigme de locomotion en
interaction avec un environnement
statique : tâche de passage à travers
des ouvertures horizontales (PERL1)**

APPROCHES ET OBJECTIFS

Nous avons pu mettre en avant dans la revue de littérature que des échelles et des questionnaires auto-administrés sont couramment utilisés pour évaluer la LCNS dans les essais cliniques [Chiarotto *et al.*, 2015]. Peu coûteux, rapides et faciles à administrer, ces instruments standardisés ont été développés et validés pour évaluer et collecter les composantes influençant la perception de la douleur (sensori-discriminative, émotionnelle, cognitive et comportementale) [Dansie et Turk, 2013]. Bien qu'ils soient d'un intérêt majeur, ils ne fournissent pas une vue d'ensemble complète de l'évaluation des patients LCNS. En particulier, ils ne prennent pas en compte l'interaction des individus avec leur environnement, pourtant importante dans la réalisation des activités de la vie quotidienne impliquant des processus perceptivo-moteurs.

L'une des tâches quotidiennes utilisées pour évaluer les patients souffrant d'une LCNS en comparaison avec une population d'adultes asymptomatiques (AA) est la marche en ligne droite sur sol plat sans aucun obstacle avec lequel interagir. Certains auteurs ont montré des différences sur les paramètres cinétiques et cinématiques, en particulier pour la vitesse de marche, la durée de la foulée, les amplitudes de rotation du système lombopelvien et les forces de réaction au sol [Moissenet *et al.*, 2021, Koch et Hänsel, 2018]. D'autres auteurs nuancent ces résultats, notamment lorsque l'intensité de la douleur est faible [Lin *et al.*, 2023]. Cependant, l'étude de la locomotion dans un environnement sans obstacle sur la trajectoire, bien que fondamentale, n'est pas suffisante, car le marcheur, dans sa vie quotidienne, doit constamment répondre à la demande de l'environnement en adaptant ses actions pour éviter les obstacles [Franchak *et al.*, 2012, Hackney et Cinelli, 2011, Wilmut et Barnett, 2010], comme par exemple franchir une ouverture étroite, passer à travers les rayons d'un supermarché, etc. Cela a été largement développé par l'approche écologique de la perception et de l'action avec le concept d'affordance [Gibson, 1979] : la perception n'est pas seulement liée aux caractéristiques de l'environnement, mais aussi à la relation acteur-environnement qui offre à l'individu des possibilités d'action s'exprimant par une mise à l'échelle de ses dimensions anthropométriques et aussi de ses capacités fonctionnelles dans un environnement spécifique [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney *et al.*, 2014, Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut et Barnett, 2010, Wilmut *et al.*, 2015].

Ainsi, l'un des paradigmes expérimentaux utilisés pour étudier la coordination perceptivo-motrice impliquée lors de la locomotion en présence d'obstacles, que ce soit chez des AA [Warren Jr et Whang, 1987] ou pour des populations spécifiques (enfants, personnes âgées, adultes présentant une dyspraxie) [Hackney et Cinelli, 2011, Wilmut *et al.*, 2015, Wilmut et Barnett, 2011], est celui de la marche à travers une ouverture semblable à une ouverture de porte. Ce paradigme permet d'étudier l'adéquation entre les propriétés de l'environnement et de l'individu, notamment en identifiant des seuils critiques où une phase de transition est nécessaire pour produire une nouvelle action [Warren Jr et Whang, 1987]. Lors du passage d'une ouverture horizontale, le seuil critique correspond à la largeur de l'ouverture pour laquelle les participants changent leur mode d'action, c'est-à-dire tournent leurs épaules pour passer la porte, alors que pour des largeurs plus importantes, ils passent sans les tourner [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney *et al.*, 2014, Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut et Barnett, 2010, Wilmut *et al.*, 2015]. Chez les AA, ces stratégies adaptatives sont invariantes. Ainsi, l'angle de rotation des épaules dépend du rapport entre la largeur des épaules et les largeurs d'ouverture (rapport E/O) compris entre 1,3 et 1,4 selon les auteurs [Hackney et Cinelli, 2013b, Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut et Barnett, 2010].

Dans ce contexte, le paradigme du passage à travers une ouverture semble très intéressant à considérer pour étudier l'effet de la LCNS sur les stratégies perceptivo-motrices dans un contexte dit écologique. L'objectif principal de cette étude expérimentale a été de déterminer si la LCNS modifiait les valeurs du seuil critique habituellement décrites dans les populations AA. L'objectif secondaire a été double : 1) examiner les variables cinématiques caractéristiques de la marche des participants et 2) évaluer l'influence des variables de la perception douloureuse sur les valeurs observées du seuil critique. L'hypothèse principale était que les participants LCNS auraient un seuil critique plus faible que les adultes AA en raison de la limitation de la rotation des épaules provoquée par la douleur, et qu'ils s'engageraient donc dans une stratégie plus risquée. Concernant la cinématique de la marche, l'hypothèse était que les participants LCNS tourneraient moins les épaules, marcheraient plus lentement et auraient des oscillations corporelles plus importantes, ce qui expliquerait en partie la stratégie adoptée lors du franchissement de l'obstacle. Enfin, concernant la perception de la douleur, l'hypothèse était que les stratégies locomotrices adoptées par les participants LCNS seraient en partie corrélées à des variables liées à la perception douloureuse (sensori-discriminative, émotionnelle et comportementale).

MÉTHODOLOGIE

2.1 Schéma de l'étude

Cette étude est prospective par échantillonnage, comparant un groupe AA (groupe contrôle) à un groupe de participants présentant une LCNS appariés selon l'âge. L'étude comportait deux visites : une visite d'inclusion et une visite pour la passation du protocole (tâche locomotrice et passation de questionnaires liés à la sensation douloureuse). La durée de l'étude pour un individu était de quatre semaines maximum.

2.2 Population

Quatorze participants LCNS ($41,9 \pm 14,1$ ans, 5 femmes) et quinze participants AA ($43,7 \pm 14,9$ ans, 9 femmes) se sont portés volontaires et ont donné leur consentement écrit pour participer à l'étude.

2.2.1 Critères d'inclusion

Les adultes souffrant de LCNS devaient présenter une douleur située entre la charnière thoraco-lombaire et le pli fessier inférieur, avec ou sans douleur dans l'une ou l'autre des jambes. Cette douleur devait être présente depuis plus de 12 semaines, de façon quotidienne ou quasi quotidienne (au moins 4 jours sur 7). Les participants ne devaient suivre aucun traitement ou avoir un traitement stable depuis au moins deux semaines avant l'inclusion. Pour les deux groupes, les participants devaient parler, lire et comprendre le français, être âgés de 18 à 65 ans, être capables de comprendre les ordres simples et les consignes expérimentales, avoir une vision normale ou corrigée et être affiliés à un régime de sécurité sociale ou bénéficiaires d'un tel régime.

2.2.2 Critères de non-inclusion

Les participants LCNS ne devaient pas présenter de signes médicaux d'alerte (drapés rouges) orientant vers une pathologie sous-jacente nécessitant une prise en charge spécifique et/ou urgente telle que : litige en cours dans les suites d'un accident du travail,

douleur liée à un diagnostic de cancer, symptômes médullaires associés (signes pyramidaux, troubles de la coordination, déficits moteurs ou sensitifs, troubles sphinctériens, etc.), douleur à la suite d'une infection (transpiration nocturne, fièvre, frissons, abus de drogue intraveineuse, immunodéficience, intervention chirurgicale récente, infection urinaire ou cutanée, etc.), fractures récentes ou pathologiques (accidents, antécédents d'ostéoporose, prise chronique de corticoïdes, perte de poids inexplicée, fatigue, antécédents de cancer, etc.), problèmes vasculaires (pieds froids, diminution du pouls artériel périphérique, etc.). Pour le groupe AA, les participants ne devaient pas présenter de plainte de douleur chronique en cours ou d'antécédents de douleur chronique significative (supérieure à 4/10 pendant au moins six mois) [Queneau *et al.*, 2019], de pathologies ayant un retentissement sur la marche ou la posture, de difficultés à effectuer les déplacements étudiés (aucune apparition de gêne ou de fatigue exagérée). Enfin, pour les deux groupes de participants, ceux-ci ne devaient pas : être des femmes enceintes ou allaitantes, présenter des troubles cognitifs ou psychologiques incompatibles avec le respect et/ou la compréhension du protocole, être incapables de comprendre le consentement éclairé, ni être sous tutelle ou curatelle, participer en parallèle à un autre protocole de recherche impliquant la personne humaine, être des personnes privées de liberté par une décision judiciaire ou administrative, faire l'objet de soins psychiatriques, présenter des signes neurologiques évoquant une maladie neurodégénérative responsable de troubles de la marche (syndrome parkinsonien, etc.).

2.2.3 Moyens de recrutements

Le recrutement des participants LCNS a été assuré par voie directe au sein d'un centre de médecine du sport et de réadaptation à l'effort (SPORMED, Rennes). Le recrutement des participants AA a été réalisé par voie d'affiche ou par contact direct. L'inclusion a été réalisée par le docteur Olivier Roze (investigateur principal), médecin anesthésiste au sein de la clinique la Sagesse (Rennes).

2.2.4 Lieu de l'expérimentation

Les expérimentations ont eu lieu dans le gymnase du laboratoire M2S (figure 33) situé à l'adresse suivante : Campus de Ker Lann, avenue Robert Schuman, 35170 BRUZ. Ce gymnase est dédié à l'analyse du mouvement.

2.2.5 Agrément et autorisation

Le savoir-faire du laboratoire M2S concernant les expérimentations sur l'Homme a été reconnu par l'Agence Régionale de la Santé dont l'agrément a été validé jusqu'au 31

Mai 2024. Cette étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes (CPP) Sud-Ouest et Outre-Mer 1, le 4 novembre 2021 (n°2021-A00749-32).



FIGURE 33 – Photo du gymnase expérimental

2.3 Schéma expérimental

Deux obstacles (figure 34.a.) constituant l'ouverture à franchir ont été placés dans le gymnase (20 m x 30 m). L'origine du repère est au milieu de l'ouverture, l'axe des x étant celui le long duquel les participants marchent. Le système de capture du mouvement est composé de 23 caméras optoélectroniques disposées autour de la zone expérimentale, installée au milieu du gymnase, afin d'enregistrer la position de marqueurs passifs réfléchissants disposés sur le participant au niveau des deux acromions, de la 7^e cervicale, des épines iliaques supérieures, antérieures et postérieures, et des malléoles externes de cheville (figure 34.b. et c.). L'analyse cinématique de la locomotion a été effectuée sur les données enregistrées du mouvement de ces neuf marqueurs passifs réfléchissants, à l'aide du logiciel Qualisys Track Manager (QTM). L'information enregistrée par ces caméras ne concerne que les coordonnées des marqueurs au cours du temps.

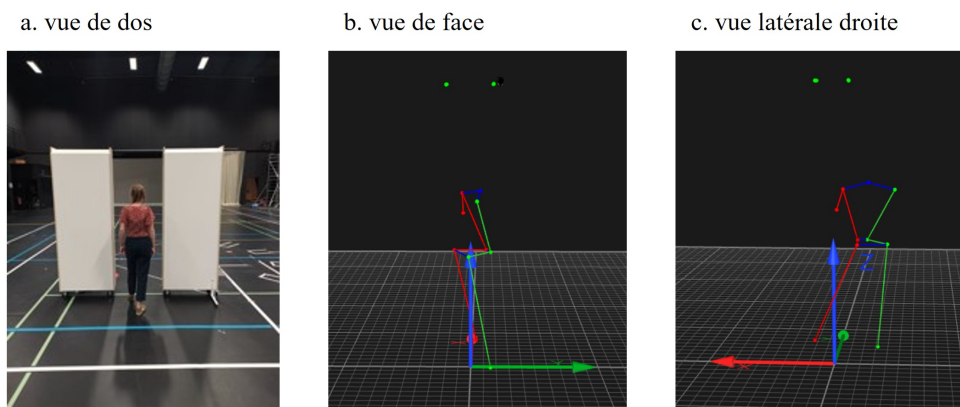


FIGURE 34 – Photo de l'expérience PERL 1 (a.) et illustration d'un participant traversant une ouverture de 0,95 (b. et c.).

2.4 Procédure

L'étude s'est déroulée en deux temps : une première visite d'inclusion et une seconde pour l'expérimentation.

2.4.1 Visite d'inclusion

Les participants LCNS et les participants AA ont été vus par le médecin investigateur principal de l'étude au cours d'une consultation clinique sous forme d'entretien et d'examen médical permettant de justifier l'inclusion ou la non-inclusion des participants. Il s'agissait de participants LCNS consultant pour la première fois ou de participants LCNS déjà suivis pour leur douleur. Le médecin a de plus répondu aux questions des participants avant signature du consentement éclairé, puis a complété les critères d'inclusion et de non-inclusion.

2.4.2 Visite pour l'expérimentation

2.4.2.1 Évaluation psychologique

La deuxième visite a été réalisée dans un délai maximum d'un mois après la visite médicale. Effectuée par une psychologue spécialisée en psychologie cognitive, elle consistait à l'évaluation psychologique, sous forme d'entretien individuel. L'ensemble des participants a complété des échelles et questionnaires auto-administrés portant sur le niveau d'anxiété et de dépression et le niveau de qualité de vie. Les participants douloureux ont également complété des échelles et questionnaires portant sur la perception douloureuse : intensité de la douleur, niveau de catastrophisation, niveau de peur liée au mouvement, niveau de flexibilité psychologique, niveau sur les croyances de peur et d'évitement, et fonctionnement physique. L'ensemble des échelles et questionnaires choisis ont été validés dans la population cible et sont détaillés dans la section 2.5.1. La durée totale de passation pour les participants LCNS de l'ensemble de ces tests a été estimée à 40 minutes maximum, et à 10 minutes pour les participants AA.

2.4.2.2 Évaluation cinématique

L'évaluation cinématique a été réalisée par les investigateurs de l'étude, le même jour, après une pause de 15 minutes à la suite de l'évaluation psychologique. Le protocole de marche consistait à demander aux participants de réaliser tout d'abord 3 essais sur une distance de 7 m afin de mesurer leur vitesse de confort en l'absence d'interaction avec un obstacle sur leur trajectoire. Ils ont ensuite réalisé 3 blocs de 19 essais, avec des tailles d'ouverture allant de 0,9 à 1,8 fois la largeur de leurs épaules (incrément de 0,05), présentés dans un ordre randomisé. Un essai consistait à placer le participant à une

distance de 7 m de l'ouverture horizontale : celui-ci devait alors marcher en ligne droite à la vitesse qu'il souhaitait et passer à travers l'ouverture jusqu'au marquage au sol placé 7 m après la porte (figure 35). Après un essai, celui-ci devait rester dos à la porte jusqu'à ce que l'expérimentateur l'autorise à se retourner. Puis il recommençait la même tâche. Avant le premier bloc et après les trois blocs de l'enregistrement des données cinématiques, les investigateurs ont également demandé aux participants LCNS de coter leur douleur sur l'Échelle Analogique Visuelle (EVA) renseignée dans les cahiers d'observation.

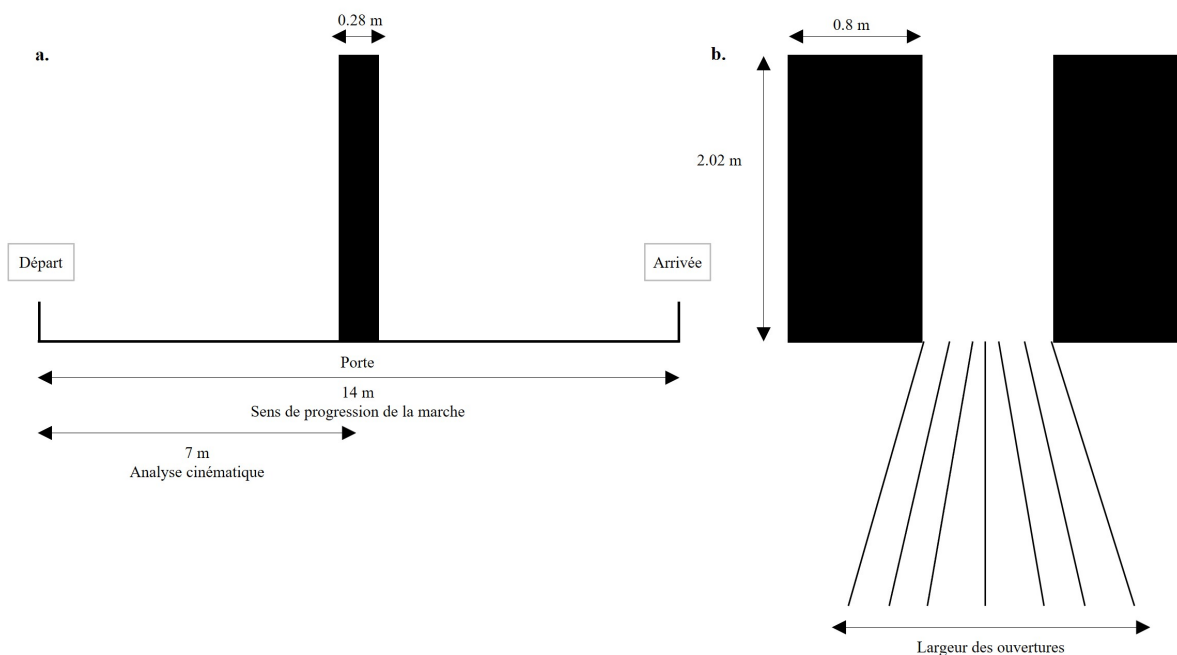


FIGURE 35 – Vue latérale (a.) et vue frontale (b.) du dispositif expérimental où les participants devaient traverser des ouvertures horizontales de 0,9 à 1,8 fois la largeur de leurs épaules (par incréments de 0,05).

Chaque participant a parcouru 60 essais, soit une distance de 840 m (60x14 m) pendant l'expérimentation. La durée d'un essai était d'environ 30 s (moins de 10 s de marche et 20 secondes de pause entre les essais). La durée totale de l'expérimentation était de 45 minutes. À tout moment, un temps de repos pouvait être alloué aux participants, la fatigue n'étant pas un paramètre pris en compte dans cette recherche.

2.5 Analyse des données

Afin de déterminer quelles variables liées à la perception douloureuse ont pu influencer les actions des participants, nous avons examiné comment les participants discriminaient leur douleur, leur fonctionnement psychologique, leur fonctionnement physique et leur qualité de vie, à l'aide d'échelles et de questionnaires auto-administrés.

2.5.1 Échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs accompagnant la douleur

2.5.1.1 Discrimination de la douleur

2.5.1.1.1 Intensité

L'intensité de la douleur reflète l'ampleur globale de l'expérience douloureuse perçue par le patient [Chiarotto *et al.*, 2015]. Nous évaluerons cette variable à l'aide de l'EVA sous format papier. L'EVA est représentée par une ligne horizontale de 100 mm de long où sont indiqués par des descripteurs à gauche "pas de douleur" et à droite "pire douleur imaginable". Le patient doit alors tracer un trait sur la ligne correspondant à son ressenti douloureux. Cette mesure a été validée pour la population LCNS [Chiarotto *et al.*, 2019].

2.5.1.2 Facteurs psychologiques

2.5.1.2.1 Niveau d'anxiété et de dépression

L'anxiété fait référence à la peur, à des symptômes extrêmement inquiétants et à une hyperexcitation [Chiarotto *et al.*, 2015]. La dépression fait référence à une humeur négative, à une perte de confiance en soi, à une perte de motivation et de plaisir [Chiarotto *et al.*, 2015]. Nous avons effectué ces mesures à l'aide de l'Hospital Anxiety Depression Scale (HADS - [Zigmond et Snaith, 1983], Traduction française : [Lépine et L'échelle, 1996]). Cet outil comprend 14 items cotés de 0 à 3. Sept questions se rapportent à l'anxiété (total A) et 7 questions à la dimension dépressive (total D), permettant l'obtention de deux scores d'un total maximal de 21 chacun. Cette échelle a été validée pour la population de patients lombalgiques [Turk *et al.*, 2015].

2.5.1.2.2 Niveau de catastrophisation

La catastrophisation désigne le processus cognitif au cours duquel les patients anxieux présentent une orientation exagérée et négative à l'égard de la douleur, et fait référence ici à l'interprétation de la douleur comme extrêmement menaçante [Christe *et al.*, 2021b]. Nous avons utilisé le Pain Catastrophizing Scale (PCS - [Sullivan *et al.*, 1995]) permettant d'évaluer trois dimensions : rumination, amplification et impuissance. Cette échelle comprend 13 items cotés de 0 (pas du tout) à 4 (tout le temps) dont le score maximal est de 52. Cette échelle a été validée pour une population de patients lombalgiques chroniques [Van Damme *et al.*, 2002].

2.5.1.2.3 Niveau de peur lié au mouvement

La peur liée au mouvement est caractérisée par les peurs et craintes liées à la douleur, qui entraînent souvent un évitement du mouvement qui pourrait causer ou aggraver une

blessure [SH, 1990]. Nous avons utilisé le Tampa Scale Kinesiophobia (TSK - [Vlaeyen *et al.*, 1995a], Traduction française : [French *et al.*, 2002]). Cette échelle comprend 17 items cotés de 1 (fortement en désaccord avec la phrase) à 4 (fortement en accord avec la phrase) dont le score maximal est de 68. Cette échelle a été validée pour la population de patients lombalgiques chroniques [Vlaeyen *et al.*, 1995a].

2.5.1.2.4 Niveau de flexibilité psychologique

La flexibilité psychologique permet de mesurer le fonctionnement psychologique en phase (en fusion) avec la douleur ou si le patient dispose de certains degrés de liberté par rapport à celle-ci [Wicksell *et al.*, 2010]. Nous avons utilisé le Psychological Inflexibility in Pain Scale (PIPS - [Wicksell *et al.*, 2010], Traduction française : [Martel *et al.*, 2015]) permettant d'évaluer deux facteurs : l'évitement et la fusion cognitive. Cette échelle comporte 16 items cotés de 1 (jamais vrai) à 7 (toujours vrai). Cette échelle a été validée pour la population de patients lombalgiques chroniques [Barke *et al.*, 2015].

2.5.1.2.5 Niveau sur les croyances de peur et d'évitement

Les croyances de peur et d'évitement reflètent les comportements des patients pour éviter la douleur [Waddell *et al.*, 1993]. Nous avons utilisé le Fear Avoidance Beliefs Questionnaire (FABQ - [Waddell *et al.*, 1993], Traduction française : [Chaory *et al.*, 2004]) permettant d'évaluer deux sous-échelles : croyance concernant le travail et croyance concernant l'activité physique. Ce questionnaire comporte 16 items cotés de 0 (absolument pas d'accord avec la phrase) à 6 (complètement d'accord avec la phrase). Le score maximal des croyances concernant le travail est de 42 et le score maximal des croyances concernant l'activité physique est de 24. Cet outil a été développé pour une population présentant des lombalgies [Waddell *et al.*, 1993].

2.5.1.3 Fonctionnement physique

Le fonctionnement physique correspond à l'impact sur la capacité du patient à effectuer les activités physiques quotidiennes nécessaires pour répondre aux besoins de base, allant des soins personnels aux activités plus complexes qui nécessitent une combinaison de compétences [Chiarotto *et al.*, 2015]. Nous avons utilisé le Roland Morris Disability Questionnaire (RMDQ - [Roland, 1983], Traduction française : [Zerkak *et al.*, 2013]) qui comporte 24 items dont le score maximal est de 24. Cet outil a été développé pour une population présentant des lombalgies [Roland, 1983].

2.5.1.4 Qualité de vie

La qualité de vie correspond à "la perception qu'a un individu de sa place dans l'existence, dans le contexte de la culture et du système de valeurs dans lesquels il vit en relation avec ses objectifs, ses attentes, ses normes et ses inquiétudes" [Organization *et al.*, 1995]. Nous avons utilisé le questionnaire EuroQol 5 Dimension (EQ-5D - [Van Hout *et al.*, 2012]) permettant d'évaluer cinq dimensions : la mobilité, la capacité à prendre soin de soi, les activités habituelles, professionnelles, à la maison et de loisir, la douleur ou l'inconfort, l'anxiété et la dépression. Cinq degrés de sévérité dans un ordre croissant permettent d'évaluer chaque dimension : « pas de problèmes » à « incapacité totale » pour les items qui évaluent la capacité, à « extrême » pour les autres items. Ce questionnaire a été validé pour une population présentant des douleurs chroniques [Vartiainen *et al.*, 2017].

2.5.2 Données cinématiques

Pour éliminer les oscillations dues à l'activité des pas, les données ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas Butterworth de 10 Hz. Les largeurs d'épaules ont été calculées en prenant la plus grande largeur au niveau des épaules. La largeur des portes a été calculée à partir de la position horizontale des marqueurs placés sur les portes.

Nous avons découpé chaque essai en deux phases distinctes (figure 36) :

- la phase d'approche qui correspond au temps écoulé entre la deuxième et la quatrième seconde après le début du mouvement ;
- le moment du franchissement qui se réfère au moment où le participant traverse l'ouverture (*tcross*).

Nous avons ensuite calculé les variables cinématiques suivantes pour chacune des deux phases : la vitesse de marche, l'angle de rotation des épaules, le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien, et les oscillations médio-latérales du corps.

2.5.2.1 Vitesse de marche

La position horizontale du centre de masse (CdM) du participant a été calculée en prenant la position moyenne des marqueurs placés sur les deux acromions et la 7^e cervicale. La vitesse de marche instantanée a été calculée comme la dérivée temporelle première de la position sur l'antéro-postérieur et sur l'axe médio-latéral du CdM. La vitesse a été calculée à deux moments distincts (figure 36.a.) :

- la vitesse moyenne du déplacement du CdM pendant la phase d'approche (m/s) ;
- la vitesse du CdM à *tcross*.

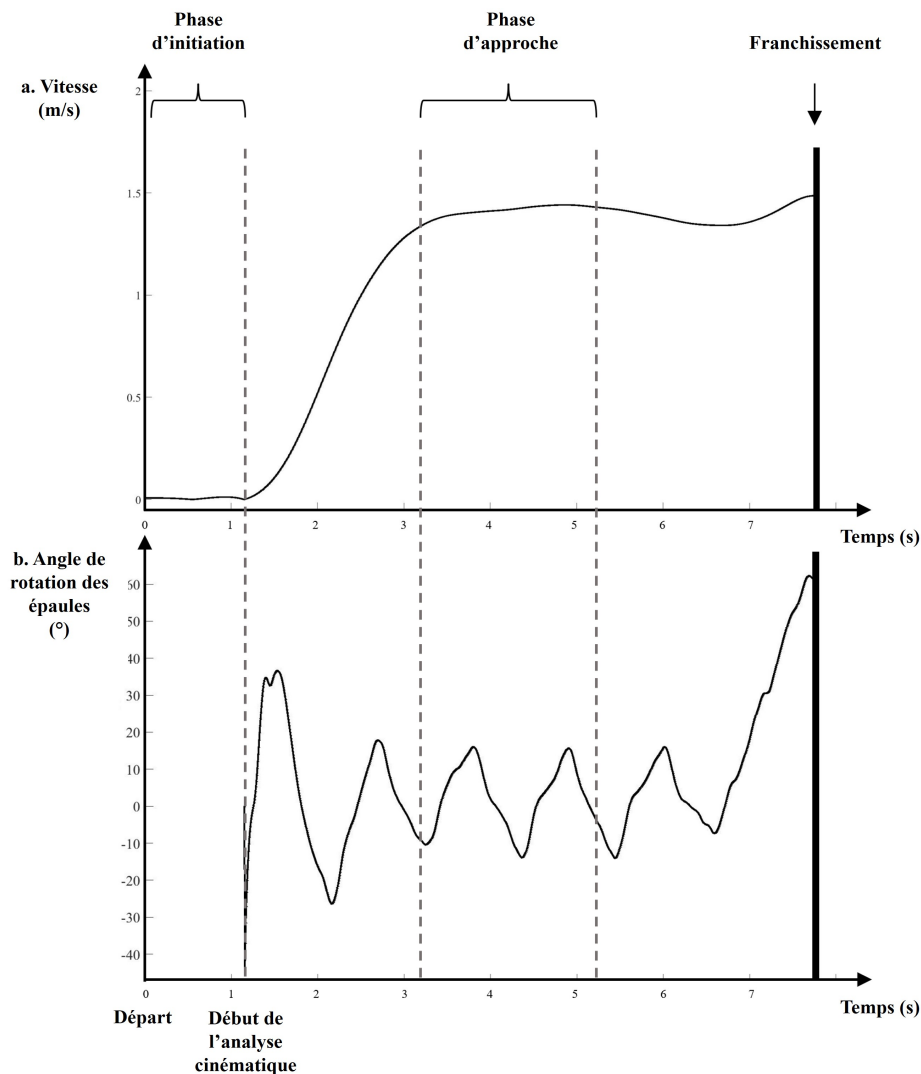


FIGURE 36 – Représentation des phases analysées pour les variables cinématiques.

2.5.2.2 Rotation des épaules

L'angle de rotation des épaules de chaque participant a été calculé à partir des coordonnées horizontales des marqueurs placés sur les deux acromions pour les essais en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire et pour les essais expérimentaux. L'angle a été défini dans le plan horizontal entre la ligne passant par les deux marqueurs positionnés sur les acromions et la ligne formée par le déplacement antéro-postérieur du CdM. Nous avons utilisé la valeur absolue de cet angle, c'est-à-dire que nous n'avons pas différencié l'épaule qui entrait la première dans l'ouverture. En effet, nous n'avons pas observé de stratégies cohérentes entre les participants qui tournaient leurs épaules vers la gauche ou vers la droite. L'angle de rotation des épaules a été calculé à deux moments distincts (figure 36.b.) :

- l'angle de rotation moyen des épaules pendant la phase d'approche ($^{\circ}$);
- l'angle de rotation à *tcross* ($^{\circ}$).

2.5.2.3 Variable décisionnelle : seuil critique

Pour répondre à l'objectif principal, nous avons utilisé une variable décisionnelle nous apportant des indices sur le choix du mode d'action réalisé par le participant. La variable décisionnelle retenue dans notre protocole est le seuil critique, défini comme la largeur d'ouverture faisant la transition entre les ouvertures qu'il est possible ou non de traverser en marchant sans modification du mouvement. Il s'agira alors d'identifier les essais, c'est-à-dire les largeurs d'ouvertures, où les participants ont tourné les épaules. Nous avons calculé l'angle des épaules en nous intéressant à la position de trois marqueurs placés respectivement sur la 7^e cervicale et les acromions droit et gauche du participant, puis nous avons effectué une bi-régression linéaire avec l'angle de rotation en lacet à *tcross* en fonction de la largeur de l'ouverture. Le seuil critique correspond à l'intersection des deux lignes de régression.

2.5.2.4 Déphasage entre les angles scapulaire et pelvien

La différence entre les angles de rotation des épaules et du bassin dans le plan horizontal de chaque participant a été calculée à partir des coordonnées horizontales du déplacement des marqueurs positionnés sur les deux acromions et sur les épines iliaques antéro-supérieures pour les essais en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire et pour les essais expérimentaux. Nous avons utilisé la valeur absolue de cet angle et avons calculé le déphasage. Le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien a été calculé à deux moments distincts :

- le déphasage pendant la phase d'approche ($^{\circ}$);
- le déphasage à *tcross* ($^{\circ}$).

2.5.2.5 Stabilité

La stabilité du tronc a été calculée comme l'amplitude moyenne des oscillations médio-latérales du CdM, à la fois pour les essais en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire et pour les essais expérimentaux pendant la phase d'approche.

2.6 Analyse statistique

L'analyse des données a été réalisée à l'aide de RStudio (version 4.1.3; RStudio, Inc) et MATLAB (Version R2021b, MathWorks, Natick, USA). Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0,05$. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été

évaluées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Levene. Les différences entre les groupes pour les caractéristiques des participants (âge, sexe, largeur des épaules, HADS, EQ-5D) et les seuils critiques ont été évaluées à l'aide des tests de Student ou de Welch selon les conditions de normalité et d'homogénéité des variances, et le test du X^2 d'indépendance. Une Anova mixte suivie de tests post hoc de comparaison par paire avec une correction de Bonferroni ont été utilisés pour évaluer l'effet de groupe sur le rapport E/O pour la vitesse de marche, l'angle de rotation des épaules, le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien et la stabilité du tronc pendant la phase d'approche et à *tcross*. Des tests de corrélations ont ensuite été réalisés entre les scores liés aux échelles et questionnaires des facteurs accompagnant la douleur et le seuil critique de chaque participant LCNS.

RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques des participants

L'âge, le sexe et la largeur des épaules n'étaient pas significativement différents entre les groupes LCNS et AA. Il n'y avait pas non plus de différence entre les groupes pour les scores à l'HADS-A ($p = 0,33$) et à l'HADS-D ($p = 0,31$). Cependant, les résultats ont montré que le groupe AA (med = 1, iqr = 0,09) avait un score de qualité de vie plus élevé [$W = 180$, $p = 0,00013$, $r = 0,73$] que les participants LCNS (EQ-5D, med = 0,76, iqr = 0,13). L'ensemble des caractéristiques des participants LCNS et AA sont présentées dans le tableau 3.

Participants (n)	LCNS (14)	AA (15)	p-value
Age - m(sd)	43,7 (14,9)	41,9(14,1)	0,74
Sex (F/H)	5/9	10/5	0,19
Longueur des épaules (cm) - m(sd)	45,9(3,9)	44,9(5,1)	0,59
MMSE - med(iqr)	30(1,8)	29(0)	0,27
HADS - med(iqr)			
Anxiété	6(7,8)	4(4)	0,33
Dépression	2(1,8)	2(1,5)	0,31
EQ5D - med(iqr)	0,8(0,1)	1(0,1)	**
RMDQ - m(sd)	5,31(3,68)		
FABQ - m(sd)			
Activité physique	9,79 (6,37)		
Travail	8,71 (7,83)		
PCS - m(sd)	16,86 (10,32)		
TSK - m(sd)	34,57 (6,57)		
PIPS - m(sd)			
Evitement	31,15 (11,46)		
Fusion	28,54 (8,53)		
score total	55,43 (19,68)		
EVA - m(sd)	2 (1,2)		

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

LCNS : Lombalgie Chronique Non-Spécifique. m(sd) : moyenne (écart-type), med(iqr) : médiane (inter-quartile). MMSE : Mini Mental State Examination (rang 0-30). HADS : Hospital Anxiety and Depression Scale avec une sous-échelle portant sur l'anxiété (rang 0-21) et une sous-échelle portant sur la dépression (rang 0-21). EQ5D : EuroQol 5 Dimension (rang 0-1). RMDQ : Roland Morris Disability Questionnaire (rang 0-24). FABQ : Fear Avoidance Belief Questionnaire avec une sous-échelle portant sur l'activité physique (rang 0-24) et une sous-échelle portant sur le travail (rang 0-42). PCS : Pain Catastrophizing Scale (rang 0-52). TSK : Tampa Scale Kinesiophobia (rang 0-68). PIPS : Psychological Inflexibility in Pain Scale avec une sous-échelle portant sur l'évitement (rang 0-70) et une sous-échelle portant sur la fusion cognitive (rang 0-24). EVA : Echelle Visuelle Analogique (rang 0-10).

TABLEAU 3 – Caractéristiques des participants de l'étude PERL1.

3.2 Seuil critique

Le seuil critique était significativement plus élevé dans le groupe AA ($1,33 \pm 0,15$) par rapport au groupe LCNS ($1,18 \pm 0,08$) [$t(22.7) = -3,34, p < 0,01, d = -1,23$] (figure 37). Le coefficient de variation était de 0,11 pour le groupe AA et de 0,07 pour le groupe LCNS.

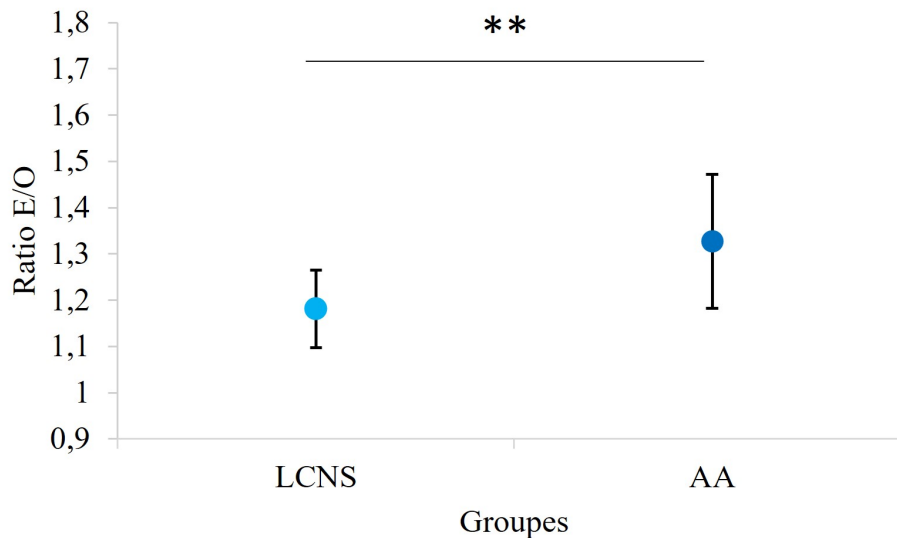


FIGURE 37 – Seuil critique pour les deux groupes LCNS et AA.

3.3 Caractéristiques cinématiques de la marche

3.3.1 Comparaison entre les groupes et les essais expérimentaux et les essais sans obstacle sur la trajectoire pendant la phase d'approche

Aucun effet significatif du groupe ($p = 0,73, p = 0,89, p = 0,78$), du rapport E/O ($p = 0,20, p = 0,69, p = 0,18$) et d'interactions ($p = 0,09, p = 0,45, p = 0,50$) n'ont été identifiés respectivement pour la rotation des épaules (figure 38.a.), le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien (figure 38.b.) et la stabilité.

Un effet significatif du groupe [$F(14, 1) = 4,83, p = 0,045, \eta_p^2 = 0,243$] et aucun effet significatif du rapport E/O ($p = 0,135$) ni d'interactions ($p = 0,097$) ont été identifiés pour la vitesse de marche. Les participants LCNS marchent significativement plus lentement que les participants AA ($p < 0,001$) (figure 38.c.).

3.3.2 Comparaison entre les groupes et entre les ratios SA à tcross

Tous les participants ont franchi avec succès toutes les largeurs d'ouvertures sans entrer en collision. Un effet significatif du rapport E/O a été identifié pour la rotation des épaules [F(252, 17)= 87,52, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,77$] et la vitesse de marche [F(252, 17)= 8,99, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,19$]. Plus précisément, la rotation des épaules diminuait (figure 38.a.) et la vitesse de marche augmentait (figure 38.c.) avec l'augmentation de la taille de l'ouverture à franchir. Aucun effet du groupe ni d'interactions n'ont été identifiés pour la rotation des épaules ($p = 0,29$, $p = 0,52$) et la vitesse de marche ($p = 0,06$, $p = 0,89$).

Lorsque l'on considère le déphasage (figure 38.b.), des effets significatifs du rapport E/O et des interactions ont été identifiés, respectivement [F(252, 18)= 21,54, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,51$] et [F(252, 18)= 1,73, $p < 0,01$, $\eta_p^2 = 0,08$]. Il y a eu un effet significatif du rapport E/O pour les participants AA [F(108, 18)= 10,3, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,57$] et LCNS [F(144, 18)= 11,4, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,43$]. Pour les deux groupes, le déphasage au franchissement de l'ouverture diminuait avec l'augmentation de la taille de l'ouverture.

3.4 Variables liées à la perception douloureuse

Les scores aux échelles et aux questionnaires du RMDQ, du FABQ, du PCS, du PIPS, du TSK et de l'EVA sont présentés dans le tableau 3. Aucune corrélation n'a été trouvée entre les scores aux échelles et questionnaires et le seuil critique.

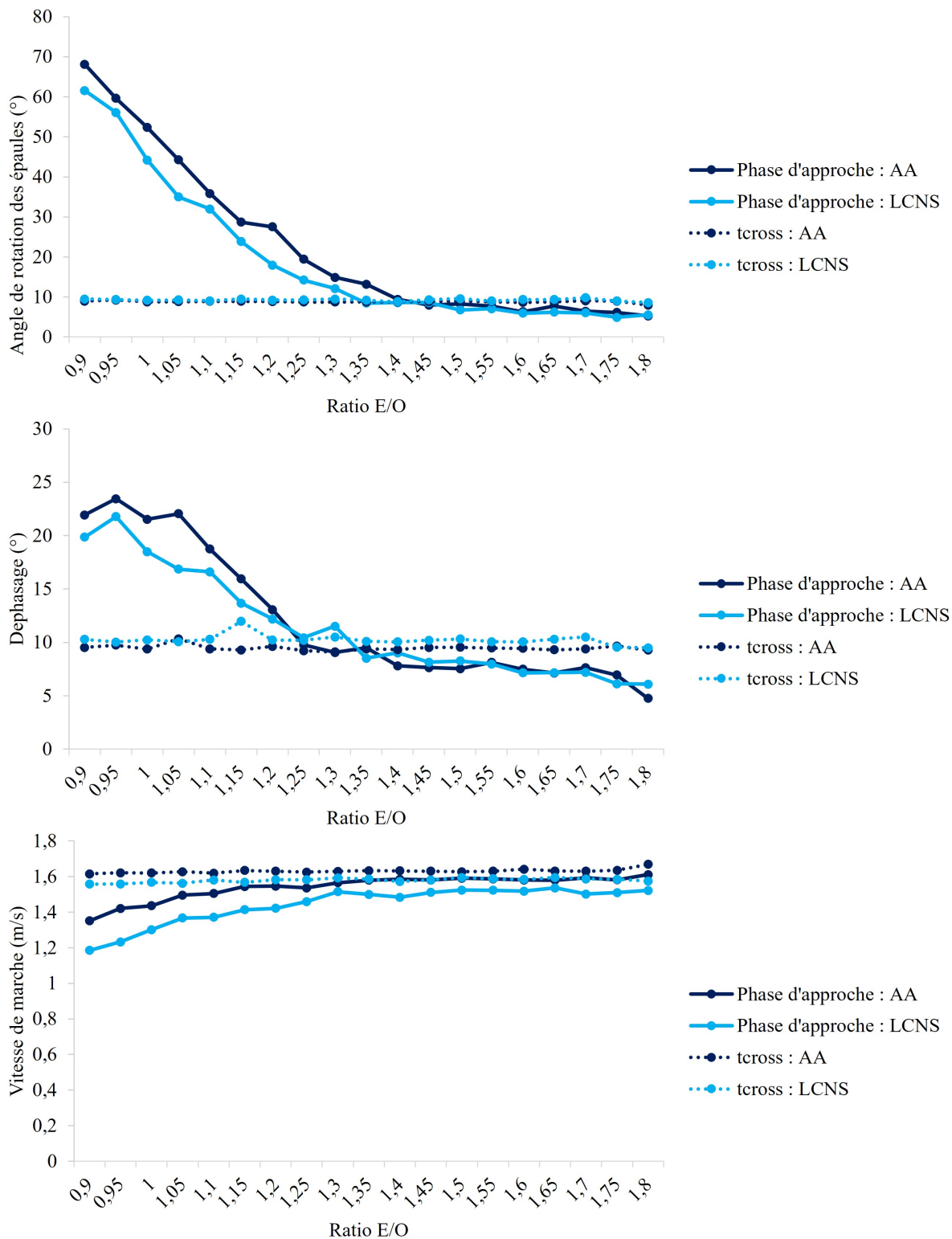


FIGURE 38 – Caractéristiques cinématiques de la marche pendant la phase d’approche et à *tcross* : a. angle de rotation des épaules, b. déphasage entre les angles scapulaire et pelvien et c. vitesse de marche.

DISCUSSION

L'objectif principal était de déterminer si la LCNS affecte les stratégies perceptivo-motrices des participants lorsqu'ils interagissent avec un environnement statique. En particulier, cette étude a exploré le choix du mode d'action dans une tâche de marche à travers des ouvertures, à l'image du franchissement d'une porte, révélé par des seuils critiques (c'est-à-dire la largeur horizontale de l'ouverture pour laquelle les participants ont commencé à tourner leurs épaules).

Le seuil critique observé chez les participants LCNS était plus bas que celui des participants AA (respectivement 1,18 vs 1,33). Chez les adultes AA, ce seuil critique est conforme aux travaux antérieurs, allant de 1,3 à 1,4 selon les auteurs [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney *et al.*, 2014, Higuchi *et al.*, 2006]. En outre, le coefficient de variation était plus faible pour les participants LCNS (0,07) que pour les participants AA (0,11). Ce résultat suggère que les participants LCNS ont utilisé une marge de sécurité plus petite pour passer l'obstacle, en arrêtant de tourner leurs épaules pour une ouverture plus étroite que les participants AA. Cette stratégie identifiée chez tous les participants LCNS (faible coefficient de variation) pourrait s'expliquer par l'influence des facteurs comportementaux et psychologiques liés à une douleur prolongée, qui pèserait à plus ou moins long terme sur les actions motrices [O'Sullivan, 2005, Chiarotto *et al.*, 2015, Bergström *et al.*, 2001, Linton, 2000].

En effet, ce paradigme a également été utilisé dans d'autres populations telles que chez des personnes âgées [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney et Cinelli, 2013a], des personnes présentant une dyspraxie, c'est-à-dire un trouble du développement de la coordination [Wilmot *et al.*, 2015] et chez des enfants [Wilmot et Barnett, 2011]. Les résultats ont montré que les seuils critiques dépendaient des caractéristiques de la population. Par exemple les adultes plus âgés, qui présentent des balancements médio-latéraux du tronc plus élevés et une vitesse de marche plus lente à l'approche de l'ouverture que des personnes plus jeunes, ont un seuil critique plus élevé, compris entre 1,6 et 1,7 [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013b, Hackney et Cinelli, 2013a]. Le seuil critique était positivement corrélé à un balancement du tronc accru, c'est-à-dire que les personnes dont le tronc se balançait davantage pendant la marche faisaient pivoter leurs épaules pour des ouvertures plus larges que leurs homologues plus stables [Hackney et Cinelli, 2011, Hackney et Cinelli, 2013a]. Ces résultats ont été confortés par l'étude des personnes présentant une dyspraxie [Wilmot *et al.*, 2015]. En effet, cette population

présente également un seuil critique et des mouvements médio-latéraux plus importants que la population générale [Wilmot *et al.*, 2015]. Les auteurs ont montré qu’une fois la largeur des mouvements médio-latéraux pris en compte, la différence des seuils critiques entre les groupes a été éliminée [Wilmot *et al.*, 2015]. Cette constatation suggère que les participants âgés et dyspraxiques décident de tourner ou non les épaules en évaluant l’espace pris par leur corps, en se basant à la fois sur la largeur des épaules et sur les mouvements médio-latéraux. De plus, d’autres facteurs semblent être pris en compte, comme chez les enfants où le degré de rotation des épaules était influencé par la variabilité du mouvement médio-latéral du tronc pendant la phase d’approche et par la variabilité de la rotation des épaules au moment du franchissement [Wilmot et Barnett, 2011]. Les auteurs suggèrent que les enfants tournent plus les épaules et pour des ouvertures plus larges que les personnes adultes, afin de prendre en compte leurs mouvements plus variables et de pouvoir être suffisamment étroits dans le plan frontal pour se protéger d’une future collision [Wilmot et Barnett, 2011].

Le deuxième objectif était double, tout d’abord examiner les caractéristiques cinématiques de la marche des participants, puis évaluer l’influence des variables liées à la perception douloureuse.

Pendant la phase d’approche, les participants LCNS présentaient un comportement similaire à celui des participants sans douleur en ce qui concerne la rotation des épaules, le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien, et la stabilité du tronc. Pour la rotation des épaules et le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien, ces résultats sont en accord avec des études antérieures réalisées lors d’essais de marche en ligne droite, sans contrainte de vitesse [Selles *et al.*, 2001, van Dieën *et al.*, 2021, Lamoth *et al.*, 2002]. Par contre, les participants LCNS marchaient plus lentement que les participants sans douleur, ce qui correspond aux résultats retrouvés dans la littérature [Lamoth *et al.*, 2002, Lamoth *et al.*, 2006, Koch et Hänsel, 2018]. Aucun effet de la largeur de l’ouverture sur la vitesse de marche, la rotation des épaules, le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien et la stabilité du tronc n’a été constaté, ce qui suggère que les participants AA et LCNS n’ont pas adapté leur mouvement pendant la phase d’approche. En effet, la phase d’approche permettrait de recueillir des informations visuelles pour un mouvement précis [Patla *et al.*, 2002]. Il a notamment été montré que la dégradation de l’information visuelle pendant cette phase est préjudiciable au franchissement d’un obstacle [Patla *et al.*, 2002]. Cependant, les informations visuelles ne se traduisent pas par des changements de mouvements et ceux-ci n’interviendraient que dans les dernières étapes, c’est-à-dire les derniers pas avant l’obstacle [Montagne *et al.*, 2002, Cinelli *et al.*, 2008]. Wilmot *et al.* [Wilmot et Barnett, 2011] se sont intéressés spécifiquement au franchissement d’une largeur d’ouverture et ont montré que l’angle de rotation des épaules et la vitesse de marche ne dépendent pas, pendant la phase d’approche, de la taille de l’ouverture à

franchir.

A *tcross*, la vitesse de marche, la rotation des épaules et le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien étaient proportionnels au rapport entre la largeur des épaules et la taille de l'ouverture pour les deux groupes. Ainsi, lorsque le rapport entre la largeur des épaules et la taille de l'ouverture diminuait, la vitesse de marche diminuait, l'angle de rotation des épaules et le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien augmentaient, comme cela a déjà été rapporté [Higuchi *et al.*, 2006, Wilmut *et al.*, 2015, Wilmut et Barnett, 2010]. Aucune différence n'a été constatée entre les groupes en ce qui concerne la vitesse de marche, la rotation des épaules et le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien. Ces résultats suggèrent que les participants LCNS ont adapté leurs mouvements de manière similaire aux participants AA. Cependant, les participants LCNS marchant moins vite, ceux-ci ont eu plus de temps pour adapter leur mouvement. Nous supposons ainsi que d'autres paramètres cinématiques sont à prendre en compte. En effet, les résultats d'une récente étude portant sur l'analyse de l'influence de différentes tâches fonctionnelles (flexion du tronc debout, assis-debout, montée d'une marche, action de ramasser et soulever un objet) ont montré qu'alors que les participants LCNS présentaient des différences dont l'effet était modéré pour l'amplitude et faible pour l'activation musculaire, un effet très important de la vitesse angulaire a été rapporté [Christe *et al.*, 2021a]. Nous suggérons que d'autres paramètres cinématiques, tels que la vitesse angulaire de rotation des épaules, devraient être pris en compte dans les prochaines analyses pour la tâche de franchissement d'une ouverture afin de mieux comprendre les stratégies d'adaptation des participants LCNS, notamment sur la valeur de seuil critique observée.

L'un des principaux défis actuels pour mieux comprendre la LCNS est d'identifier les mécanismes impliqués dans la douleur prolongée associée à des modifications du comportement moteur [Moissenet *et al.*, 2021]. Dans cette étude, les scores aux questionnaires portant sur les croyances de peur et d'évitement, la kinésiophobie, l'anxiété et la dépression, les fausses croyances et la qualité de vie n'ont pas été corrélés avec la valeur du seuil critique. Ces résultats peuvent s'expliquer par le faible niveau d'intensité et de variabilité de la douleur ($2 \pm 1,2$), et les faibles scores obtenus pour tous les questionnaires. Actuellement, l'association entre la signature du mouvement des patients LCNS et les facteurs individuels s'intéresse majoritairement à l'intensité de la douleur, les caractéristiques psychologiques, le sexe, l'âge et l'IMC et montre une faible corrélation [Christe *et al.*, 2021b, Arshad *et al.*, 2019], ce qui suggère que d'autres facteurs seraient en jeu. Cette tâche ne permet pas à ce jour de quantifier l'influence du ressenti de la douleur par les participants. D'autres études sont donc nécessaires, en particulier avec une cohorte plus importante, pour observer s'il existe une stratification des seuils critiques en fonction du niveau de douleur sur les variables sensori-discriminatives (intensité, fréquence, durée),

mais également psychologiques.

L'utilisation d'un tel paradigme pour mesurer l'effet de la LCNS semble prometteuse, car elle répond aux recommandations de travaux antérieurs intégrant les plaintes des patients [Chiarotto *et al.*, 2015] et leur capacité à effectuer des activités physiques quotidiennes pour répondre à leurs besoins de base, depuis les soins personnels jusqu'à des activités plus complexes nécessitant une combinaison de compétences. C'est dans cette perspective que, dans une seconde étude, nous proposons de complexifier la tâche de passage à travers des ouvertures, en faisant intervenir de nouveaux facteurs situationnels, mais également des facteurs sociaux.

TROISIÈME PARTIE

**Paradigme de locomotion en
interaction avec un environnement
statique faisant intervenir des
facteurs situationnels et sociaux :
tâche de passage à travers des
ouvertures horizontales (PERL2)**

APPROCHES ET OBJECTIFS

Naviguer dans des environnements dans lesquels sont présents d'autres individus est une tâche que nous rencontrons quotidiennement. Nous avons pu mettre en avant dans la revue de littérature qu'un des concepts fondamentaux permettant de décrire l'évitement de collision est celui de la proxémie, qui décrit la manière dont les humains utilisent un espace personnel lors des interactions avec l'environnement [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005, Gérin-Lajoie *et al.*, 2008]. Durant la locomotion, l'espace personnel peut être illustré comme une zone de protection maintenue autour du marcheur, qui lui laisse un délai suffisant pour percevoir des événements ou des obstacles inattendus, lui permettant ensuite de s'adapter en planifiant et effectuant les ajustements nécessaires [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005, Gérin-Lajoie *et al.*, 2008]. De plus, l'espace personnel semble être impacté par la nature de l'obstacle à contourner [Sanz *et al.*, 2015]. En effet, l'adaptation du mouvement est différente selon s'il s'agit de contourner une forme humanoïde ou une forme inanimée, avec une déviation initiale du contournement plus précoce et une zone de dégagement plus importante dans le cas d'un obstacle humanoïde [Sanz *et al.*, 2015].

Plusieurs études se sont ainsi intéressées à complexifier la tâche de passage à travers une ouverture horizontale en comparant le choix du mode d'action selon que l'ouverture était délimitée par deux humains ou par deux poteaux [Hackney *et al.*, 2015b]. Les résultats ont montré que la praticabilité des ouvertures change lorsque l'on marche entre deux personnes ou deux objets : les individus utilisent une marge de sécurité plus importante et une vitesse de marche plus lente, c'est-à-dire un comportement plus prudent, lors d'interactions avec des obstacles humains [Hackney *et al.*, 2015b]. Il est possible que la plus grande prudence observée soit due au fait que les personnes tiennent compte d'un espace personnel plus important pour les obstacles humains et donc que le degré de prudence est en relation avec des facteurs sociaux [Hackney *et al.*, 2015a, Tomono *et al.*, 2019, Makino *et al.*, 2023].

L'étude précédente portant sur les stratégies perceptivo-motrices des patients LCNS durant une tâche de passage à travers une ouverture horizontale a montré que les patients LCNS arrêtaient de tourner leurs épaules pour des largeurs d'ouverture plus étroites (1,18) que les participants sans douleurs (1,33) [Bilhaut *et al.*, 2023]. Cela suggère que les patients LCNS présenteraient des stratégies plus risquées lors de ce type de tâche motrice minimisant la rotation de leurs épaules. Les travaux présentés dans ce nouveau

chapitre ont pour but d'explorer comment s'adaptent les patients LCNS lors d'une tâche de navigation plus difficile. Pour cela, il était demandé au participant de sélectionner un itinéraire entre deux ouvertures horizontales à franchir pour atteindre un but positionné derrière ces ouvertures. De tels paradigmes n'ont jamais été étudiés dans la population LCNS. Cette tâche de navigation pourrait mettre en évidence les difficultés d'adaptation que présenteraient les participants LCNS en se rapprochant au plus près d'une situation que rencontrent ces patients dans leur vie quotidienne.

Cette tâche de passage à travers une ouverture faisait varier le contexte situationnel (deux largeurs d'ouverture : une étroite et une large) et le contexte social en plaçant pour certains essais un expérimentateur au centre des deux ouvertures. L'objectif principal a été de déterminer si la LCNS affecte la décision du participant de franchir l'une des deux ouvertures en fonction de la largeur de l'ouverture et de la présence ou non d'un expérimentateur. L'objectif secondaire a été double, visant dans un premier temps à étudier les variables cinématiques de la marche et dans un second temps à évaluer l'influence des variables de la perception douloureuse sur le choix de l'ouverture franchie.

Notre hypothèse principale était que les participants LCNS préféreraient opter pour une stratégie moins risquée qu'efficace et emprunteraient un chemin plus long pour atteindre l'objectif. Ainsi, ils n'auraient pas à tourner leur tronc et privilégieraient cette stratégie au détriment du respect des normes d'interactions sociales, en choisissant de passer en avant de l'expérimentateur formant l'ouverture si celle-ci est plus large, permettant de minimiser la rotation des épaules et donc une possible douleur. Concernant la cinématique de la marche, l'hypothèse était que les participants LCNS tourneraient moins les épaules, marcheraient plus lentement et présenteraient des zones de dégagement plus importantes, ce qui expliquerait en partie la stratégie adoptée lors du franchissement de l'obstacle. Enfin, concernant la perception de la douleur, l'hypothèse était que les stratégies locomotrices adoptées par les participants LCNS seraient en partie corrélées à des variables liées à la perception douloureuse (sensori-discriminative, émotionnelle et comportementale).

MÉTHODOLOGIE

2.1 Schéma de l'étude

Cette étude est prospective par échantillonnage comparant un groupe d'adultes asymptomatiques (AA) à un groupe de participants présentant une LCNS, appariés selon l'âge. L'étude comportait deux visites : une visite d'inclusion et une visite pour la passation du protocole (tâche locomotrice et passation de questionnaires liés à la sensation douloureuse). La durée de l'étude pour un individu était de quatre semaines maximum.

2.2 Population

Onze participants LCNS ($48,5 \pm 6,56$ ans, 5 femmes) et 18 participants AA ($43,7 \pm 9,50$ ans, 7 femmes) se sont portés volontaires et ont donné leur consentement écrit pour participer à l'étude.

2.2.1 Critères d'inclusion

Les adultes souffrant de LCNS devaient présenter une douleur située entre la charnière thoraco-lombaire et le pli fessier inférieur, avec ou sans douleur dans l'une ou l'autre des jambes. Cette douleur devait être présente depuis plus de 12 semaines, de façon quotidienne ou quasi quotidienne (au moins 4 jours sur 7). Les participants ne devaient suivre aucun traitement ou avoir un traitement stable depuis au moins deux semaines avant l'inclusion. Pour les deux groupes, les participants devaient parler, lire et comprendre le français, être âgés de 18 à 65 ans, être capables de comprendre les ordres simples et les consignes expérimentales, avoir une vision normale ou corrigée et être affiliés à un régime de sécurité sociale ou bénéficiaires d'un tel régime.

2.2.2 Critères de non-inclusion

Les participants LCNS ne devaient pas présenter de signes d'alerte (drapeaux rouges) orientant vers une pathologie sous-jacente nécessitant une prise en charge spécifique et/ou urgente telle que : litige en cours dans les suites d'un accident du travail, douleur liée à un diagnostic de cancer, symptômes médullaires associés (signes pyramidaux, troubles de la

coordination, déficits moteurs ou sensitifs, troubles sphinctériens, etc.), douleur à la suite d'une infection (transpiration nocturne, fièvre, frissons, abus de drogue intraveineuse, immunodéficience, intervention chirurgicale récente, infection urinaire ou cutanée, etc.), fractures récentes ou pathologiques (accidents, antécédents d'ostéoporose, prise chronique de corticoïdes, perte de poids inexplicée, fatigue, antécédents de cancer, etc.), problèmes vasculaires (pieds froids, diminution du pouls artériel périphérique, etc.). Pour le groupe AA, les participants ne devaient pas présenter de plainte de douleur chronique en cours ou d'antécédents de douleur chronique significative (supérieure à 4/10 pendant au moins six mois) [Queneau *et al.*, 2019], de pathologies ayant un retentissement sur la marche ou la posture, de difficultés à effectuer les déplacements étudiés sans apparition de gêne ou de fatigue exagérée. Enfin, pour les deux groupes de participants, ceux-ci ne devaient pas : être des femmes enceintes ou allaitantes, présenter de troubles cognitifs ou psychologiques incompatibles avec le respect et/ou la compréhension du protocole, être incapables de comprendre le consentement éclairé ni être sous tutelle ou curatelle, participer à un autre protocole de recherche impliquant la personne humaine en parallèle, être des personnes privées de liberté par une décision judiciaire ou administrative, faire l'objet de soins psychiatriques, présenter de signes neurologiques évoquant une maladie neurodégénérative responsable de trouble de la marche (syndrome parkinsonien, etc.).

2.2.3 Moyens de recrutements

Le recrutement des participants LCNS a été réalisé par voie directe au sein du centre de médecine du sport et de réadaptation à l'effort (SPORMED, Rennes), dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR) du Centre Hospitalier Universitaire (CHU, Rennes) et dans le service MPR du centre Patis Fraux (Vern-sur-Seiches). L'inclusion a été réalisée par le docteur Olivier Roze (investigateur principal) au sein de la clinique la Sagesse, par le docteur Philippe Carson-Jouzel au sein du CHU et par le docteur Ala Baban au sein du centre Patis Fraux. Le recrutement des participants AA a été réalisé par voie d'affiche ou par contact direct et leur inclusion a été réalisée par le docteur Olivier Roze (investigateur principal) au sein de la clinique la Sagesse.

2.2.4 Lieu de l'expérimentation

Les expérimentations ont eu lieu dans le gymnase du laboratoire M2S situé à l'adresse suivante : Campus de Ker Lann, avenue Robert Schuman, 35170 BRUZ.

2.2.5 Agrément et autorisation

Cette étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes (CPP) Île-de-France VI, le 26 juin 2023 (n°2023-A00870-45).

2.3 Schéma expérimental

Trois obstacles (figure 39) constituant les ouvertures à franchir ont été placés dans un gymnase (20 m x 30 m). L'origine du repère est l'obstacle placé au milieu séparant les deux ouvertures, l'axe des x étant celui le long duquel les participants marchent. Le système de capture du mouvement est composé de 23 caméras optoélectroniques, disposées autour de la zone expérimentale, afin d'enregistrer la position de 14 marqueurs passifs réfléchissants disposés sur le participant au niveau des deux acromions, de la 7^e cervicale, des épines iliaques supérieures antérieures et postérieures, des malléoles externes de cheville et sur un casque de vélo porté par le participant. L'information enregistrée par ces caméras ne concerne que les coordonnées des marqueurs au cours du temps. L'analyse cinématique de la locomotion a été effectuée sur les données, enregistrées à l'aide du logiciel Qualisys Track Manager (QTM). La zone expérimentale a été installée au milieu du gymnase.

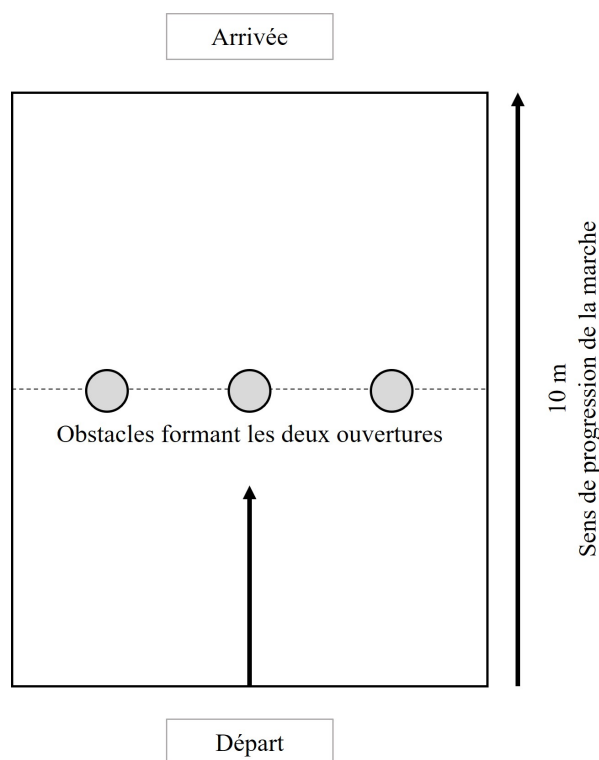


FIGURE 39 – Configuration de la zone expérimentale du protocole de recherche PERL2.

2.4 Procédure

L'étude s'est déroulée en deux temps : une première visite d'inclusion et une seconde pour l'expérimentation.

2.4.1 Visite d'inclusion

Les participants LCNS et les participants AA ont été vus par l'un des médecins investigateurs de l'étude au cours d'une consultation clinique sous forme d'entretien et examen médical permettant de justifier de l'inclusion ou de la non-inclusion des participants. Il s'agissait de participants LCNS consultant pour la première fois où de participants LCNS déjà suivis pour leur douleur. Le médecin a répondu aux questions des participants avant signature du consentement éclairé, puis a complété les critères d'inclusion et de non-inclusion.

2.4.2 Visite pour l'expérimentation

2.4.2.1 Évaluation psychologique

La deuxième visite a été réalisée dans un délai maximum d'un mois après la visite médicale. Elle a consisté dans un premier temps à l'évaluation psychologique, sous forme d'un entretien individuel réalisé par une psychologue spécialisée en psychologie cognitive. L'ensemble des participants a complété des échelles et questionnaires auto-administrés portant sur l'anxiété, la dépression et la qualité de vie. Les participants douloureux ont également complété des échelles et questionnaires portant sur la perception douloureuse : intensité de la douleur, niveau de catastrophisation, niveau de peur liée au mouvement, niveau de flexibilité psychologique, niveau sur les croyances de peur et d'évitement et sur le fonctionnement physique. L'ensemble des échelles et questionnaires choisis ont été validés pour la population cible et sont détaillés dans la partie 2, section 2.5.1. La durée totale de passation pour les participants LCNS de l'ensemble de ces tests est estimée à 40 minutes maximum, et à 10 minutes pour les participants AA.

2.4.2.2 Évaluation cinématique

L'évaluation cinématique a été réalisée par les investigateurs de l'étude, le même jour, après une pause de 15 minutes à la suite de l'évaluation psychologique. Le protocole de marche consistait à demander aux participants de réaliser tout d'abord 2 essais sur une distance de 10 m afin de mesurer leur vitesse de confort en l'absence d'interaction avec un obstacle sur leur trajectoire. Puis ils ont réalisé 4 blocs de 28 essais présentés dans un ordre randomisé.

Un essai consistait à placer le participant à une distance de 5 m des ouvertures horizontales. Celui-ci devait alors marcher en ligne droite à la vitesse qu'il souhaitait, passer à travers l'une des deux ouvertures, et marcher jusqu'au marquage au sol placé 5 m après l'obstacle. Le participant devait alors rester dos aux ouvertures jusqu'à ce que l'expérimentateur l'autorise à se retourner. Puis il recommençait la même tâche. Les trois conditions proposées étaient les suivantes :

- La première condition consistait à demander aux participants de franchir l'une des deux ouvertures de 1,8 fois la largeur des épaules : ce ratio correspond à une largeur d'ouverture ne demandant pas d'adaptation du mouvement. La position des buts à atteindre a été calculée en fonction de la largeur des épaules des participants pour être placés à des ratios de 2,7, 1,8, 0,9 et 0 fois la largeur des épaules des participants et notés E/O. Les ratios négatifs correspondent à la position des buts à atteindre positionnés du côté de l'ouverture gauche. Les ratios positifs correspondent à la position des buts à atteindre positionnés du côté de l'ouverture droite. La première condition constitue les essais contrôles (figure 40.a.) et sera nommée condition *Sym* pour condition symétrique.
- La deuxième condition consistait à demander aux participants de franchir l'une des deux ouvertures de 1,8 ou 1 fois la largeur des épaules. Le ratio de 1 se rapporte à une largeur horizontale où les participants sont obligés d'adapter leur mouvement. La position des buts à atteindre a été calculée en fonction de la largeur des épaules des participants pour être placés à des ratios de 2,7, 1,8 et 0,9 du côté de l'ouverture la plus large (égale à 1,8 fois la largeur des épaules des participants), et de 1,5, 1 et 0,5 du côté de l'ouverture la plus étroite (égale à 1 fois la largeur des épaules des participants). Les ratios négatifs correspondent à la position des buts à atteindre positionnés du côté de l'ouverture la plus large. Les ratios positifs correspondent à la position des buts à atteindre positionnés du côté de l'ouverture la plus étroite. La deuxième condition permet d'évaluer l'influence des facteurs situationnels (figure 40.b.) et sera nommée condition *Asym* pour condition asymétrique.
- La troisième condition consistait à demander aux participants de franchir l'une des deux ouvertures de 1,8 ou 1 fois la largeur des épaules, en passant devant un expérimentateur tourné soit vers l'ouverture la plus étroite soit vers l'ouverture la plus large. Comme précédemment, la position des buts à atteindre a été calculée en fonction de la largeur des épaules des participants et de la largeur d'ouverture. La troisième condition permet d'évaluer l'influence des facteurs sociaux (figure 40.c. et d.) et sera nommée condition *HumEtroite* pour la condition dans laquelle l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture étroite, et *HumLarge* pour la condition dans laquelle l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture large.

À la fin des 4 blocs, les participants étaient invités à réaliser 2 derniers essais sur une distance de 10 m afin de mesurer leur vitesse de confort en l'absence d'interaction avec un obstacle sur leur trajectoire. Avant le premier bloc et après chaque bloc, les investigateurs ont également demandé aux participants LCNS de coter leur douleur sur l'EVA renseignée dans les cahiers d'observation. Chaque participant a réalisé 116 essais correspondant à une distance de 1160 m pendant l'expérimentation. La durée d'un essai était d'environ 30 s (10 s de marche et 20 s de pause entre les essais). La durée totale de l'expérimentation

était d'une heure. À tout moment, un temps de repos pouvait être alloué aux participants, la fatigue n'étant pas un paramètre pris en compte dans cette recherche.

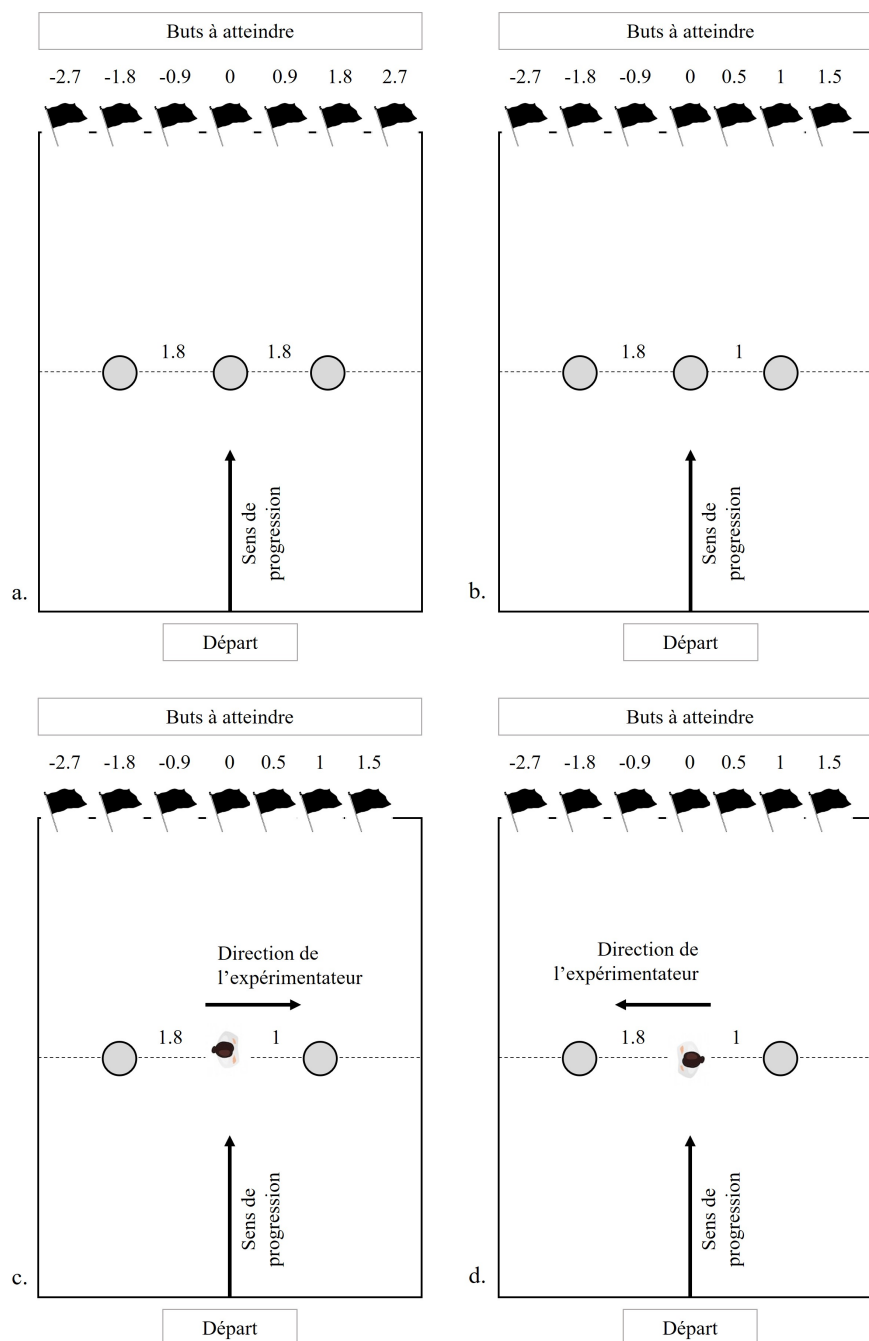


FIGURE 40 – Schéma expérimental du protocole de recherche PERL2. a. Condition *Sym*. b. Condition *Asym*. c. Condition *HumEtroite*. d. Condition *HumLarge*.

2.5 Analyse des données

2.5.1 Échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs accompagnant la douleur

Afin de déterminer quelles variables liées à la perception douloureuse ont pu influencer les actions des participants, nous avons examiné comment les participants discriminaient leur douleur, leur fonctionnement psychologique, leur fonctionnement physique et leur qualité de vie à l'aide d'échelles et de questionnaires auto-administrés. La description des échelles et questionnaires utilisés portant sur l'ensemble de ces variables est présentée dans la partie 2, section 2.5.1.

2.5.2 Variable décisionnelle

Pour répondre à l'objectif principal, nous avons utilisé une variable décisionnelle nous apportant des indices sur le choix du mode d'action réalisé par le participant, c'est-à-dire le choix de l'ouverture franchie en fonction du but à atteindre et de la condition expérimentale. Nous avons identifié les essais dans lesquels les participants ont décidé de franchir telle ou telle porte en fonction des facteurs situationnels et sociaux. Pour chaque condition, nous avons effectué une régression logistique permettant de déterminer si les participants ont choisi de franchir l'ouverture où une adaptation du mouvement est nécessaire (ouverture étroite) ou l'ouverture ne nécessitant pas d'adaptation (ouverture large).

2.5.3 Données cinématiques

Pour éliminer les oscillations dues à l'activité des pas, les données ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas Butterworth de 10 Hz. Les largeurs d'épaules et d'ouvertures ont été calculées à partir de la position horizontale des marqueurs placés sur les acromions et sur les portes. Les données cinématiques ont été prises entre la deuxième et la quatrième seconde après le début du mouvement pour les essais sans obstacles sur la trajectoire et au moment où le participant traverse l'une des deux ouvertures pour les conditions expérimentales. Nous avons ensuite calculé les variables cinématiques suivantes : la vitesse de marche, l'angle de rotation des épaules, le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien et la zone de dégagement.

2.5.3.1 Vitesse de marche

La position du centre de masse (CdM) du participant a été calculée en prenant la position moyenne des marqueurs placés sur les deux acromions, les hanches et la 7^e cervicale. La vitesse de marche instantanée a été calculée comme la dérivée temporelle première de

la position sur l'axe antéro-postérieur et sur l'axe médio-latéral du CdM pour les essais en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire et pour les essais expérimentaux.

2.5.3.2 Zone de dégagement

La zone de dégagement correspond à la distance entre le participant et l'obstacle central formant les deux ouvertures, c'est-à-dire un poteau pour la condition avec modification de l'environnement et une personne humaine pour les conditions avec modification des facteurs sociaux. La zone de dégagement a été calculée à partir des coordonnées horizontales des marqueurs placés sur les deux acromions et l'origine de la zone expérimentale au moment du franchissement de l'une des deux ouvertures. Ainsi, pour le franchissement de l'ouverture placée à gauche, la distance a été calculée à partir des coordonnées horizontales de l'acromion droit et pour le franchissement de l'ouverture placée à droite, la distance a été calculée à partir des coordonnées horizontales de l'acromion gauche. Deux variables ont été retenues : la première est la zone de dégagement en valeur absolue qui correspond à la valeur réelle entre l'épaule et l'origine du repère et la seconde est la zone de dégagement en valeur relative qui correspond au ratio entre la zone de dégagement divisée par la largeur de l'ouverture (Z/O).

2.5.3.3 Rotation des épaules

L'angle de rotation des épaules de chaque participant a été calculé à partir des coordonnées horizontales des marqueurs placés sur les deux acromions pour les essais en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire et pour les essais expérimentaux. L'angle a été défini dans le plan horizontal entre la ligne passant par les deux marqueurs positionnés sur les acromions et la ligne formée par le déplacement sur l'axe antéro-postérieur du CdM. Nous avons utilisé la valeur absolue de cet angle, c'est-à-dire que nous n'avons pas différencié l'épaule qui entrait la première dans l'ouverture.

2.5.3.4 Déphasage entre les angles scapulaire et pelvien

La différence entre les angles de rotation des épaules et du bassin dans le plan horizontal de chaque participant a été calculée à partir des coordonnées horizontales du déplacement des marqueurs positionnés sur les deux acromions et sur les épines iliaques antéro-supérieures pour les essais en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire et pour les essais expérimentaux. Nous avons utilisé la valeur absolue de cet angle.

2.6 Analyse statistique

L'analyse des données a été réalisée à l'aide de RStudio (version 4,1.3 ; RStudio, Inc) et MATLAB (Version R2021b, MathWorks, Natick, USA). La signification statistique a

été fixée à $p < 0,05$. La normalité et l'homogénéité de la variance ont été évaluées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Levene. Les différences entre les groupes pour les caractéristiques des participants (âge, sexe, HADS, EQ-5) ont été évaluées à l'aide des tests de Student, de Welch ou de Wilcoxon selon les conditions de normalité et d'homogénéité de la variance. Concernant les variables déterminant le choix du mode d'action des participants, trois analyses ont été réalisées. Premièrement, une régression logistique par groupe a été effectuée pour chaque condition expérimentale pour déterminer le seuil à partir duquel les participants ont franchi l'ouverture droite pour la condition *Sym* et l'ouverture étroite pour les trois autres conditions. Ensuite, une comparaison du nombre d'essais où les participants ont franchi l'ouverture gauche pour la condition *Sym* et l'ouverture large pour les trois autres conditions par but à atteindre a été effectuée à l'aide du test du X^2 d'indépendance entre les groupes. Pour finir, une comparaison entre les conditions expérimentales *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* a été effectuée pour chaque but à atteindre par groupe à l'aide du test du X^2 d'indépendance. Une analyse post-hoc par paire avec correction de Bonferroni a ensuite été effectuée. Concernant les caractéristiques de la marche (vitesse de marche, zone de dégagement, rotation des épaules et déphasage entre les angles scapulaire et pelvien) une comparaison entre les groupes, les buts à atteindre et les conditions expérimentales a été effectuée à l'aide d'une ANOVA mixte. Une analyse post-hoc par paire avec correction de Bonferroni a ensuite été réalisée. Des tests de corrélations de Spearman ont été réalisés entre les scores obtenus aux échelles et questionnaires portant sur les facteurs accompagnant la douleur et le pourcentage d'essais où l'ouverture large a été franchie, pour chaque but à atteindre et chaque condition.

RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques des participants

L'âge et le sexe n'étaient pas significativement différents entre les groupes LCNS et AA. Le groupe AA avait un score de qualité de vie plus élevé [$W = 182$, $p < 0,0001$, $r = 0,7$] et un score de dépression moins élevé [$t(27) = -2,91$, $p < 0,01$, $d = -1,11$] que les participants LCNS. Les participants AA présentaient une tendance à un score d'anxiété inférieur aux participants LCNS [$t(27) = -1,99$, $p = 0,057$, $d = -0,76$]. Les caractéristiques des participants LCNS et AA sont présentées dans le tableau 4.

Participants (n)	LCNS (11)	AA (18)	p-value
Age - m(sd)	48,5 (6,56)	43,7(9,5)	0,16
Sex (F/H)	6/5	11/7	1
MMSE - med(iqr)	29(1,5)	29(1)	0,16
HADS - m(sd)			
Anxiété	8,64(3,04)	6,61(2,4)	0,06
Dépression	6,18(2,96)	3,39(2,15)	**
EQ5D - med(iqr)	0,49(0,25)	0,92(0,09)	**
RMDQ - m(sd)	10,09(4,89)		
FABQ - m(sd)			
Activité physique	13,73 (6,59)		
Travail	28,36 (9,92)		
PCS - m(sd)	28,82 (8,64)		
TSK - m(sd)	43,45 (9,29)		
PIPS - m(sd)			
Evitement	41,09 (11,94)		
Fusion	32,36 (5,91)		
score total	73,45 (15,05)		
EVA - m(sd)	2,54 (1,51)		

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

LCNS : Lombalgie Chronique Non-Spécifique. m(sd) : moyenne (écart-type), med(iqr) : médiane (inter-quartile). MMSE : Mini Mental State Examination (rang 0-30). HADS : Hospital Anxiety and Depression Scale avec une sous-échelle portant sur l'anxiété (rang 0-21) et une sous-échelle portant sur la dépression (rang 0-21). EQ5D : EuroQol 5 Dimension (rang 0-1). RMDQ : Roland Morris Disability Questionnaire (rang 0-24). FABQ : Fear Avoidance Belief Questionnaire avec une sous-échelle portant sur l'activité physique (rang 0-24) et une sous-échelle portant sur le travail (rang 0-42). PCS : Pain Catastrophizing Scale (rang 0-52). TSK : Tampa Scale Kinesiophobia (rang 0-68). PIPS : Psychological Inflexibility in Pain Scale avec une sous-échelle portant sur l'évitement (rang 0-70) et une sous-échelle portant sur la fusion cognitive (rang 0-24). EVA : Echelle Visuelle Analogique (rang 0-10).

TABLEAU 4 – Caractéristiques des participants pour le protocole de recherche PERL2.

3.2 Variable décisionnelle

Le choix du passage entre l'ouverture gauche ou l'ouverture droite pour la condition *Sym* et le choix du passage entre l'ouverture large ou étroite pour les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* sont présentés sur la figure 41.

3.2.1 Condition *Sym*

Pour la condition sans modification du contexte situationnel et social (condition *symétrique*) (figure 41.a.), les participants AA et LCNS présentent respectivement un seuil de -0,07 et -0,25. Ces seuils sont tous les deux placés vers le but à atteindre "0" qui est le but positionné derrière le poteau central délimitant les deux ouvertures. Ainsi, les deux groupes ont choisi de franchir l'ouverture gauche pour les buts à atteindre positionnés du côté gauche et de franchir l'ouverture droite pour les buts à atteindre positionnés du côté droit. Une différence significative entre les deux groupes a été identifiée pour le but à atteindre "-1,8" : la proportion du nombre d'essais où les participants LCNS ont choisi de franchir l'ouverture droite est plus importante (10,6%) que pour les participants AA (1,3%).

Une seconde analyse descriptive a été effectuée pour déterminer quels étaient les participants ayant choisi de passer par l'ouverture opposée aux buts à atteindre. Les résultats montrent que pour les buts à atteindre placés du côté de l'ouverture gauche, un participant AA et trois participants LCNS ont choisi de franchir l'ouverture de droite. Pour les buts à atteindre placés du côté de l'ouverture droite, deux participants AA et trois participants LCNS ont choisi de franchir l'ouverture de gauche. Sur l'ensemble des participants ayant choisi de franchir l'ouverture opposée aux buts à atteindre, un seul participant LCNS est le même dans les deux conditions.

3.2.2 Condition *Asym*

Pour la condition avec modification du contexte situationnel (condition *Asym*) (figure 41.b.), les participants AA et LCNS présentent respectivement un seuil de 0,77 et 1,37. Ainsi, les participants AA ont décidé de prendre l'ouverture étroite à partir de l'obstacle "0,5", alors que les participants LCNS ont décidé de prendre l'ouverture étroite à partir de l'obstacle "1". Une différence significative entre les groupes a été identifiée pour les buts à atteindre "1" et "1,5". La proportion du nombre d'essais où les participants LCNS ont choisi de franchir l'ouverture large est plus importante (respectivement 50% et 47,7%) que pour les participants AA (respectivement 20,8% et 20,8%).

Une seconde analyse descriptive a été effectuée pour déterminer quels étaient les participants ayant choisi de passer par l'ouverture opposée aux buts à atteindre pour la grande largeur d'ouverture. Les résultats montrent que pour les buts à atteindre placés du côté

de l'ouverture large, un seul participant LCNS a choisi de franchir l'ouverture étroite. Ce participant est le même que celui ayant choisi de franchir l'ouverture opposée aux buts à atteindre pour la condition *Sym* pour l'ouverture droite et gauche.

3.2.3 Condition *HumEtroite*

Pour la condition *HumEtroite* (figure 41.c.), les participants AA et LCNS présentent respectivement un seuil de 1,7 et 1,79. Ces seuils sont tous les deux placés après le but à atteindre "1,5", c'est-à-dire que les participants ont décidé de franchir l'ouverture large quel que soit le but à atteindre. Pour chaque but à atteindre, aucune différence significative entre les groupes n'a été identifiée concernant la proportion du nombre d'essais où l'ouverture large a été franchie.

Une seconde analyse descriptive a été effectuée pour déterminer quels étaient les participants ayant choisi de passer par l'ouverture opposée aux buts à atteindre pour la grande largeur d'ouverture. Les résultats montrent qu'un participant AA et deux participants LCNS ont choisi de franchir l'ouverture étroite pour des buts à atteindre positionnés derrière l'ouverture large.

3.2.4 Condition *HumLarge*

Pour la condition avec modification du contexte situationnel et social où l'expérimentateur est dirigé vers l'ouverture large (figure 41.d.), les participants AA et LCNS présentent un seuil de respectivement 1,47 et 1,64. Ainsi, les participants AA et LCNS ont décidé de prendre l'ouverture large quel que soit le but à atteindre. Pour chaque but à atteindre, aucune différence significative entre les groupes n'a été identifiée concernant la proportion du nombre d'essais où l'ouverture large a été franchie.

Une seconde analyse descriptive a été effectuée pour déterminer quels étaient les participants ayant choisi de passer par l'ouverture opposée aux buts à atteindre pour la grande largeur d'ouverture. Les résultats montrent qu'un participant AA et deux participants LCNS ont choisi de franchir l'ouverture étroite pour des buts à atteindre positionnés derrière l'ouverture large. Le participant AA est le même que pour la condition *HumEtroite*. Pour les participants LCNS, un des deux participants est le même que pour la condition *HumEtroite*. Cependant, ces participants ne sont pas les mêmes que ceux relevés pour les conditions *Sym* et *Asym*.

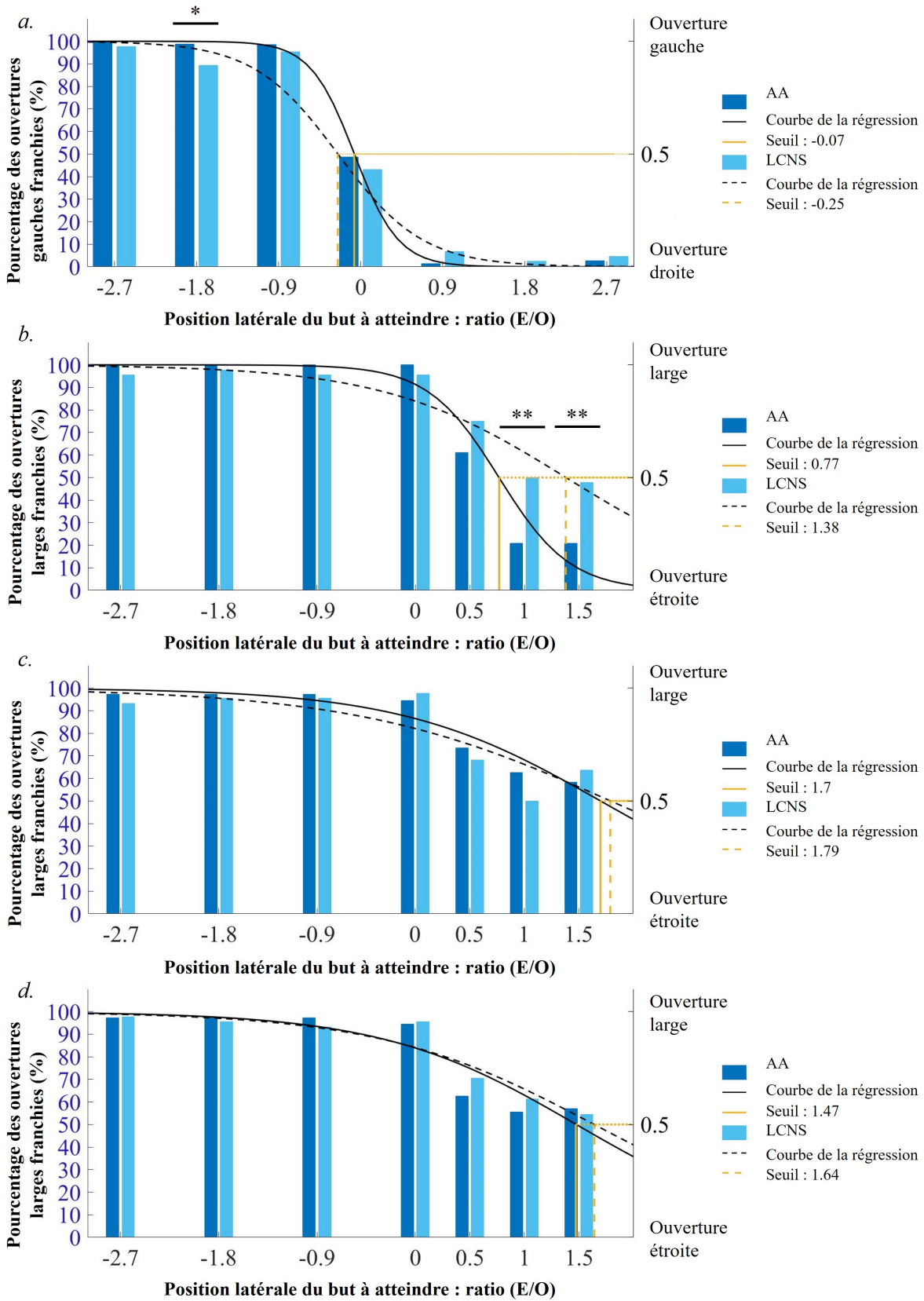


FIGURE 41 – Représentation graphique du choix de l'ouverture franchie en fonction du but à atteindre pour les quatre conditions : a. Condition *Sym*, b. Condition *Asym*, c. Condition *HumEtroite* et d. Condition *Humlarge*.

3.2.5 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*

Une comparaison par paire portant sur les essais dans lesquels les participants ont franchi l'ouverture large a été effectuée pour comparer l'effet de la condition expérimentale pour chaque groupe et chaque but à atteindre (tableau 5). Pour chaque groupe, aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions expérimentales pour les buts à atteindre "-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5". Pour les buts à atteindre "1" et "1,5", aucune différence entre les conditions n'a été identifiée pour le groupe LCNS. Par contre, pour le groupe AA, les participants ont significativement moins franchi la grande largeur d'ouverture pour la condition *Asym* en comparaison avec les deux conditions faisant varier le contexte social (condition *HumEtroite* : $p < 0,0001$; condition *HumLarge* : $p < 0,0001$). Aucune différence significative n'a été observée entre les conditions *HumEtroite* et *HumLarge*.

Groupes	But à atteindre	<i>Asym</i>	<i>HumEtroite</i>	<i>HumLarge</i>	<i>p</i>
AA	"-2,7"	72	70	70	
LCNS	"-2,7"	42	41	43	
AA	"-1,8"	72	70	70	
LCNS	"-1,8"	43	42	42	
AA	"-0,9"	72	70	70	
LCNS	"-0,9"	42	42	41	
AA	"0"	72	68	68	
LCNS	"0"	42	43	42	
AA	"0,5"	44	53	45	
LCNS	"0,5"	33	30	31	
AA	"1"	15	45	40	***
LCNS	"1"	22	22	27	
AA	"1,5"	15	42	41	***
LCNS	"1,5"	21	28	24	

*** $p < 0,001$

TABLEAU 5 – Nombre d'essais où les participants ont franchi l'ouverture large (1,8) pour chaque but à atteindre dans les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*.

Éléments clefs : variable décisionnelle

- Lorsque l'environnement est symétrique, le seuil entre les deux groupes est proche (-0,07 pour les participants AA et -0,25 pour les participants LCNS) et les deux groupes de participants ont décidé de changer d'ouverture à franchir pour le but positionné derrière le poteau central formant le milieu des deux ouvertures.
- Lorsque les ouvertures sont asymétriques, le changement de configuration spatiale des largeurs d'ouvertures a induit un décalage du seuil pour les deux groupes de participants par rapport à la condition symétrique. Le décalage du seuil est plus important chez les participants LCNS (1,38) que chez les participants AA (0,77) et les participants LCNS présentent un pourcentage d'essais où l'ouverture large a été franchie plus important pour les deux buts positionnés le plus latéralement derrière l'ouverture étroite.
- Lorsque les ouvertures sont asymétriques avec une modification du contexte social, le seuil est décalé par rapport à la condition asymétrique seule et se situe proche ou après la valeur de la position la plus latérale du but à atteindre derrière l'ouverture étroite (1,5).
- Alors que les participants AA franchissent significativement moins l'ouverture large pour les conditions asymétriques en comparaison des conditions asymétriques avec modification du contexte social, les participants LCNS ne présentent pas de différence au niveau du pourcentage d'essais où l'ouverture large a été franchie entre ces conditions.

3.3 Caractéristiques de la marche au moment du franchissement de l'ouverture

Dans cette section, plusieurs analyses ont été effectuées selon la variable cinématique étudiée. Ainsi, **pour la vitesse de marche et la zone de dégagement**, nous avons effectué les analyses suivantes :

- Comparaison entre les groupes pour la condition *Sym*
- Comparaison entre les groupes pour la condition *Asym*
- Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture large
- Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture étroite

Pour la condition *Sym*, les données du but à atteindre placé en "0", c'est-à-dire le but placé derrière le poteau central formant les deux ouvertures, ont été analysées séparément en fonction de l'ouverture franchie par le participant. "0 Gauche" correspondant à l'ouverture gauche franchie et "0 Droite" correspondant à l'ouverture droite franchie.

Pour les conditions *Asym*, *HumEtroite*, *HumLarge*, la comparaison entre le franchissement de l'ouverture large ou étroite est la suivante :

- Pour la condition *Asym*, la valeur seuil a été fixée à "0,5", correspondant aux essais où les participants sont passés par l'ouverture large pour les buts à atteindre "-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5", et sur les essais dans lesquels les participants sont passés par l'ouverture étroite pour les buts à atteindre "1" et "1,5".
- Pour la comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture large, le seuil a été fixé à "0,5", correspondant au but à atteindre où la majorité des participants a décidé de franchir l'ouverture large : comparaison entre les groupes pour les buts à atteindre "-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5"
- Pour la comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture étroite, nous avons décidé d'effectuer une comparaison entre les groupes pour les buts à atteindre "0,5", "1" et "1,5" qui correspondaient aux buts à atteindre avec un échantillon assez important pour effectuer les analyses statistiques (tableau 6 et 7).

Conditions	Asym		HumEtroite		HumLarge	
	AA	LCNS	AA	LCNS	AA	LCNS
-2,7	18	11	18	11	18	11
-1,8	18	11	18	11	18	11
-0,9	18	11	18	11	18	11
0	18	11	18	11	18	11
0,5	18	10	17	10	14	10

TABLEAU 6 – Nombre de participants ayant franchi l’ouverture large pour chaque but à atteindre et chaque condition.

Conditions	Asym		HumEtroite		HumLarge	
	AA	LCNS	AA	LCNS	AA	LCNS
0,5	10	6	8	11	7	11
1	15	6	9	11	7	11
1,5	15	7	11	11	6	11

TABLEAU 7 – Nombre de participants ayant franchi l’ouverture étroite pour chaque but à atteindre et chaque condition.

Pour l’angle de rotation des épaules et le déphasage entre les angles scapulaire et pelvien, les analyses sont les suivantes et n’ont été effectuées que lorsque les participants ont franchi l’ouverture étroite :

- Comparaison entre les groupes pour la condition *Asym*
- Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*

3.3.1 Vitesse de marche

3.3.1.1 Condition *Sym*

Un effet significatif du groupe [$F(24, 1) = 9,75, p = 0,005, \eta_p^2 = 0,282$] et du but à atteindre [$F(92,97, 3,87) = 3,64, p = 0,009, \eta_p^2 = 0,005$] ont été identifiés (figure 42.a.). Il n'y avait pas d'effet d'interaction entre le groupe et le but à atteindre ($p > 0,05$). Les participants LCNS ont marché significativement plus lentement que les participants AA ($p < 0,0001$). Concernant la différence entre les buts à atteindre, une différence significative a été identifiée entre le but à atteindre placé en "0" et le but à atteindre placé en "1,8" ($p < 0,05$).

3.3.1.2 Condition *Asym*

Un effet significatif du groupe [$F(14, 1) = 6,78, p = 0,027, \eta_p^2 = 0,287$] a été identifié (figure 42.b.). Aucun effet du but à atteindre ($p > 0,05$), ni d'interaction entre le groupe et le but à atteindre ($p > 0,05$) n'ont été identifiés. Les participants LCNS ont marché significativement plus lentement que les participants AA ($p < 0,0001$).

3.3.1.3 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture large

Un effet principal du groupe a été identifié pour l'ensemble des buts à atteindre (figure 43) : "-2,7" [$F(27, 1) = 13,46, p = 0,001, \eta_p^2 = 0,32$], "-1,8" [$F(27, 1) = 12,45, p = 0,002, \eta_p^2 = 0,31$], "-0,9" [$F(27, 1) = 11,19, p = 0,002, \eta_p^2 = 0,29$], "0" [$F(27, 1) = 11,09, p = 0,003, \eta_p^2 = 0,28$] et "0,5" [$F(17, 1) = 7,09, p = 0,016, \eta_p^2 = 0,29$]. Ainsi, les participants AA ont marché significativement plus vite que les participants LCNS pour l'ensemble des essais. Aucun effet significatif de la condition ni d'interaction entre le groupe et la condition n'ont été identifiés.

3.3.1.4 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture étroite

Un effet principal du groupe a été identifié pour l'ensemble des buts à atteindre (figure 44) : "0,5" [$F(6, 1) = 25,89, p = 0,002, \eta_p^2 = 0,79$], "1" [$F(11, 1) = 14,42, p = 0,003, \eta_p^2 = 0,54$] et "1,5" [$F(14, 1) = 19,12, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,55$]. Ainsi, les participants AA ont marché significativement plus vite que les participants LCNS pour l'ensemble des essais. Aucun effet de la condition ni d'interaction entre le groupe et la condition n'ont été identifiés.

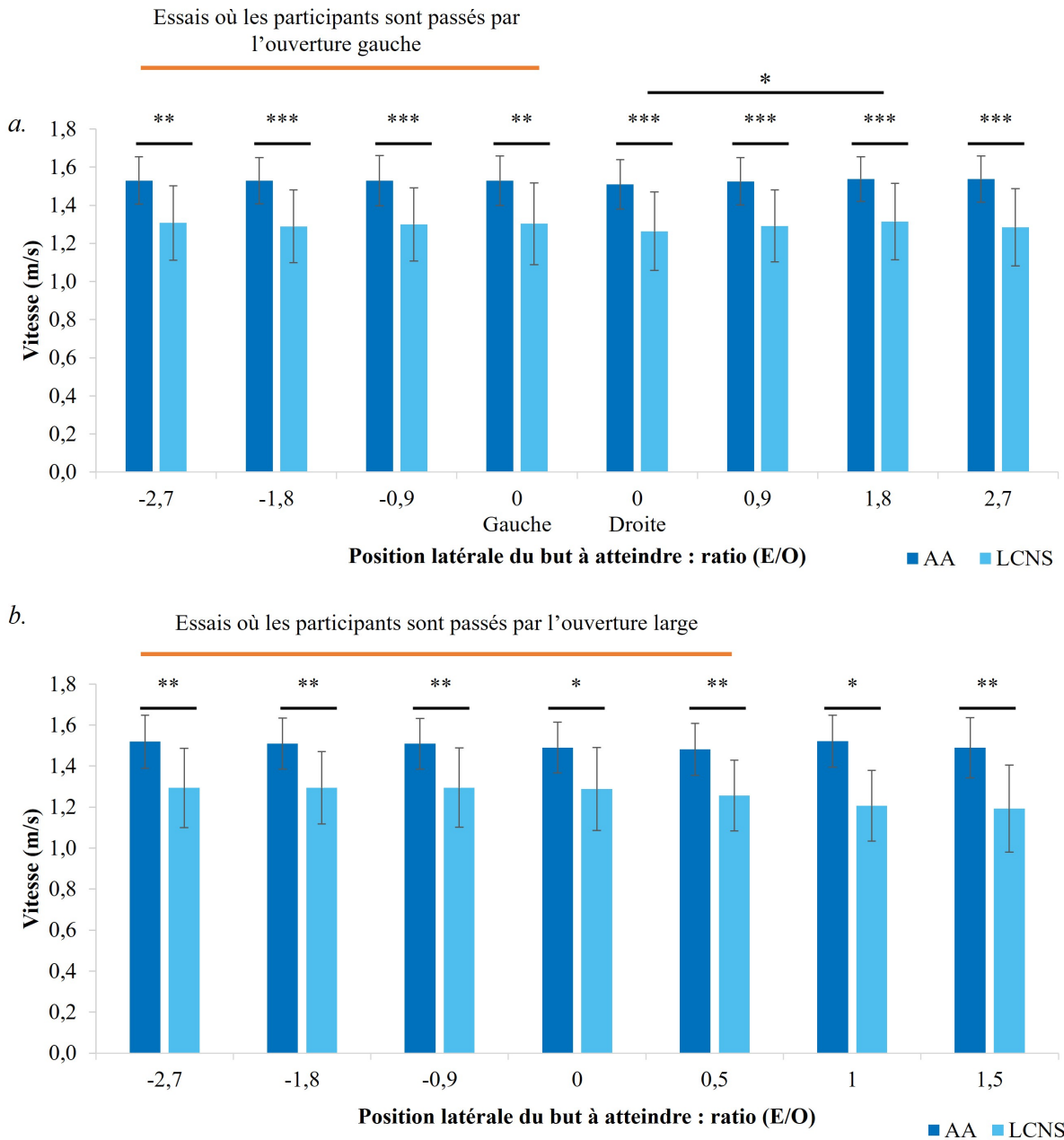


FIGURE 42 – Vitesse de marche au moment du franchissement en fonction du but à atteindre et de l'ouverture franchie pour les conditions a. *Sym* et b. *Asym*.

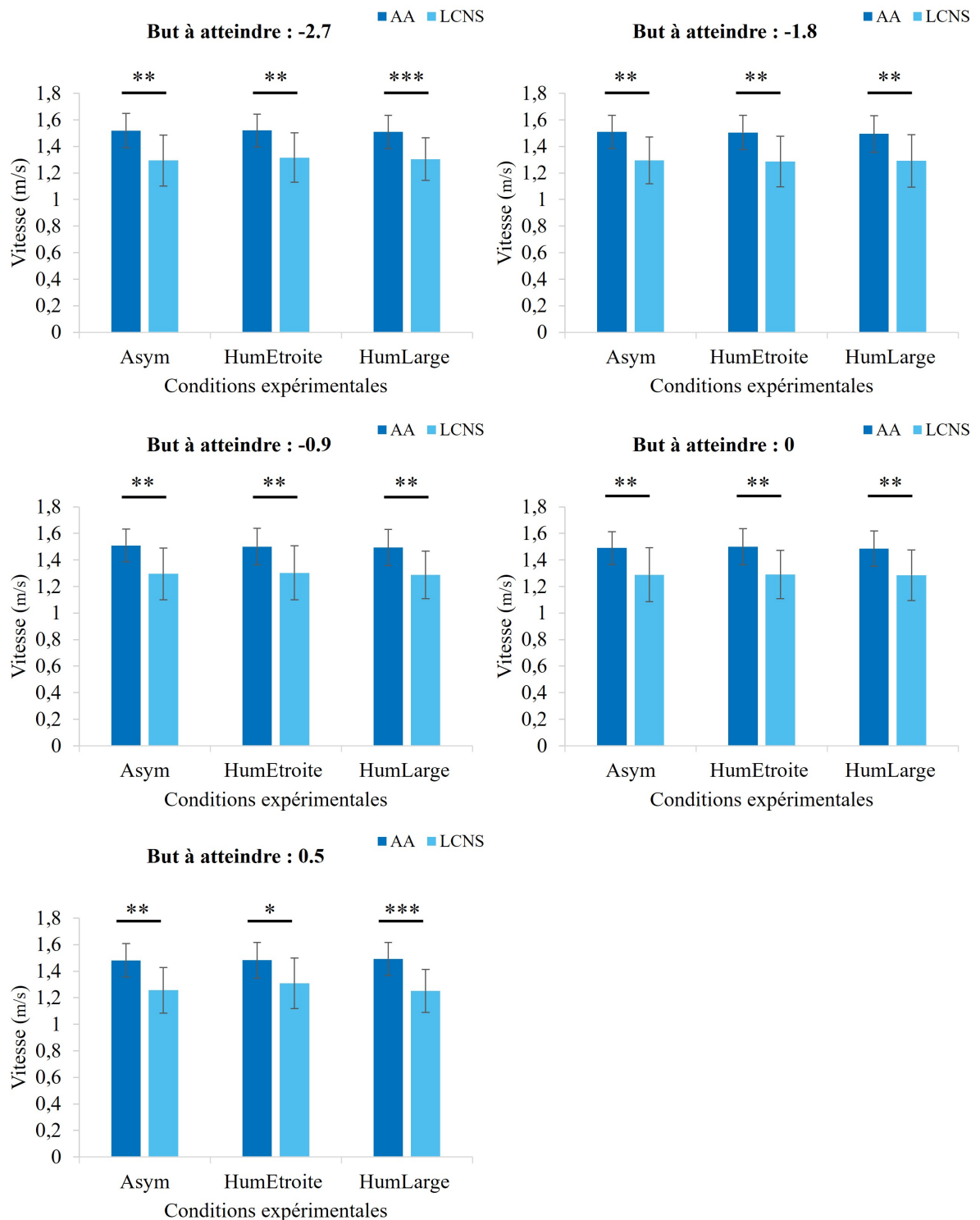


FIGURE 43 – Vitesse de marche au moment du franchissement de l'ouverture large en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5").

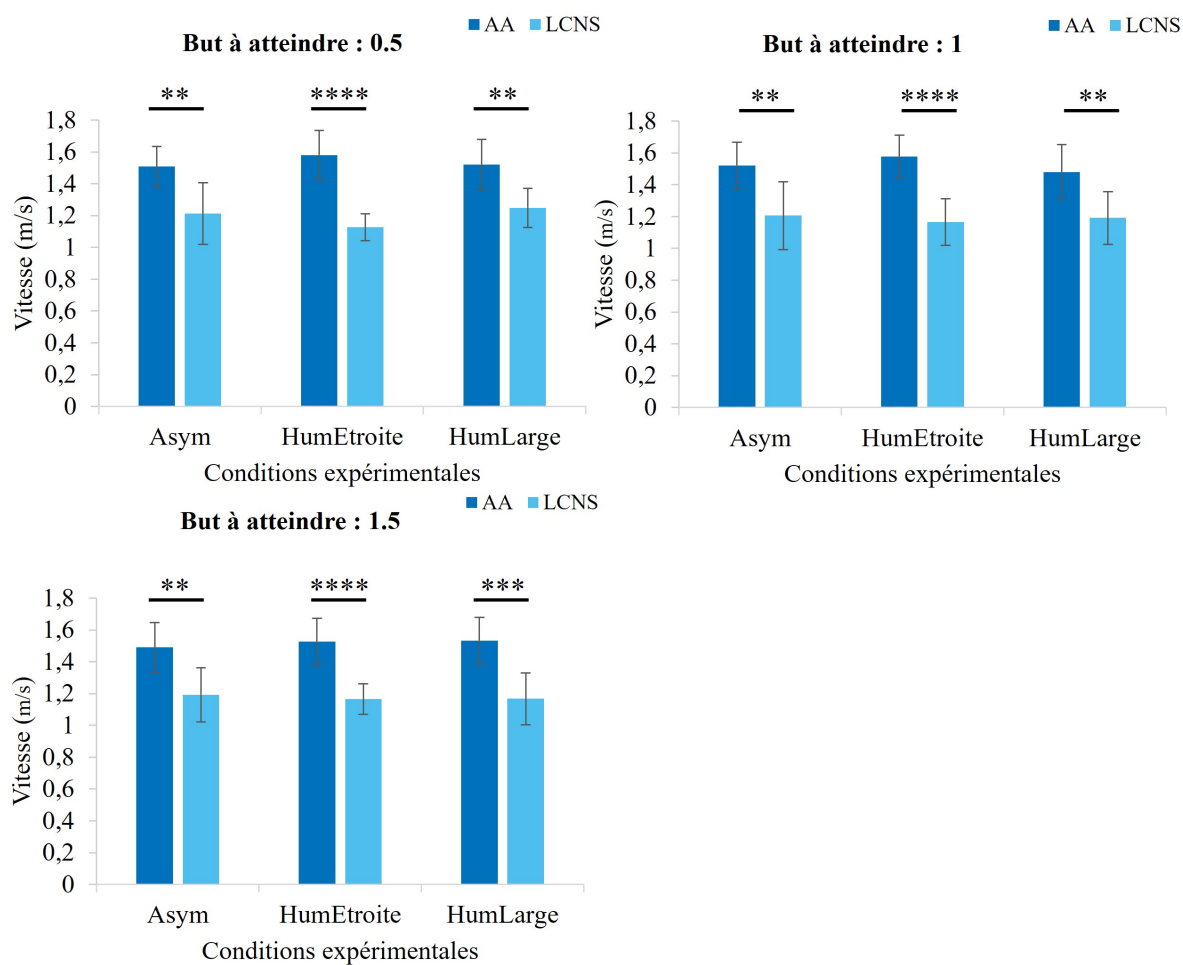


FIGURE 44 – Vitesse de marche au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").

Éléments clés : vitesse de marche

- Les participants LCNS marchent significativement plus lentement que les participants AA quels que soient la position latérale du but à atteindre et le contexte situationnel et/ou social.
- Ni la position latérale du but à atteindre, ni le contexte situationnel et/ou social n'influencent la vitesse de marche pour les deux groupes de participants.

3.3.2 Zone de dégagement

La zone de dégagement sera présentée en valeur absolue (valeur réelle entre l'épaule et l'origine du repère) et en valeur relative (ratio entre la valeur absolue de la zone de dégagement et la largeur de l'ouverture (Z/O)).

3.3.2.1 Condition *Sym*

3.3.2.1.1 Zone de dégagement en valeur absolue

Un effet significatif du but à atteindre [$F(81,62, 3,4) = 23,34, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,260$] a été identifié (figure 45.a.). Aucun effet du groupe ($p < 0,05$) ni d'interaction entre le groupe et le but à atteindre ($p < 0,05$) n'ont été identifiés. Les participants utilisent une zone de dégagement plus large pour les buts à atteindre placés aux extrémités de la zone expérimentale et la diminuent au fur et à mesure que les buts à atteindre se rapprochent du poteau central ("0"). De plus, il n'existe pas de différence selon la latéralité des buts à atteindre, c'est-à-dire que les participants utilisent la même zone de dégagement pour les buts à atteindre placés symétriquement.

3.3.2.1.2 Zone de dégagement en valeur relative

Un effet significatif du but à atteindre [$F(80,99, 3,37) = 24,60, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,248$] a été identifié (figure 45.b.). Aucun effet du groupe ($p < 0,05$) ni d'interaction entre le groupe et le but à atteindre ($p < 0,05$) n'ont été identifiés. Les participants franchissent l'ouverture plus latéralement au fur et à mesure que le but à atteindre est positionné aux extrémités de la zone expérimentale. Comme pour la zone de dégagement en valeur absolue, il n'existe pas de différence selon la latéralité des buts à atteindre, c'est-à-dire que les participants franchissent l'obstacle au même niveau de l'ouverture pour les buts à atteindre placés symétriquement.

3.3.2.2 Condition *Asym*

3.3.2.2.1 Zone de dégagement en valeur absolue

Un effet d'interaction entre le groupe et le but à atteindre [$F(32,92, 2,35) = 3,75, p = 0,02, \eta_p^2 = 0,01$] ainsi qu'un effet du but à atteindre [$F(32,92, 2,35) = 17,80, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,03$] ont été identifiés (figure 45.c.). Aucun effet du groupe ($p > 0,05$) n'a été identifié. La comparaison par paire pour les buts à atteindre était significative entre les buts à atteindre "-2,7", "-1,8", "-0,9" comparativement avec les buts à atteindre "0", "0,5", "1" et "1,5". Les participants utilisent une zone de dégagement de plus en plus importante au fur et à mesure que les buts à atteindre sont placés vers les extrémités de la zone expérimentale (" $-2,8 > -1,8 > -0,9 > 0$ ") lorsque les participants sont passés par l'ouverture large. Aucune différence n'a été identifiée entre les buts à atteindre les plus centrés lorsque les

participants franchissaient l'ouverture large en comparaison avec les buts à atteindre les plus latéraux positionnés du côté de l'ouverture étroite en franchissant l'ouverture étroite.

3.3.2.2.2 Zone de dégagement en valeur relative

Un effet d'interaction entre le groupe et le but à atteindre [$F(24,89, 1,78) = 4,28, p = 0,02, \eta_p^2 = 0,14$] ainsi qu'un effet significatif du but à atteindre [$F(24,89, 1,78) = 42,051, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,62$] ont été identifiés (figure 45.d.). Aucun effet du groupe ($p > 0,05$) n'a été identifié. La comparaison par paire était significative entre les buts à atteindre "-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5" où les participants sont passés par l'ouverture large, comparativement avec les buts à atteindre "1" et "1,5" où les participants sont passés par l'ouverture étroite. Ainsi, les participants franchissent l'ouverture plus latéralement lors des passages par l'ouverture étroite en comparaison avec l'ouverture large. De plus, les participants franchissent l'ouverture large plus latéralement au fur et à mesure que le but à atteindre est positionné aux extrémités de la zone expérimentale (" $-2,8 > -1,8 > -0,9 > 0$ ").

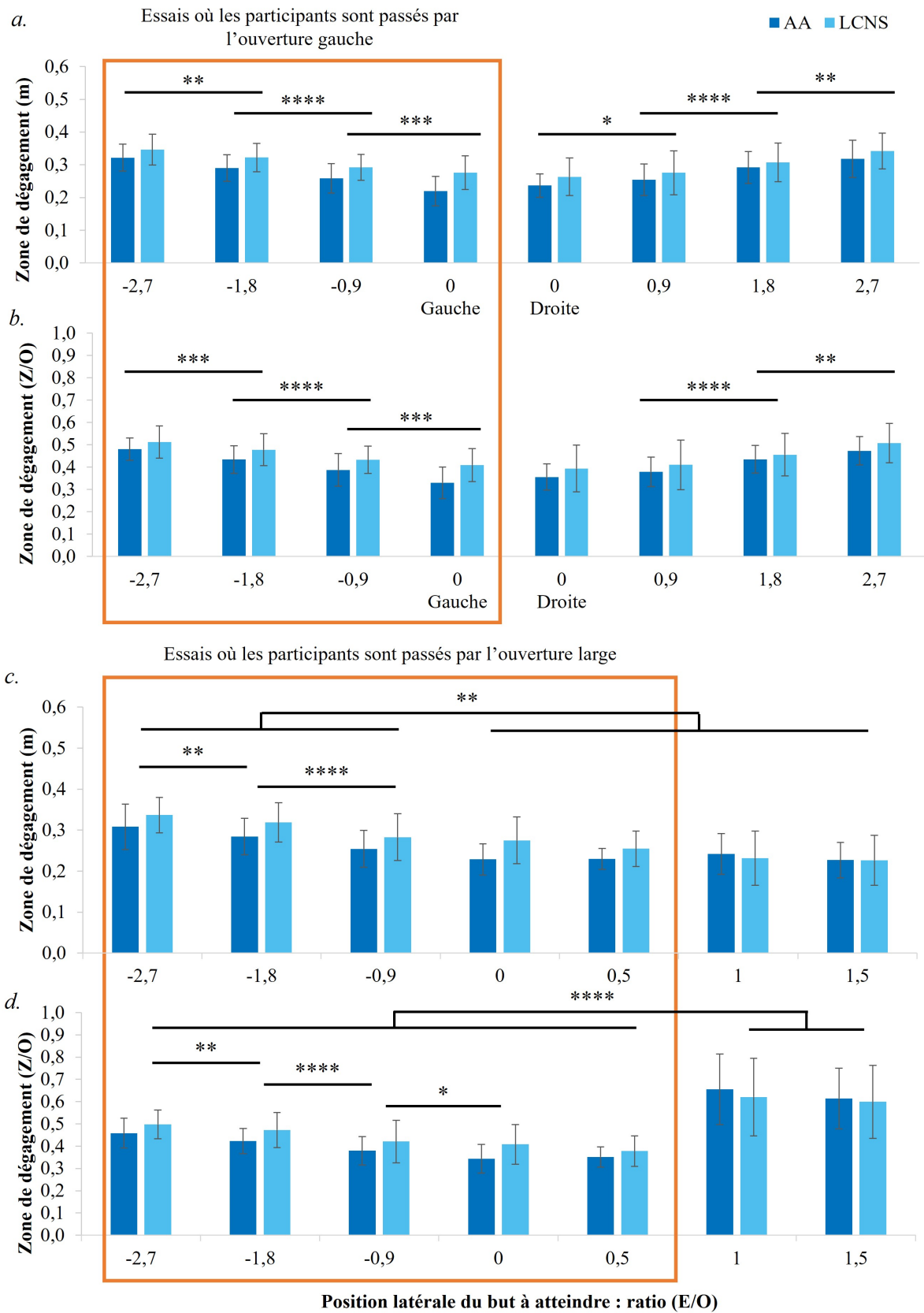


FIGURE 45 – Zone de dégagement en valeur absolue et en valeur relative au moment du franchissement en fonction du but à atteindre pour la condition *Sym* (respectivement a. et b.) et pour la condition *Asym* (respectivement c. et d.).

3.3.2.3 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture large

3.3.2.3.1 Zone de dégagement en valeur absolue

Un effet principal de la condition a été identifié pour les buts à atteindre (figure 46) : "-2,7" [F(54, 2) = 68,13, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,33$], "-1,8" [F(36,77, 1,36) = 45,41, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,35$], "-0,9" [F(41,62, 1,54) = 145,29, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,44$] et "0" [F(54, 2) = 178,06, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,48$]. Ainsi, les participants utilisaient une zone de dégagement plus importante entre la condition *Asym* et les conditions *HumEtroite* et *HumLarge* pour les buts à atteindre ($p < 0,0001$) : "-2,7", "-1,8", "-0,9" et "0". Un effet principal du groupe a été identifié pour les buts à atteindre "-1,8" [F(36,77, 1,36) = 3,66, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,042$], "-0,9" [F(27, 1) = 4,59, $p = 0,04$, $\eta_p^2 = 0,13$] et "0" [F(27, 1) = 7,55, $p = 0,01$, $\eta_p^2 = 0,19$]. Une différence significative entre les participants AA et LCNS a été identifiée, pour le but à atteindre "-1,8" pour les conditions *HumEtroite* et *HumLarge* ($p < 0,05$), pour le but à atteindre "-0,9" pour la condition *HumLarge*, et pour le but à atteindre "0" pour les trois conditions. Ainsi, les participants LCNS présentaient une zone de dégagement significativement plus large pour l'ensemble de ces conditions. Pour finir, pour le but à atteindre "0,5", un effet d'interaction entre le groupe et la condition a été identifié [F(42, 2) = 3,77, $p = 0,03$, $\eta_p^2 = 0,04$]. L'analyse par paire a révélé une différence significative entre la condition *Asym* et les conditions *HumEtroite* et *HumLarge* pour les deux groupes de participants ($p < 0,001$) et une différence significative entre les groupes pour la condition *HumEtroite* et *HumLarge* ($p < 0,05$). Les participants LCNS présentent une zone de dégagement significativement plus large que le groupe AA (respectivement $p < 0,05$ et $p < 0,01$).

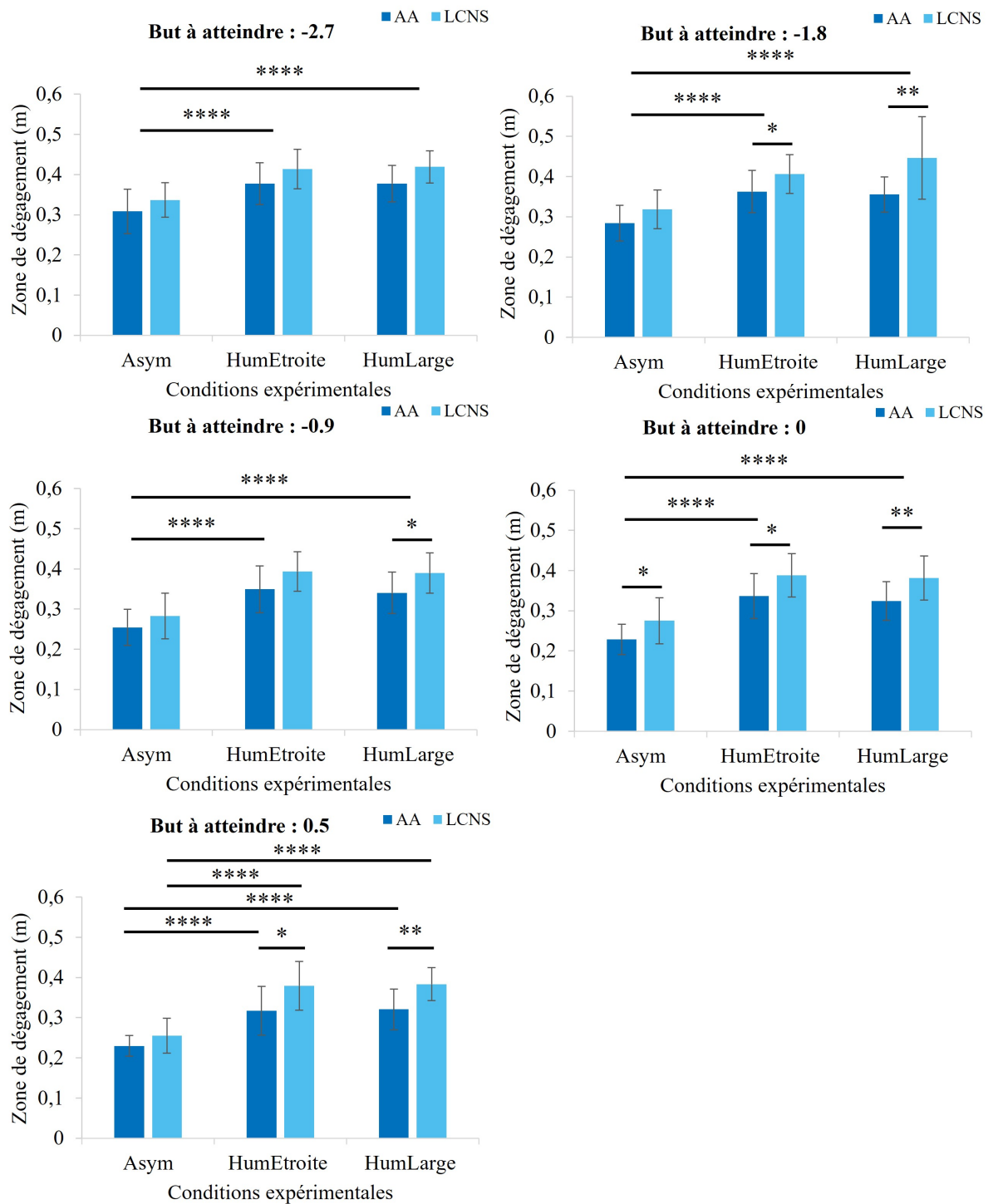


FIGURE 46 – Zone de dégagement en valeur absolue au moment du franchissement de l'ouverture large en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5").

3.3.2.3.2 Zone de dégagement en valeur relative

Un effet principal de la condition a été identifié pour l'ensemble des buts à atteindre (figure 47) : "-2,7" [F(54, 2) = 3,89, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,34$], "-1,8" [F(39,64, 1,47) = 50,6, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,36$], "-0,9" [F(41,72, 1,55) = 149,04, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,42$], "0" [F(54, 2) = 188,02, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,43$] et "0,5" [F(34, 2) = 143,5, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,54$]. Ainsi, les participants franchissaient l'ouverture plus latéralement pour les deux conditions *HumEtroite* et *HumLarge* en comparaison avec la condition *Asym* ($p < 0,0001$). De plus, un effet principal du groupe a été identifié pour les buts à atteindre "-1,8" [F(27, 1) = 8,15, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,17$], "0" [F(27, 1) = 5,42, $p = 0,02$, $\eta_p^2 = 0,15$] et "0,5" [F(17, 1) = 6,57, $p = 0,02$, $\eta_p^2 = 0,25$]. L'analyse post-hoc a révélé une différence significative entre les participants AA et LCNS pour le but à atteindre "-1,8" pour la condition *HumLarge* ($p < 0,01$), pour le but à atteindre "0" pour la condition *Asym* ($p < 0,05$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,05$), et pour le but à atteindre "0,5" pour la condition *HumEtroite* ($p < 0,05$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,01$). Pour chacun de ces buts à atteindre et chacune de ces conditions les participants LCNS franchissaient l'ouverture plus latéralement que les participants AA.

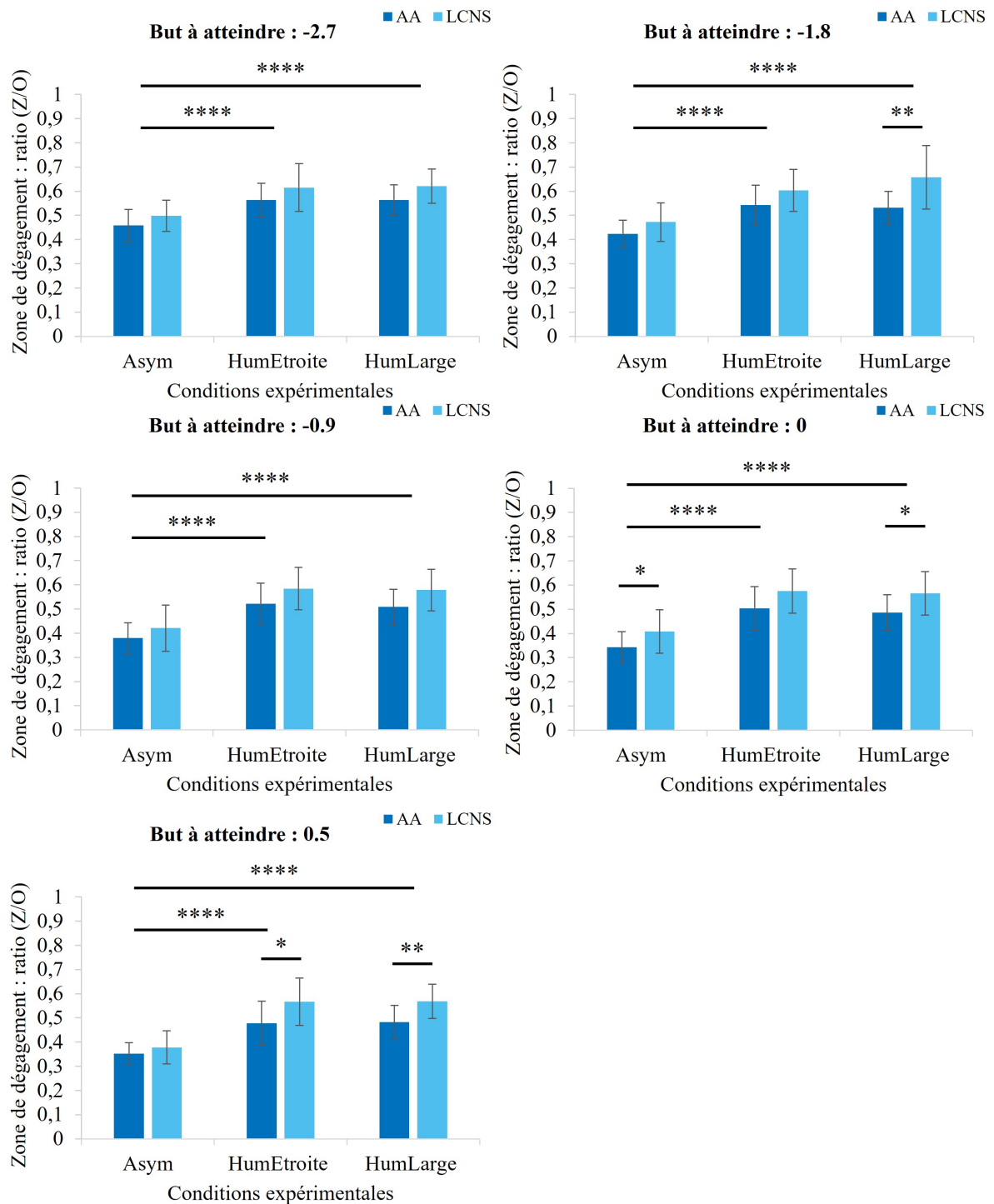


FIGURE 47 – Zone de dégagement en valeur relative au moment du franchissement de l'ouverture large en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5").

3.3.2.4 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture étroite

3.3.2.4.1 Zone de dégagement en valeur absolue

Un effet principal de la condition a été identifié pour l'ensemble des buts à atteindre (figure 48) : "0,5" [$F(12, 2) = 16,04, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,45$], "1" [$F(13,51, 1,23) = 19,84, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,36$] et "1,5" [$F(24, 2) = 23,65, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,3$]. Ainsi, pour le but à atteindre "0,5" la zone de dégagement était significativement plus petite pour la condition *Asym* en comparaison avec la condition *HumEtroite* ($p < 0,001$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,05$). Pour le but à atteindre "1" la zone de dégagement était significativement plus grande pour la condition *HumEtroite* en comparaison avec la condition *Asym* ($p < 0,0001$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,0001$). Pour le but à atteindre "1,5" la zone de dégagement était significativement plus petite pour la condition *Asym* en comparaison avec la condition *HumEtroite* ($p < 0,0001$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,05$). Aucun effet d'interaction entre le groupe et la condition ni d'effet principal du groupe n'ont été identifiés.

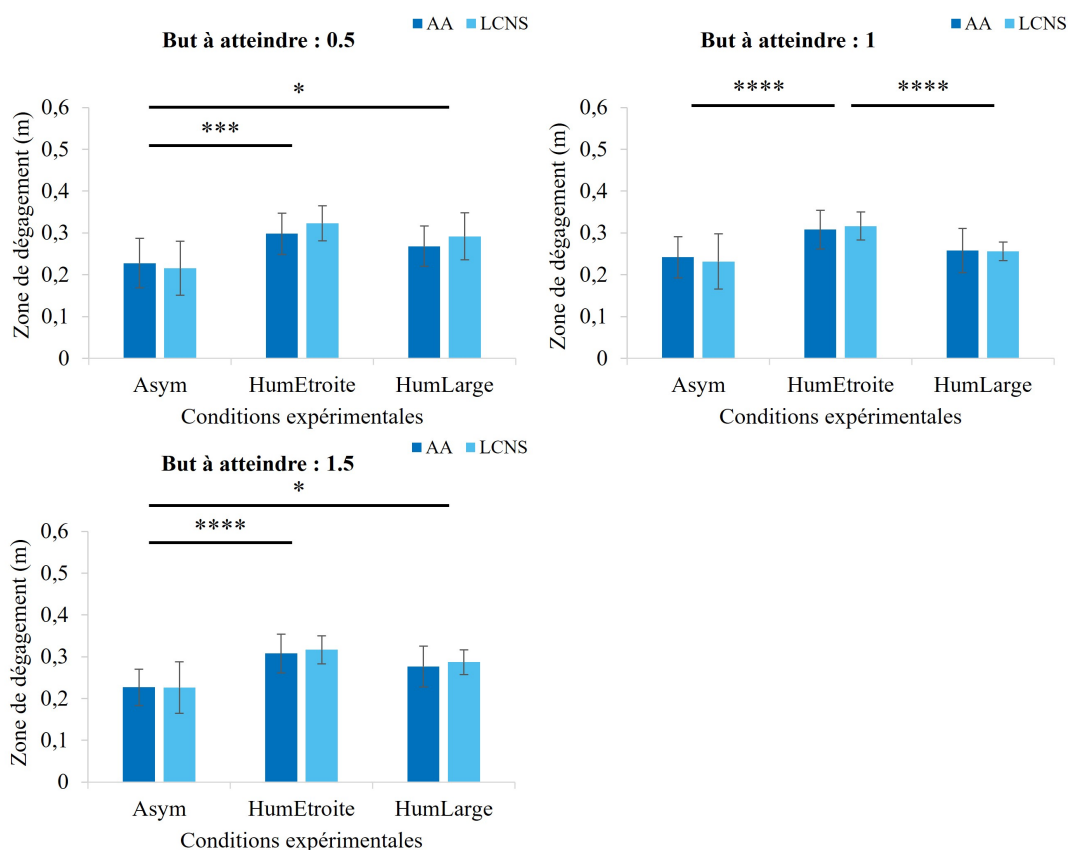


FIGURE 48 – Zone de dégagement en valeur absolue au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").

3.3.2.4.2 Zone de dégagement en valeur relative

Un effet principal de la condition a été identifié pour l'ensemble des buts à atteindre (figure 49) : "0,5" [$F(12, 2) = 15,95, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,43$], "1" [$F(13,47, 1,22) = 20,13, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,35$] et "1,5" [$F(20,36, 1,45) = 18,76, p < 0,0001, \eta_p^2 = 0,28$]. Ainsi, pour les buts à atteindre "0,5" et "1,5" les participants franchissent l'ouverture plus latéralement pour les conditions *HumEtroite* ($p < 0,001$) et *HumLarge* ($p < 0,05$) en comparaison avec la condition *Asym*. Pour le but à atteindre "1" les participants franchissent l'ouverture plus latéralement pour la condition *HumEtroite* en comparaison avec les conditions *Asym* et *HumLarge* ($p < 0,0001$). Aucun effet d'interaction entre le groupe et la condition ni d'effet principal du groupe n'ont été identifiés.

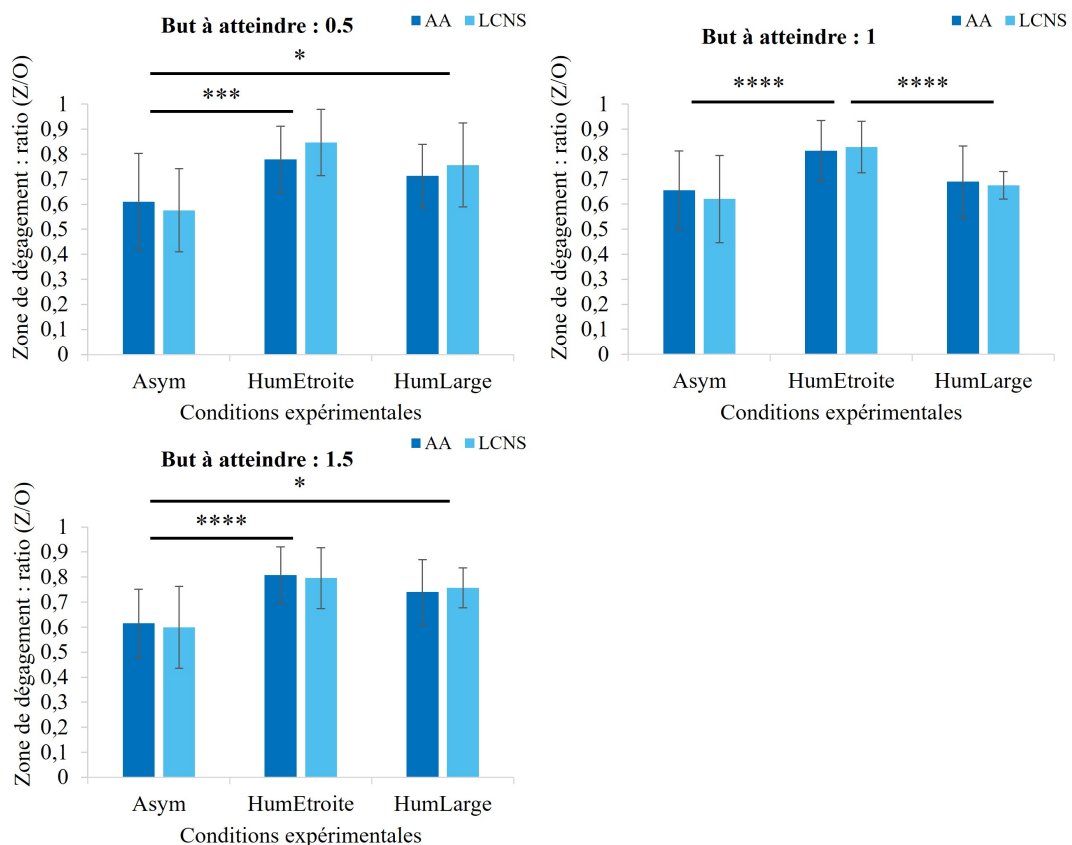


FIGURE 49 – Zone de dégagement en valeur relative au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").

Éléments clefs : zone de dégagement

- **Les participants LCNS :**
 1. ne présentent pas de zone de dégagement plus importante que les participants AA pendant les conditions ne faisant intervenir que les facteurs situationnels (*Sym* et *Asym*), ni au franchissement des ouvertures larges, ni au franchissement des ouvertures étroites ;
 2. présentent une zone de dégagement plus importante que les participants AA pendant les conditions faisant intervenir les facteurs sociaux (*HumEtroite* et *HumLarge*) au franchissement des ouvertures larges.
- **L'ensemble des participants utilisent une zone de dégagement plus importante :**
 1. pour les buts à atteindre placés aux extrémités de la zone expérimentale lors du franchissement de l'ouverture large, qui diminue au fur et à mesure que le but à atteindre est placé derrière le poteau central ;
 2. pour les buts à atteindre placés aux extrémités de la zone expérimentale derrière l'ouverture large lors du franchissement de l'ouverture large en comparaison avec les buts à atteindre placés derrière l'ouverture étroite lors du franchissement de l'ouverture étroite ;
 3. pour les conditions faisant intervenir des facteurs sociaux (*HumEtroite* et *HumLarge*) en comparaison avec la condition ne faisant intervenir que des facteurs situationnels (*Asym*) lors du franchissement des ouvertures larges et étroites.

3.3.3 Angle de rotation des épaules

3.3.3.1 Condition *Asym*

Aucun effet principal du groupe, du but à atteindre et d'interaction entre le groupe et le but à atteindre n'ont été identifiés ($p > 0,05$) (figure 50.a.). Les deux groupes de participants ont un angle de rotation des épaules similaires quel que soit le but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5") au moment du franchissement de l'ouverture étroite.

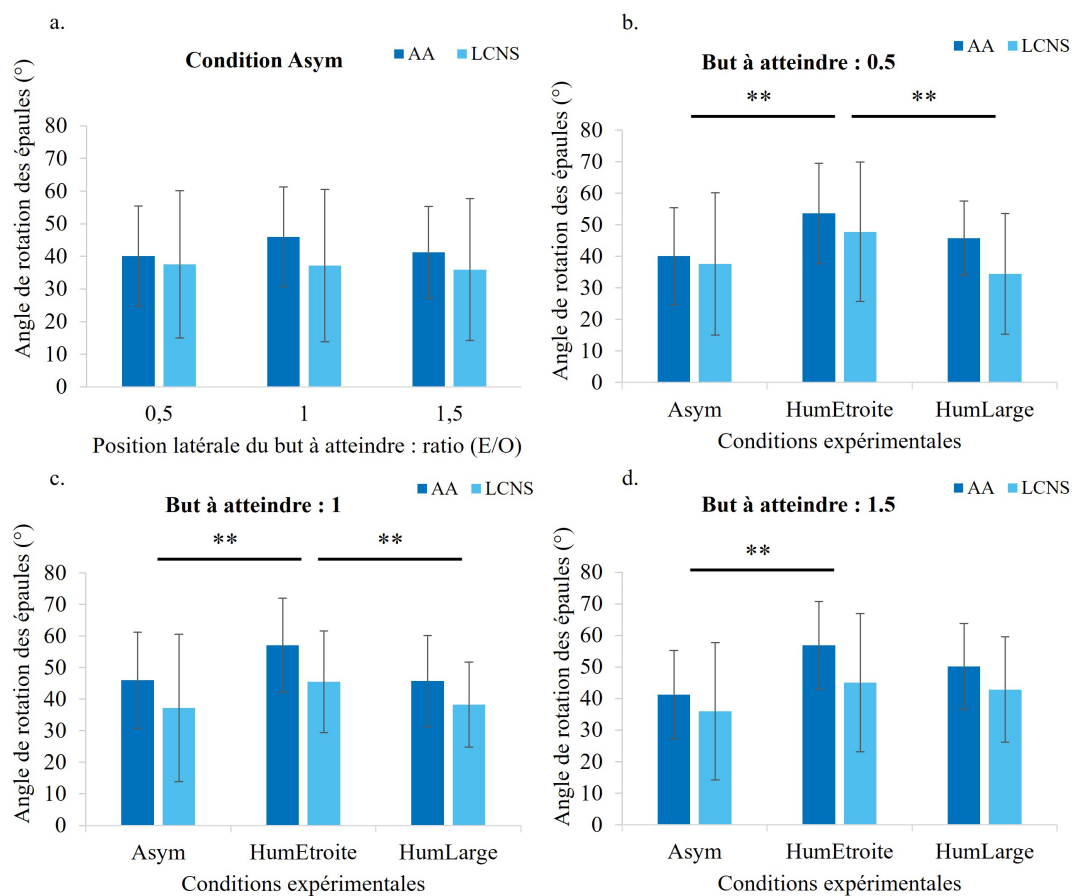


FIGURE 50 – Angle de rotation des épaules au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").

3.3.3.2 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture étroite

Un effet principal de la condition a été identifié pour l'ensemble des buts à atteindre (figure 50.b., c. et d.) : "0,5" [$F(12, 2) = 8,74$, $p = 0,005$, $\eta_p^2 = 0,22$], "1" [$F(22, 2) = 9,57$, $p = 0,001$, $\eta_p^2 = 0,13$] et "1,5" [$F(28, 2) = 8,67$, $p = 0,001$, $\eta_p^2 = 0,11$]. Ainsi, pour le but

à atteindre "0,5", l'angle de rotation des épaules était significativement plus important pour la condition *HumEtroite* en comparaison avec la condition *Asym* ($p < 0,01$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,01$). Pour le but à atteindre "1", l'angle de rotation des épaules était significativement plus grand pour la condition *HumEtroite* en comparaison avec la condition *Asym* ($p < 0,01$) et la condition *HumLarge* ($p < 0,01$). Pour le but à atteindre "1,5", l'angle de rotation des épaules était significativement plus grand pour la condition *HumEtroite* en comparaison avec la condition *Asym* ($p < 0,01$). Aucun effet du groupe ni d'interaction entre le groupe et la condition n'ont été identifiés.

Éléments clefs : angle de rotation des épaules

- Les participants LCNS ne présentent pas d'amplitude de rotation des épaules plus importante que les participants AA quelles que soient les conditions expérimentales.
- La rotation des épaules est influencée par l'orientation de l'expérimentateur et est plus importante lorsque l'expérimentateur regarde vers l'ouverture étroite et que les participants franchissent également l'ouverture étroite.

3.3.4 Déphasage entre les angles scapulaire et pelvien

3.3.4.1 Condition *Asym*

Aucun effet principal du groupe, du but à atteindre et d'interaction entre le groupe et le but à atteindre n'ont été identifiés ($p > 0,05$) (figure 51.a.). Les deux groupes de participants ont un angle de déphasage similaire quel que soit le but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5") au moment du franchissement de l'ouverture étroite.

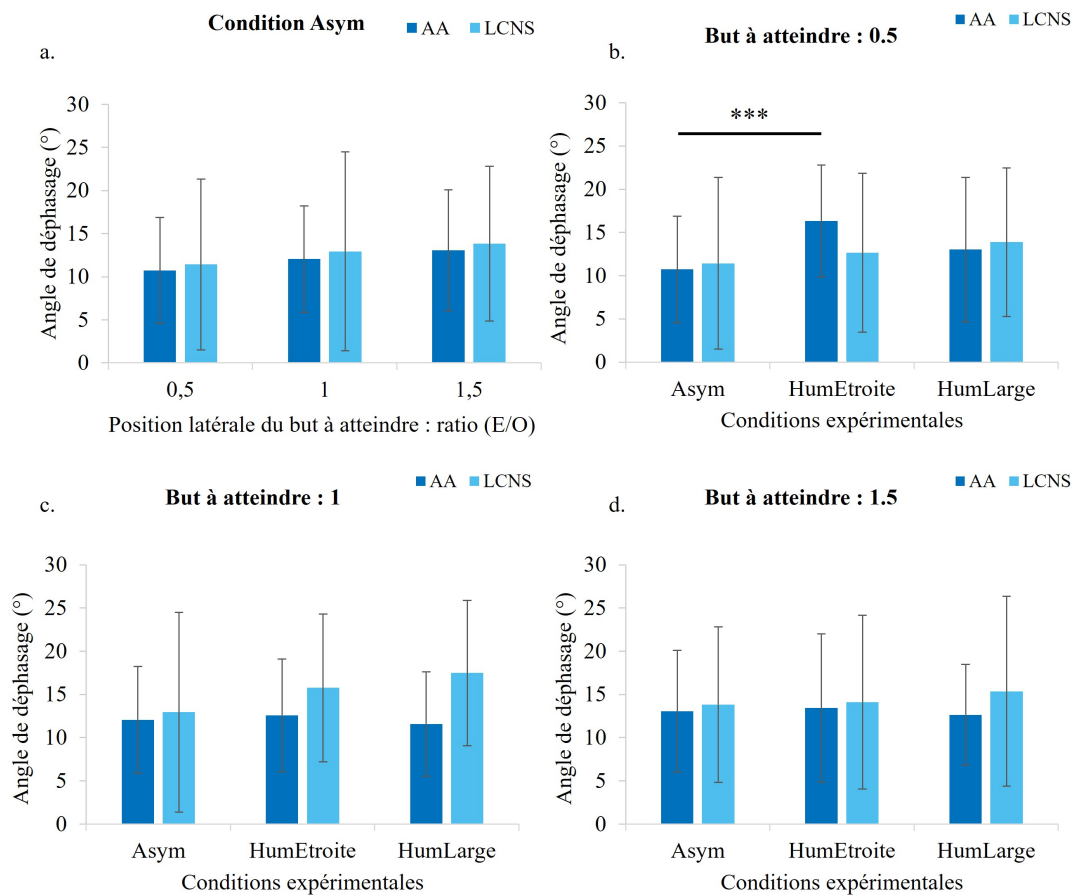


FIGURE 51 – Déphasage au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (*Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge*) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").

3.3.4.2 Comparaison entre les conditions *Asym*, *HumEtroite* et *HumLarge* lorsque les participants ont franchi l'ouverture étroite

Un effet principal de la condition [$F(12, 2) = 7,88$, $p = 0,007$, $\eta_p^2 = 0,05$] et d'interaction entre le groupe et la condition [$F(12, 2) = 10,65$, $p = 0,002$, $\eta_p^2 = 0,06$] ont été identifiés pour le but à atteindre "0,5" (figure 51.b., c. et d.). Ainsi, les participants AA présentent un angle de déphasage plus petit dans la condition *Asym* en comparaison avec la condition

HumEtroite ($p < 0,001$). Aucune autre différence significative n'a été révélée lors de cette analyse.

Éléments clés : déphasage

- Les participants LCNS ne présentent pas de différence concernant l'angle de déphasage entre la ceinture scapulaire et pelvienne avec les participants AA au moment du franchissement de l'ouverture étroite.
- L'angle de déphasage ne semble pas être influencé par l'orientation de l'expérimentateur.

3.4 Variables liées à la perception douloureuse

Les scores aux échelles et aux questionnaires du RMDQ, du FABQ, du PCS, du PIPS, du TSK et de l'EVA sont présentés dans le tableau 4. Pour chaque condition et chaque but à atteindre, aucune corrélation n'a été trouvée entre les variables liées à la perception douloureuse et le pourcentage de franchissement de l'ouverture large par les participants LCNS. D'après une analyse descriptive présentée dans le tableau 8, les coefficients de variations sont importants pour chacun des scores aux questionnaires obtenus et très élevés pour le RMDQ et l'EVA, témoignant d'une variabilité inter-individuelle très importante concernant les difficultés fonctionnelles et l'intensité de la douleur perçue par les participants LCNS.

	Min	Max	CV
RMDQ	1	16	0,51
FABQ	21	66	0,37
PCS	17	45	0,31
PIPS	47	104	0,21
TSK	30	60	0,22
EVA	0	4,88	0,62

Min : Minimum. Max : Maximum. CV : Coefficient de variation. RMDQ : Roland Morris Disability Questionnaire (rang 0-24). FABQ : Fear Avoidance Belief Questionnaire avec une sous-échelle portant sur l'activité physique (rang 0-24) et une sous-échelle portant sur le travail (rang 0-42). PCS : Pain Catastrophizing Scale (rang 0-52). TSK : Tampa Scale Kinesiophobia (rang 0-68). PIPS : Psychological Inflexibility in Pain Scale avec une sous-échelle portant sur l'évitement (rang 0-70) et une sous-échelle portant sur la fusion cognitive (rang 0-24). VAS : Visual Analog Scale of pain (rang 0-10).

TABLEAU 8 – Paramètres de dispersion des scores aux échelles et questionnaires portant sur la perception douloureuse.

DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude était de déterminer si la LCNS affecte la décision de franchir une ouverture horizontale en fonction de sa largeur, mais également en fonction d'un facteur social matérialisé par la présence d'un expérimentateur placé au milieu de la zone expérimentale et dirigé vers l'une des deux ouvertures à franchir. Ainsi, cette étude a exploré le choix du mode d'action des participants dans une tâche de marche dirigée vers l'un des sept buts positionnés 5 m derrière les deux ouvertures horizontales, à l'aide de trois conditions expérimentales : la première sans modification du contexte situationnel et social, la seconde avec modification du contexte situationnel et la troisième avec modification du contexte situationnel et social. La variable principale était le seuil critique exprimé en fonction de la position latérale du but à atteindre. Cette position du but est alors associée à un changement du choix de l'ouverture à franchir pour chaque groupe et chaque condition.

Lorsque les deux ouvertures sont symétriques, le seuil entre les deux groupes est proche et est de -0,07 pour les participants AA et -0,25 pour les participants LCNS. Ainsi, les deux groupes de participants ont décidé de changer d'ouverture à franchir pour le but positionné derrière le poteau central formant le milieu des deux ouvertures (figure 40.a.). Les participants AA comme les participants LCNS ont décidé de franchir l'ouverture gauche pour les buts à atteindre positionnés à gauche et l'ouverture droite pour les buts à atteindre positionnés à droite. Comme précédemment présenté, cette largeur d'ouverture ne demande pas de changement du comportement moteur concernant la rotation des épaules et la vitesse de marche pour les participants AA et LCNS [Bilhaut *et al.*, 2023]. Ainsi, pour les largeurs d'ouverture de 1,8, la sélection du chemin semble guidée par l'attraction du but à atteindre [Warren et Fajen, 2008].

Lorsque les ouvertures sont asymétriques, le changement de configuration spatiale des largeurs d'ouvertures a induit un décalage du seuil chez les deux groupes de participants par rapport à la condition symétrique. Ces résultats ont également été observés dans une tâche de franchissement d'une ouverture horizontale dans un espace non-confiné, c'est-à-dire où les participants pouvaient contourner l'ouverture [Hackney *et al.*, 2013]. Les résultats ont montré que le choix du mode d'action dépendait de la largeur de l'ouverture : si la largeur était inférieure à 1,4 fois la largeur des épaules, les participants contournaient

l'obstacle alors que pour des largeurs d'ouverture plus grandes, ils la franchissaient [Hackney *et al.*, 2013]. Hackney *et al.* [Hackney *et al.*, 2013], s'appuyant sur les travaux de Fajen et Warren [Fajen et Warren, 2003, Warren et Fajen, 2008], suggèrent que ces stratégies suivent les lois de contrôle pour les comportements de changement de direction, d'évitement d'obstacles et de sélection d'itinéraire. Ainsi, la sélection du chemin serait guidée par l'attraction des buts à atteindre et par la répulsion des obstacles, et les individus choisiraient le chemin le plus approprié tenant compte de ces dynamiques [Fajen et Warren, 2003]. Les obstacles formant des ouvertures horizontales inférieures à 1,4 fois la largeur des épaules créeraient ainsi une répulsion de l'ouverture à franchir qui l'emporterait sur l'attraction du but, obligeant les individus à modifier leur trajectoire [Hackney *et al.*, 2013]. Dans la présente étude, ces résultats suggèrent donc que l'attraction du but est inférieure aux forces de répulsion entre les obstacles formant l'ouverture étroite, contraignant les participants à franchir l'ouverture large pour atteindre les buts positionnés derrière l'ouverture étroite. Cependant, malgré la contrainte de l'environnement, les participants AA et LCNS ont choisi de franchir l'ouverture étroite pour les buts à atteindre positionnés les plus latéralement derrière cette ouverture. Ceci suggère que lorsque le changement de trajectoire pour atteindre le but nécessite un parcours singulièrement plus long, alors les participants choisissent le chemin le plus court.

De plus, dans cette condition, deux différences ont également été observées entre les deux groupes de participants : tout d'abord un décalage du seuil plus important chez les participants LCNS (1,38) que chez les participants AA (0,77), et un pourcentage des essais où l'ouverture large a été franchie plus important chez les participants LCNS pour les deux buts positionnés le plus latéralement derrière l'ouverture étroite (figure 40.b.). Ces résultats suggèrent que, par rapport aux participants AA, les participants LCNS minimisent la rotation des épaules en contournant l'ouverture étroite pour des buts positionnés plus latéralement, reflétant une stratégie plus conservatrice.

Lorsque les ouvertures sont asymétriques avec une modification du contexte social, le seuil est décalé par rapport à la condition asymétrique seule. Ainsi, pour la condition dans laquelle l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture étroite, le seuil se situe après la valeur de la position du dernier but à atteindre (1,7 pour les participants AA et 1,79 pour les participants LCNS). Lorsque l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture large, le seuil se situe juste avant la valeur de la position du dernier but à atteindre (1,47) pour les participants AA et reste derrière la valeur de la position du dernier but à atteindre pour les participants LCNS (1,64). Ces seuils sont proches entre les deux groupes de participants et aucune différence concernant le pourcentage des essais où l'ouverture large a été franchie n'a été observée. Ces résultats suggèrent que la présence d'un expérimentateur sur la trajectoire modifie le choix de l'ouverture à franchir, de sorte que pour plus de la moitié des essais, les participants préfèrent passer par l'ouverture large. Ces résultats sont en

accord avec ceux observés par Hackney et al. dans une tâche de franchissement d'une ouverture horizontale, comparant le choix du mode d'action entre une ouverture formée par des poteaux et une ouverture encadrée par des humains [Hackney *et al.*, 2015a]. Les résultats ont montré que le choix du mode d'action dépendait de l'obstacle à franchir, de telle sorte que les participants tournaient leurs épaules pour des largeurs d'ouvertures plus importantes lorsque l'ouverture était formée par deux humains (de 1,7 fois la largeur de leur épaule) que lorsque les obstacles étaient des poteaux [Hackney *et al.*, 2015a].

Cependant, dans la présente étude, il existe peu de différence entre les seuils observés pour les deux conditions faisant intervenir des facteurs sociaux. Nous nous serions attendus à ce que les participants AA franchissent l'ouverture étroite lorsque l'expérimentateur était dos à celle-ci. En effet, des travaux antérieurs se sont intéressés à la notion de proxémie, qui décrit la manière dont les humains gèrent leur espace personnel au cours de leurs interactions avec leur environnement, pour expliquer le changement de comportement face à un obstacle inerte ou un obstacle humanoïde [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005, Gérin-Lajoie *et al.*, 2008, Sanz *et al.*, 2015]. Cet espace a une forme elliptique avec un axe longitudinal plus long qu'en latéral permettant une zone de sécurité suffisamment grande pour percevoir les dangers à venir et adapter le mouvement [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005]. Dans le cas du franchissement d'une ouverture horizontale formée par deux expérimentateurs et dans quatre conditions (expérimentateurs tournés vers l'ouverture, dos à l'ouverture, face au participant ou dos au participant), Tomono et al. [Tomono *et al.*, 2019] ont montré que les participants tournaient plus leurs épaules pour la condition dans laquelle les expérimentateurs étaient tournés vers l'ouverture en comparaison avec les trois autres conditions et suggèrent que les participants, en plus de prendre en compte leur propre espace personnel, ont observé celui des expérimentateurs qui chevauchent l'ouverture. Ces résultats sont confortés par une seconde étude menée par Makino et al. portant sur une tâche décisionnelle de passage entre deux ouvertures horizontales formées par trois humanoïdes positionnés soit vers l'ouverture, soit dos à l'ouverture [Makino *et al.*, 2023]. Les résultats ont montré que les participants choisissaient de passer par les ouvertures où les humanoïdes étaient dos à l'ouverture [Makino *et al.*, 2023].

L'une des explications de la faible différence entre les seuils pour ces deux conditions porterait sur la largeur de l'ouverture. En effet, les études antérieures ont montré que le choix de la modification du mode d'action se situait pour une largeur d'ouverture de 1,7 fois la largeur des épaules lorsque l'ouverture était formée par des humains [Tomono *et al.*, 2019]. Or, dans notre étude, la largeur de l'ouverture est de 1,8 fois la largeur des épaules. Ainsi, il est possible que cette ouverture soit suffisamment large pour ne pas modifier le choix du mode d'action des participants même si l'expérimentateur est tourné vers elle. Cela implique que la présence de l'expérimentateur, quelle que soit sa direction, soit le facteur d'influence majeur à la modification du choix du mode d'action.

Cependant, alors que les participants AA franchissent significativement moins l'ouverture large pour la condition asymétrique en comparaison avec les conditions asymétriques avec modification du contexte social, les participants LCNS ne présentent pas de différence entre ces conditions au niveau du pourcentage d'essais où l'ouverture large a été franchie. Ces résultats suggèrent que le choix du mode d'action des participants AA est influencé par des facteurs situationnels et sociaux, alors que pour les participants LCNS, le choix du mode d'action serait guidé préférentiellement par les facteurs situationnels.

L'objectif secondaire était double et visait dans un premier temps à examiner les variables cinématiques de la marche caractéristique des participants (vitesse de marche, zone de dégagement, angle de rotation des épaules et déphasage entre les angles scapulaire et pelvien) et dans un second temps à évaluer l'influence des variables de la perception douloureuse sur le choix du franchissement.

Concernant la vitesse de marche, les participants LCNS marchaient moins vite que les participants AA pour l'ensemble des conditions. Ces résultats sont similaires à ceux retrouvés dans la littérature [Koch et Hänsel, 2018]. Pour chacun des groupes la vitesse de marche était similaire entre les buts à atteindre et les ouvertures franchies pour chaque condition. Ces résultats sont différents de ceux de la littérature pour les conditions asymétrique et asymétrique avec modification du contexte social. Les études antérieures ont en effet montré que, dans le cas d'une modification du contexte situationnel dans une tâche de franchissement de différentes largeurs d'ouvertures horizontales allant d'un ratio plus petit que la largeur des épaules à un ratio plus grand, la vitesse de marche diminuait proportionnellement avec la diminution de la largeur de l'ouverture [Wilmot et Barnett, 2011, Wilmot *et al.*, 2015]. En effet, une réduction de la vitesse permet de donner du temps au système visuo-moteur pour traiter l'information et planifier une réponse [Cinelli *et al.*, 2008], de changer de direction [Patla, 1991] et de se protéger en cas de collision [Wilmot et Barnett, 2011].

Dans le cas d'un changement du contexte situationnel et social, Hackney et al. [Hackney *et al.*, 2015a] ont montré que la vitesse de marche était significativement plus faible pendant les essais où les participants passaient entre deux personnes que pendant les essais où ils passaient entre deux poteaux. De plus, la vitesse de marche était proportionnelle à la largeur de l'ouverture : plus la largeur de l'ouverture diminuait, plus la vitesse de marche diminuait [Hackney *et al.*, 2015a]. Ainsi, notre hypothèse était que les participants AA et LCNS marchent moins vite lorsqu'ils franchissent l'ouverture étroite en comparaison avec l'ouverture large et que cette différence soit d'autant plus importante lorsqu'un expérimentateur est placé au centre des deux ouvertures. Un élément de réponse est que la zone expérimentale étant courte (5 m), les participants n'ont peut-être pas atteint une vitesse de marche suffisante les contraignant à modifier leur vitesse au moment du

franchissement. Ces résultats ont également été observés dans une étude s'intéressant à l'influence de deux humains (face à face, dos à dos) formant une largeur d'ouverture : ni la largeur de l'ouverture, ni la position des humains ne modifiaient la vitesse de marche au moment du franchissement [Tomono *et al.*, 2019]. Dans cette étude, la longueur du chemin parcouru par les participants était de 4 m, alors qu'elle était de 7 m dans l'étude de Hackney *et al.* [Hackney *et al.*, 2015a]. Il existe à notre connaissance très peu d'études portant sur l'effet des facteurs sociaux dans le cas du franchissement d'une ouverture. D'autres études sont à envisager pour ajuster les paramètres de l'environnement afin de mieux comprendre comment la conception de l'expérience peut influencer les résultats. En conclusion, dans notre étude, ces résultats suggèrent que les participants AA et LCNS n'ont pas eu besoin de modifier leur vitesse de marche en fonction de l'ouverture franchie et du but à atteindre pour l'ensemble des conditions expérimentales.

Pour la zone de dégagement, deux mesures ont été réalisées : la zone de dégagement en valeur absolue, permettant de donner des informations sur la distance sociale que les participants souhaitaient mettre avec l'obstacle central formant le milieu des ouvertures, et la zone de dégagement en valeur relative, permettant de donner des informations sur la position du participant dans l'ouverture au moment du franchissement. Lorsque les participants sont passés par l'ouverture large, pour les conditions symétrique et asymétrique, la zone de dégagement en valeur absolue était plus importante pour les buts à atteindre positionnés aux extrémités de la zone expérimentale et diminuait au fur et à mesure que le but à atteindre était positionné vers le centre de la zone expérimentale. De la même manière, concernant la zone de dégagement en valeur relative, les participants franchissaient l'ouverture plus latéralement au fur et à mesure que le but à atteindre était positionné aux extrémités de la zone expérimentale. Ces résultats suggèrent que les participants adaptent leur trajectoire en fonction du but à atteindre. Pour la condition asymétrique, les participants présentaient une zone de dégagement plus petite pour les essais dans lesquels l'ouverture étroite était franchie en comparaison avec l'ouverture large. Ces résultats sont conformes à ceux retrouvés dans la littérature montrant que plus la largeur d'une ouverture diminue, plus la zone de dégagement en valeur absolue diminue [Hackney *et al.*, 2015a]. Cependant, lorsque l'on observe leur position dans l'ouverture, c'est-à-dire la zone de dégagement en valeur relative, les participants franchissent l'ouverture étroite plus latéralement que l'ouverture large. Ces résultats suggèrent que, bien qu'une ouverture étroite le contraigne à diminuer sa zone de dégagement, le participant prend une marge de sécurité plus importante en se déplaçant plus latéralement, dans la limite de la contrainte de l'environnement. Aucune différence entre les groupes n'a été trouvée pour la zone de dégagement lors du franchissement d'une ouverture étroite, ni en valeur absolue ni en valeur relative. Les participants LCNS semblent donc utiliser les mêmes stratégies que les participants AA lors du franchissement d'une ouverture avec et sans contraintes

de l'environnement.

Concernant la comparaison entre les conditions asymétrique seule et asymétrique avec modifications du contexte social lors du franchissement de l'ouverture large, les participants AA et LCNS ont utilisé une zone de dégagement plus importante pour les essais dans lesquels l'expérimentateur était placé au centre des deux ouvertures que lors des essais où les ouvertures étaient formées par des poteaux. Ces mêmes résultats ont été retrouvés dans l'étude de Hackney et al. [Hackney *et al.*, 2015a] montrant que pour chaque largeur d'ouverture franchie (1 à 1,4 fois la largeur des épaules) les participants utilisaient une zone de dégagement plus importante quand ils passaient entre deux humains que quand ils passaient entre deux poteaux. Les participants LCNS ont par ailleurs présenté une zone de dégagement plus importante que les participants AA pour les essais où l'expérimentateur était tourné vers l'ouverture large. Concernant la zone de dégagement en valeur relative, les participants sont passés plus latéralement pour les essais où l'expérimentateur était positionné au centre des deux ouvertures que lors des essais où les ouvertures étaient formées par des poteaux. Cependant, il n'y avait pas de différence entre les conditions où l'expérimentateur était tourné vers ou dos à l'ouverture franchie.

Pour les essais où les participants ont franchi l'ouverture étroite, comme pour l'ouverture large, les participants présentent une zone de dégagement plus importante pour les essais où l'expérimentateur est placé au centre des deux ouvertures pour les buts à atteindre "0,5" et "1,5". Pour le but à atteindre "1", les participants présentent une zone de dégagement plus importante pour la condition où l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture étroite comparativement aux deux autres conditions. La zone de dégagement en valeur relative va dans le sens de ces résultats. Les participants étaient positionnés plus latéralement au moment du franchissement de l'ouverture quand l'expérimentateur était placé au centre des deux ouvertures que dans la condition sans expérimentateur, sauf pour le but à atteindre "1". Ce résultat est difficilement interprétable. En effet, nous nous serions attendus, comme pour les deux autres buts à atteindre, à ce que les participants utilisent une zone de dégagement plus importante pour les essais où l'expérimentateur est positionné au centre de l'ouverture. Aucune différence entre les groupes n'a été identifiée. En conclusion, ces résultats suggèrent que pour les deux largeurs d'ouverture, les participants adaptent la zone de dégagement en fonction des facteurs situationnels et sociaux, mais la direction de l'expérimentateur ne semble pas influencer leurs stratégies.

Concernant l'angle de rotation des épaules, pour les essais où les participants ont franchi l'ouverture étroite, l'ensemble des participants présentent un angle de rotation des épaules plus important pour la condition asymétrique où l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture étroite que pour les deux autres conditions (asymétrique seule et asymétrique où l'expérimentateur est tourné vers l'ouverture large). Ces résultats vont dans le sens des études antérieures montrant un angle de rotation des épaules plus important

pour une ouverture formée par deux humains dirigés vers l'ouverture en comparaison avec deux humains dos à l'ouverture [Tomono *et al.*, 2019]. Cependant, aucune différence entre les groupes n'a été identifiée entre les conditions asymétrique seule et asymétrique avec modification du contexte social. Ces résultats vont dans la même direction que notre précédente étude s'intéressant à l'influence de la LCNS sur les stratégies perceptivo-motrices dans une tâche de franchissement d'une ouverture horizontale où les participants LCNS présentaient des angles de rotation des épaules similaires aux participants AA pour l'ensemble des ouvertures franchies [Bilhaut *et al.*, 2023].

Pour finir, aucune influence des variables de la perception douloureuse (intensité de la douleur, croyances de peur et d'évitement, kinésiophobie, anxiété, dépression, fausses croyances et qualité de vie) n'a été observée sur le choix du franchissement de l'ouverture étroite ou large. Contrairement à notre étude précédente, les scores aux questionnaires portant sur les variables psychologiques accompagnant la douleur sont plus élevés et une forte hétérogénéité entre les scores des participants a été observée. Deux éléments sont à prendre en compte pour expliquer ces résultats. Le premier se concentre sur l'utilisation de tels questionnaires pour mesurer par exemple l'influence de la peur liée au mouvement, comme le TSK et le FABQ, qui, d'après certains auteurs, seraient trop génériques pour mesurer la peur du mouvement liée à la douleur dans des tâches spécifiques [Van Wesemael *et al.*, 2023]. Ces auteurs suggèrent ainsi d'utiliser d'autres questionnaires se rapportant directement aux difficultés que pourraient présenter les participants dans la tâche demandée [Van Wesemael *et al.*, 2023]. D'autres études pourraient donc être menées sur la création de questionnaires spécifiques pour mesurer la peur du mouvement dans le cadre d'une étude sur l'interaction entre l'individu et son environnement. Le deuxième élément se rapporte au nombre de participants inclus dans l'étude. En effet, les résultats présentés dans cette étude sont les résultats préliminaires d'une étude en cours. Sur la base des études antérieures, nous avons fixé le nombre de participants à 40, i.e. 20 participants dans le groupe contrôle et 20 participants dans le groupe AA. Bien que nous ayons contrôlé les tests d'hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances, certaines analyses statistiques sont effectuées sur des effectifs petits. De plus, l'influence d'autres facteurs n'a pas encore été prise en compte tels que le sexe des participants et le sens de rotation des épaules au moment du franchissement. Cela pourrait nous permettre de décrire plus finement les stratégies adoptées par les participants, comme décrit par Tomono *et al.* [Tomono *et al.*, 2019] : ont-ils préféré passer dos à l'expérimentateur ou face à lui et existe-t-il une différence entre les essais où l'ouverture large a été franchie et les essais où l'ouverture étroite a été franchie ?

En conclusion, les participants LCNS semblent utiliser une stratégie décisionnelle plus orientée vers les contraintes situationnelles que sociales, contrairement aux participants

AA qui sont influencés par le contexte situationnel et social pour franchir une ouverture. Cependant, les facteurs sociaux semblent également influencer les stratégies des participants LCNS, qui sont plus prudentes que celles adoptées par les participants AA lorsque le contexte situationnel le permet, matérialisées par une augmentation de la zone de dégagement pour des ouvertures larges. Les deux premières études proposées dans cette thèse nous ont permis d'investiguer l'effet de la lombalgie chronique sur les stratégies décisionnelles et les comportements moteurs, en lien avec des facteurs situationnels et sociaux dans un environnement fixe. La troisième étude de la thèse vise à considérer des situations plus complexes dans un environnement dynamique et social. Nous proposons alors d'utiliser un paradigme de croisement entre deux marcheurs.

QUATRIÈME PARTIE

**Paradigme de locomotion en
interaction avec un environnement
dynamique : tâche de croisement
entre deux marcheurs (PERL3)**

APPROCHES ET OBJECTIFS

L'un des paradigmes utilisés pour évaluer une tâche de locomotion dans un environnement dynamique est celui de l'interaction entre deux marcheurs [Olivier *et al.*, 2012, Olivier *et al.*, 2013]. Nous avons pu mettre en avant dans la revue de littérature qu'il existe un état de l'art riche sur le thème des interactions entre marcheurs, montrant notamment une cohérence forte dans les comportements locomoteurs dans le cadre d'un évitement de collision [Olivier *et al.*, 2013, Pfaff et Cinelli, 2018, Bourgaize *et al.*, 2021, Fiset *et al.*, 2020, Silva *et al.*, 2018]. Ces études ont mis en avant l'importance du couplage entre la perception et l'action dans la capacité des individus jeunes et asymptomatiques à produire un mouvement adapté à leur environnement. Cependant, les études portant sur d'autres populations ont notamment montré un seuil d'adaptation, i.e. la distance future de croisement pour laquelle une manoeuvre d'évitement de collision est mise en place, plus élevé dans des interactions entre deux personnes âgées ou lorsqu'une personne âgée passait première dans l'interaction [Rapos *et al.*, 2021], plus petit dans des interactions entre deux athlètes ayant subi une commotion cérébrale [Snyder *et al.*, 2022] et dans les interactions faisant intervenir deux enfants ou un enfant et un adulte [Rapos *et al.*, 2019]. Ces résultats suggèrent que selon la population étudiée, les stratégies d'adaptation peuvent différer.

Les résultats de la précédente étude ont mis en évidence que les participants LCNS semblent utiliser une stratégie décisionnelle plus orientée vers les contraintes situationnelles que sociales, en privilégiant des stratégies de marche plus conservatrices, i.e. en choisissant de franchir des ouvertures qui permettent de minimiser la rotation des épaules au détriment de l'efficacité (prendre le chemin le plus court). Cependant, les participants LCNS adaptent leur mouvement de manière plus prudente, caractérisée par une zone de dégagement plus importante lorsqu'une personne est placée au milieu des ouvertures et qu'ils franchissent l'ouverture large. Ainsi, les facteurs sociaux semblent influencer les stratégies des participants LCNS au moment du franchissement d'un obstacle statique lorsque le contexte situationnel le permet. C'est dans cette perspective que la mise en place d'un protocole de marche en interaction avec un environnement dynamique nous a semblée importante, en considérant cette fois ci l'interaction avec une autre personne en mouvement. En particulier, dans une population LCNS présentant des difficultés, non seulement sur le plan fonctionnel, mais également sur le plan cognitif, cette situation expérimentale pourrait permettre la mise en avant de l'effet de la LCNS sur les stratégies

décisionnelles et motrices dans des tâches écologiques complexes.

L'objectif principal de cette recherche a été de déterminer si la LCNS modifie la perception du risque de collision usuellement décrite dans des populations d'adultes asymptomatiques (AA) lors d'une tâche de croisement entre deux marcheurs. Les objectifs secondaires visaient à comprendre la contribution de chaque marcheur (changement de vitesse et d'orientation) à la résolution de ce risque de collision et à évaluer l'influence des variables liées à la sensation douloureuse sur les stratégies locomotrices des participants. Notre hypothèse principale était que les participants LCNS présenteraient une stratégie d'évitement plus prudente, mise en évidence par un seuil de distance future de croisement, qui déclenche les stratégies locomotrices, plus élevé, ainsi qu'une distance de croisement plus importante en comparaison avec des individus AA. Concernant l'ordre de passage, alors que chez les individus AA, celui-ci est défini très tôt dans l'interaction et préservé jusqu'au croisement, nous avons émis l'hypothèse que les participants LCNS présenteraient des inversions de l'ordre de passage plus nombreux, traduisant une mauvaise perception des conditions initiales de l'interaction. Enfin, concernant les facteurs accompagnant la douleur, nous émettons l'hypothèse que ceux-ci impacteront les stratégies d'évitement mises en place, notamment en termes de contribution individuelle à l'évitement de collision.

MÉTHODOLOGIE

2.1 Schéma de l'étude

Cette étude est prospective par échantillonnage comparant un groupe AA à un groupe de participants présentant une LCNS, appariés selon l'âge et le sexe. L'étude a consisté en deux visites pour chaque participants : une visite d'inclusion et une visite pour la passation du protocole (tâche locomotrice et passation de questionnaires liés à la sensation douloureuse). La durée de l'étude pour un participant était de quatre semaines maximum.

2.2 Population

17 participants LCNS ($46,4 \pm 12,7$ ans, 9 femmes) et 17 participants AA ($46,3 \pm 12,7$ ans, 11 femmes) se sont portés volontaires et ont donné leur consentement écrit pour participer à l'étude.

2.2.1 Critères d'inclusion

Les adultes souffrant de LCNS devaient présenter une douleur située entre la charnière thoraco-lombaire et le pli fessier inférieur, avec ou sans douleur dans l'une ou l'autre des jambes. Cette douleur devait être présente depuis plus de 12 semaines, de façon quotidienne ou quasi quotidienne (au moins 4 jours sur 7). Les participants ne devaient suivre aucun traitement ou avoir un traitement stable depuis au moins deux semaines avant l'inclusion. Pour les deux groupes, les participants devaient parler, lire et comprendre le français, être âgés entre 18 et 65 ans, être capables de comprendre les ordres simples et les consignes expérimentales, avoir une vision normale ou corrigée et être affiliés à un régime de sécurité sociale ou bénéficiaires d'un tel régime.

2.2.2 Critères de non-inclusion

Les participants LCNS ne devaient pas présenter de signes d'alerte (drapeaux rouges) orientant vers une pathologie sous-jacente nécessitant une prise en charge spécifique et/ou urgente telle que : litige en cours dans les suites d'un accident du travail, douleur liée à un diagnostic de cancer, symptômes médullaires associés (signes pyramidaux, troubles de la

coordination, déficits moteurs ou sensitifs, troubles sphinctériens, etc.), douleur à la suite d'une infection (transpiration nocturne, fièvre, frissons, abus de drogue intraveineuse, immunodéficience, intervention chirurgicale récente, infection urinaire ou cutanée, etc.), fractures récentes ou pathologiques (accidents, antécédents d'ostéoporose, prise chronique de corticoïdes, perte de poids inexplicée, fatigue, antécédents de cancer, etc.), problèmes vasculaires (pieds froids, diminution du pouls artériel périphérique, etc.). Pour le groupe AA, les participants ne devaient pas présenter de plainte de douleur chronique en cours ou d'antécédents de douleur chronique significative (supérieure à 4/10 pendant au moins six mois) [Queneau *et al.*, 2019], de pathologies ayant un retentissement sur la marche ou la posture, de difficultés à effectuer les déplacements étudiés sans apparition de gêne ou de fatigue exagérée. Enfin, pour les deux groupes de participants, ceux-ci ne devaient pas : être des femmes enceintes ou allaitantes, présenter de troubles cognitifs ou psychologiques incompatibles avec le respect et/ou la compréhension du protocole, être incapables de comprendre le consentement éclairé, être sous tutelle ou curatelle, participer à un autre protocole de recherche impliquant la personne humaine en parallèle, être des personnes privées de liberté par une décision judiciaire ou administrative, faire l'objet de soins psychiatriques, présenter de signes neurologiques évoquant une maladie neurodégénérative responsable de trouble de la marche (syndrome parkinsonien, etc.).

2.2.3 Moyens de recrutements

Le recrutement des participants LCNS a été assuré par voie directe au sein du centre de médecine du sport et de réadaptation à l'effort (SPORMED, Rennes) et dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR) du Centre Hospitalier Universitaire (CHU, Rennes). L'inclusion a été réalisée par le docteur Olivier Roze (investigateur principal) au sein de la clinique la Sagesse et par le docteur Philippe Carson-Jouzel au sein du CHU. Le recrutement des participants AA a été réalisé par voie d'affiche ou par contact direct et leur inclusion a été réalisée par le docteur Olivier Roze (investigateur principal) au sein de la clinique la Sagesse.

2.2.4 Lieu de l'expérimentation

Les expérimentations ont eu lieu dans le gymnase du laboratoire M2S situé à l'adresse suivante : Campus de Ker Lann, avenue Robert Schuman, 35170 BRUZ. Ce gymnase est dédié à l'analyse du mouvement.

2.2.5 Agrément et autorisation

Cette étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes (CPP) Île-de-France VIII, le 24 octobre 2022 (n°2022-A01102-41).

2.3 Schéma expérimental

La zone expérimentale était un carré de 9m de côté (figure 52) placée au milieu d'un gymnase (20 m x 30 m). Quatre panneaux occultants (de 2,25 m de long) étaient disposés entre chaque coin de la zone expérimentale, permettant aux participants d'atteindre leur vitesse de confort avant d'être en mesure de voir l'autre personne. Cela nous permettait également de définir le début de l'interaction, comme détaillé dans la section 2.5.2.3. L'origine du repère est le point situé entre les deux diagonales du carré. Le mouvement de chaque participant a été enregistré grâce au système optoélectronique Qualisys, composé de 23 caméras synchronisées à 200 Hz. Pour cela, 14 marqueurs passifs réfléchissants ont été disposés sur les participants au niveau des deux acromions, de la 7^e cervicale, des épines iliaques supérieures antérieures et postérieures, des malléoles externes de cheville. Cinq marqueurs étaient également placés sur un casque de vélo porté par chaque participant. Leur disposition unique permettait d'associer le jeu de marqueurs à l'identifiant du participant, permettant ainsi de le classer automatiquement dans le groupe AA ou LCNS. L'analyse cinématique de la locomotion a été effectuée sur ces données enregistrées, à l'aide du logiciel Qualisys Track Manager (QTM).

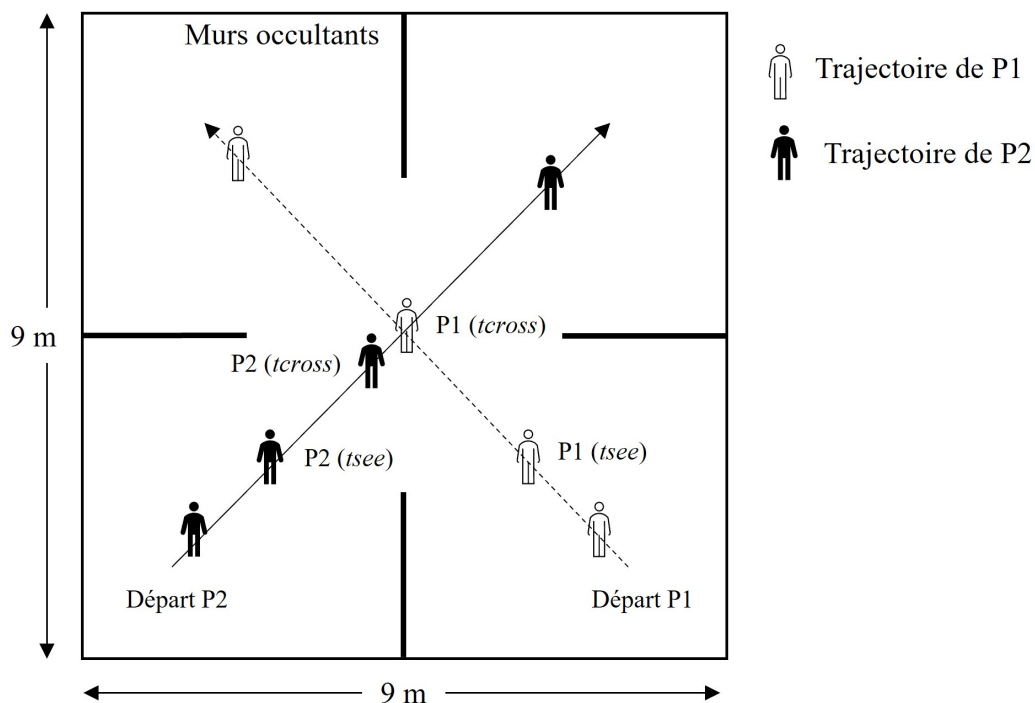


FIGURE 52 – Schéma expérimental du protocole de recherche PERL 3.

2.4 Protocole

L'étude s'est déroulée en deux temps : une première visite d'inclusion et une seconde pour l'expérimentation.

2.4.1 Visite d'inclusion

Les participants LCNS et les participants AA ont été vus par l'un des médecins investigateur de l'étude au cours d'une consultation clinique sous forme d'entretien et examen médical permettant de justifier de l'inclusion ou de la non-inclusion des participants. Il s'agissait de participants LCNS consultant pour la première fois ou de participants LCNS déjà suivis pour leur douleur. Le médecin a répondu aux questions des participants avant signature du consentement éclairé puis a complété les critères d'inclusion et de non-inclusion.

2.4.2 Visite pour l'expérimentation

2.4.2.1 Évaluation psychologique

La deuxième visite a été réalisée dans un délai maximum d'un mois après la visite médicale. Après la signature du formulaire de consentement, une évaluation psychologique sous forme d'entretien individuel a été réalisée par une psychologue spécialisée en psychologie cognitive. L'ensemble des participants a complété des échelles et des questionnaires auto-administrés portant sur l'anxiété, la dépression et la qualité de vie. Les participants douloureux ont également complété des échelles et questionnaires portant sur la perception douloureuse : intensité de la douleur, niveau de catastrophisation, niveau de peur liée au mouvement, niveau de flexibilité psychologique, niveau sur les croyances de peur et d'évitement et sur le fonctionnement physique. L'ensemble des échelles et questionnaires choisis ont été validés pour la population cible et sont détaillés dans la partie 2, section 2.5.1. La durée totale de passation pour les participants LCNS de l'ensemble de ces tests est estimée à 40 minutes maximum, et à 10 minutes pour les participants AA.

2.4.2.2 Évaluation cinématique

L'évaluation cinématique a été réalisée par les investigateurs de l'étude, le même jour, après une pause de 15 minutes à la suite de l'évaluation psychologique. Selon le nombre de participants recrutés pour le jour de l'expérimentation, le protocole de marche a été effectué soit avec 4 participants (7 sessions) soit avec 6 participants (1 session) et 5 expérimentateurs, répartis sur les 4 points de départ de la zone expérimentale (coins du carré) et un expérimentateur à l'ordinateur. Chaque participant s'est vu attribué un numéro. Un essai consiste en un déplacement de deux participants (un par diagonale), de

leur position de départ, située à un coin de la zone expérimentale, vers le coin opposé. La distance entre le point de départ et d'arrivée est de 12,7 m. À chaque début d'essai, un opérateur indique, grâce aux numéros attribués préalablement aux participants, qui sont les deux participants devant prendre part à l'essai en cours. Chaque essai a été randomisé en fonction du groupe et du point de départ. Les interactions entre groupes de marcheurs ont été distribuées comme suit :

Pour les sessions avec 4 participants :

- 20 AA-AA, permettant de recueillir des données de référence pour comparaison avec la littérature existante des adultes AA impliqués dans cette expérimentation,
- 40 AA-LCNS,
- 20 LCNS-LCNS,
- 3 essais par participant en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire, permettant de mesurer leur vitesse de confort en l'absence d'interaction avec un autre piéton.

Pour les sessions avec 6 participants :

- 30 AA-AA, permettant de recueillir des données de référence pour comparaison avec la littérature existante des adultes AA impliqués dans cette expérimentation,
- 63 AA-LCNS,
- 30 LCNS-LCNS,
- 3 essais par participant en ligne droite sans obstacle sur la trajectoire, permettant de mesurer leur vitesse de confort en l'absence d'interaction avec un autre piéton.

Ces distributions d'essais ont été conçues de telle sorte que chaque participant interagissait 20 fois avec les autres participants de son groupe et 20 fois (session avec 4 participants) ou 21 fois (session à 6 personnes) avec les participants de l'autre groupe, correspondant à une distance de 520,7 m. Afin que chacun ait la possibilité d'interagir avec les autres, la session expérimentale comprend 3 blocs expérimentaux de 31 essais (30 pour le troisième bloc) randomisés pour la session à 4 personnes et 47 essais randomisés pour la session à 6 personnes. Le nombre total d'essais réalisés pour la session à 4 personnes est de 93 et pour la session de 6 personnes de 141. La durée d'un essai était d'environ 30s (moins de 20s de marche et au moins 10s de pause entre les essais). La durée totale de l'expérimentation était d'environ 45 minutes pour la session à 4 personnes et 1h10 pour la session à 6 personnes. Avant et après l'enregistrement des données cinématiques, les investigateurs ont demandé également aux participants LCNS de coter leur douleur sur l'EVA renseignée dans les cahiers d'observation. À tout moment, un temps de repos pouvait être alloué aux participants, la fatigue n'étant pas un paramètre pris en compte dans cette recherche.

2.5 Analyse des données

2.5.1 Échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs accompagnant la douleur

Afin de déterminer quelles variables liées à la perception douloureuse ont pu influencer les actions des participants, nous avons examiné comment les participants discriminaient leur douleur, leur fonctionnement psychologique, leur fonctionnement physique et leur qualité de vie à l'aide d'échelles et de questionnaires auto-administrés. La description des échelles et questionnaires utilisés portant sur l'ensemble de ces variables est présentée dans la partie 2 section 2.5.1.

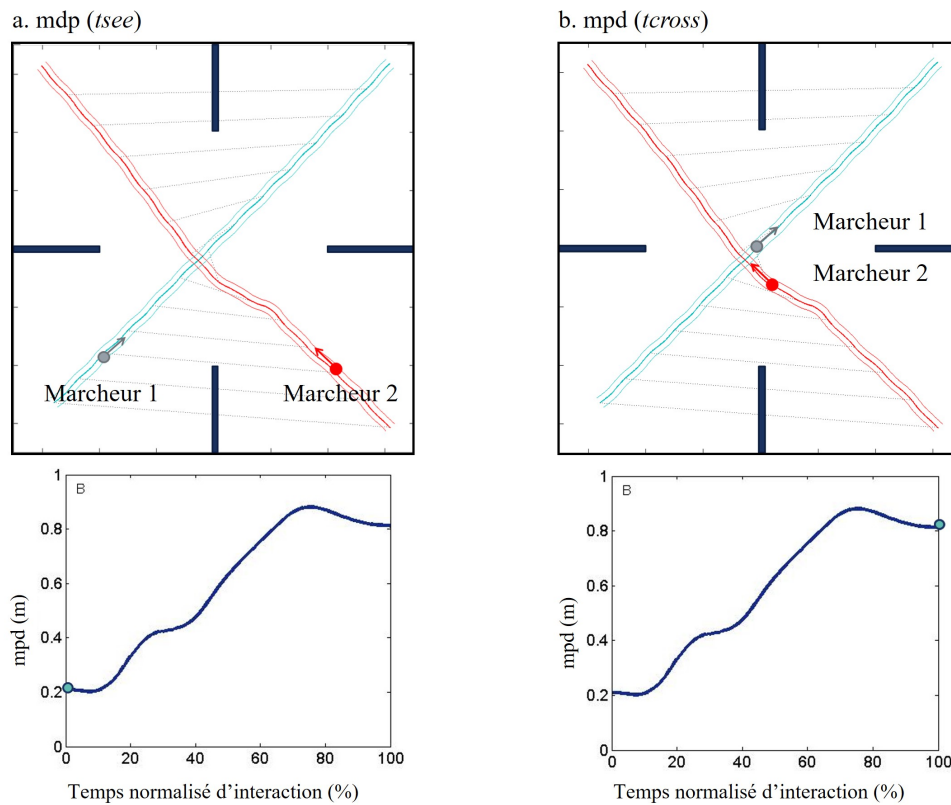
2.5.2 Données cinématiques

Pour retirer les oscillations dues à l'activité des pas, les données brutes de position ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas Butterworth de 10 Hz. Nous avons calculé les variables suivantes : la distance future de croisement (mpd), correspondant à notre critère de jugement principal, l'ordre de passage, la contribution à l'évitement et la vitesse de marche.

Par ailleurs, nous avons défini temporellement l'interaction entre les deux marcheurs entre les deux instants suivants [Olivier *et al.*, 2012] :

- *tsee* : marque le début de l'interaction. Il correspond à l'instant où les deux marcheurs sont théoriquement en mesure de se voir. Cet instant est défini lorsque le milieu du vecteur qui relie les deux marcheurs dépasse pour la première fois le mur occultant.
- *tcrosss* : marque la fin de l'interaction. Il correspond à l'instant où la distance entre les deux marcheurs est minimale.

Ces instants sont illustrés sur la figure 53. Dans la suite des analyses temporelles des données, nous avons effectué une normalisation temporelle de la période d'interaction de *tsee* (c.-à-d. 0 % de l'interaction) à *tcross* (c.-à-d. 100 % de l'interaction) afin de permettre la réalisation de moyennes sur ces périodes mais également des comparaisons entre les groupes de participants car les durées de chaque essai exprimées de manière absolue sont différentes.


 FIGURE 53 – Évolution de $mpd(m)$ à t_{see} (a.) et à t_{cross} (b.).

2.5.2.1 Ordre de passage

Pour chaque essai, nous avons identifié l'ordre de passage des participants à t_{cross} . Les abréviations suivantes ont été utilisées pour la suite des analyses : interaction entre deux marcheurs AA : AA-AA ; interaction entre deux marcheurs AA et LCNS, où le marcheur AA est passé premier : AA-LCNS, où le marcheur AA est passé second : LCNS-AA et interaction entre deux marcheurs LCNS : LCNS-LCNS.

2.5.2.2 Vitesse de marche

La position horizontale du centre des marqueurs positionnés sur le casque de vélo porté par le participant a été calculée en prenant la position moyenne des marqueurs placés sur le casque. La vitesse de marche instantanée a été calculée comme la dérivée temporelle première de la position horizontale du centre du casque de vélo.

2.5.2.3 Distance future de croisement (mpd)

Pour répondre à l'objectif principal de cette étude, nous nous sommes intéressés à une variable décisionnelle nous apportant des indices sur le choix du mode d'action en considérant le seuil de risque initial de collision qui déclenche une manœuvre d'évitement. Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la distance future de croisement

(mpd) qui correspond à la prédiction de la distance minimum qui séparera les marcheurs si ces derniers ne modifient pas leur mouvement. Elle est calculée à chaque instant grâce à une extrapolation linéaire des trajectoires courantes des deux marcheurs [Olivier *et al.*, 2012].

Afin d'identifier le seuil d'adaptation, qui correspond à la distance future de croisement qui déclenche une manœuvre d'évitement de collision, nous utiliserons la méthode proposée par Berton *et al.* [Berton *et al.*, 2019]. Une adaptation de mouvement pour éviter une collision correspond à une augmentation de mpd durant l'interaction, de telle sorte que la valeur de mpd au moment du croisement ($\text{mpd}(t_{\text{cross}})$) soit plus grande que la valeur de mpd au moment où les marcheurs peuvent se voir ($\text{mpd}(t_{\text{see}})$). Nous identifierons alors un seuil d'adaptation de mouvement en effectuant une bi-régression linéaire avec la distance minimale à t_{cross} en fonction de la distance future de croisement prédite à t_{see} (figure 54). Le seuil critique correspond à l'intersection des deux lignes de régression. Nous diviserons ensuite notre jeu de données en deux pour chaque catégorie d'interaction :

- Essais pour lesquels $\text{mpd}(t_{\text{cross}}) > \text{mpd}(t_{\text{see}})$
- Essais pour lesquels $\text{mpd}(t_{\text{cross}}) = \text{mpd}(t_{\text{see}})$ (i.e., aucune adaptation de mouvement n'est réalisée).

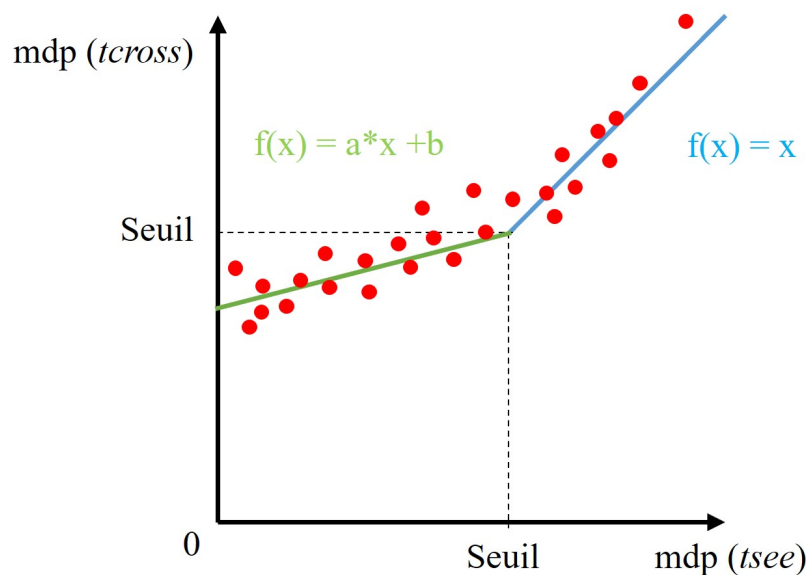


FIGURE 54 – Représentation du calcul du seuil en effectuant une bi-régression linéaire avec la distance minimale à t_{cross} en fonction de la distance minimale prédite à t_{see} .

2.5.2.4 Inversion de l'ordre de passage

L'ordre de passage a été assigné en fonction de l'ordre final de croisement (t_{cross}), le marcheur en avance au croisement étant le marcheur passant 1^{er} et le marcheur en

retard étant le 2nd. Cela nous a permis de signer l'évolution de mpd durant l'interaction de la manière suivante : $mpd(tcross)$ était toujours positive. Une valeur positive de $mpd(tsee)$ suggère que l'ordre de passage a été préservé tout au long de l'interaction. Si $mpd(tsee)$ est négatif alors cela implique qu'une inversion de l'ordre de passage entre les deux marcheurs est intervenue. On peut alors identifier le nombre d'inversions de l'ordre de passage en comptant le nombre de fois où une valeur de $mpd(tsee)$ a été notée.

2.5.2.5 Contribution à l'évitement de collision

Nous nous sommes également intéressés à la contribution de chaque marcheur pour augmenter la distance future de croisement. Cette contribution a été analysée en regard du groupe expérimental et de l'ordre de passage du marcheur au croisement. Pour ce faire nous avons calculé les dérivés partielles de $mdp(t)$ par rapport aux adaptations de mouvements effectuées par le participant, prenant en compte l'orientation et la vitesse [Olivier *et al.*, 2013].

2.6 Analyse statistique

L'analyse des données a été réalisée à l'aide de RStudio (version 4.1.3 ; RStudio, Inc) et MATLAB (Version R2021b, MathWorks, Natick, USA). La signification statistique a été fixée à $p < 0,05$. La normalité et l'homogénéité de la variance ont été évaluées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Levene. Les différences entre les groupes pour les caractéristiques des participants (âge, sexe, HADS, EQ-5) ont été évaluées à l'aide des tests de Student, de Welch ou de Wilcoxon selon les conditions de normalité et d'homogénéité de la variance. La différence entre les groupes pour la vitesse de marche pendant les essais en ligne droite sans objets sur la trajectoire a été évaluée à l'aide du test de Wilcoxon. Un test du X^2 d'indépendance a été réalisé pour chaque interaction de groupe (AA-AA, AA-LCNS, LCNS-AA et LCNS-LCNS) afin d'examiner le nombre d'inversions de $mpd(t)$. Une cartographie paramétrique statistique (SPM) et une analyse post-hoc ont été effectuées pour comparer l'évolution de $mpd(t)$ entre les groupes de $tsee$ à $tcross$. Des corrections de Bonferroni ont été appliquées à toutes les valeurs p avec le niveau de signification à $\alpha = 0,05$. Les effets de l'interaction des groupes sur la distance de croisement ($mpd(tcross)$) pour tous les essais avec une adaptation du mouvement ont été évalués à l'aide d'une ANOVA à une voie. Des tests t d'échantillons appariés utilisant l'analyse SPM ont été réalisés pour chaque groupe afin d'explorer la contribution des participants. Des tests de Kruskal Wallis suivis de tests post-hoc de Dunn avec corrections de Bonferroni ont été réalisés pour chaque interaction de groupe (AA-AA, AA-LCNS, LCNS-AA et LCNS-LCNS) afin d'examiner la contribution de chaque marcheur passé premier et second. Pour finir, une analyse entre les groupes a été effectuée avec un test de X^2 d'indépendance pour com-

parer le nombre d'essais pour les groupes d'interaction où les participants contribuaient négativement à l'interaction, i.e. où les participants diminuaient la distance future de croisement. Pour finir, des tests de corrélations de Spearman ont été réalisés entre les scores aux échelles et questionnaires portant sur les facteurs accompagnant la douleur et la contribution de chaque marcheur pour chaque groupe d'interaction.

RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques des participants

L'âge et le sexe n'étaient pas significativement différents entre les groupes LCNS et AA. Le groupe AA avait un score de qualité de vie plus élevé [$W = 287$, $p < 0,0001$, $r = 0,85$] et un score d'anxiété [$t(32) = -2,74$, $p < 0,01$, $d = -0,94$] et de dépression [$t(32) = -2,58$, $p < 0,01$, $d = -0,98$] moins élevé que les participants LCNS. L'ensemble des caractéristiques des participants LCNS et AA sont présentées dans le tableau 9).

Participants (n)	LCNS (11)	AA (18)	p-value
Age - m(sd)	47,9 (12,7)	46,4 (12,8)	0,72
Sex (F/H)	10/7	11/6	1
MMSE - med(iqr)	29 (1)	30 (1)	0,11
HADS - m(sd)			
Anxiété	8,82(2,88)	5,94 (3,25)	**
Dépression	4,47 (2,27)	2,53 (1,66)	**
EQ5D - med(iqr)	0,61 (0,21)	1 (0,09)	****
RMDQ - m(sd)	8,82 (3,2)		
FABQ - m(sd)			
Activité physique	11,23 (6,05)		
Travail	13,76 (9,00)		
PCS - m(sd)	23,82 (8,98)		
TSK - m(sd)	37,59 (6,59)		
PIPS - m(sd)			
Évitement	40,18 (12,63)		
Fusion	29,47 (5,05)		
score total	60,65 (16,11)		
EVA - m(sd)	2,79 (1,94)		

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

LCNS : Lombalgie Chronique Non-Spécifique. m(sd) : moyenne (écart-type), med(iqr) : médiane (inter-quartile). MMSE : Mini Mental State Examination (rang 0-30). HADS : Hospital Anxiety and Depression Scale avec une sous-échelle portant sur l'anxiété (rang 0-21) et une sous-échelle portant sur la dépression (rang 0-21). EQ5D : EuroQol 5 Dimension (rang 0-1). RMDQ : Roland Morris Disability Questionnaire (rang 0-24). FABQ : Fear Avoidance Belief Questionnaire avec une sous-échelle portant sur l'activité physique (rang 0-24) et une sous-échelle portant sur le travail (rang 0-42). PCS : Pain Catastrophizing Scale (rang 0-52). TSK : Tampa Scale Kinesiophobia (rang 0-68). PIPS : Psychological Inflexibility in Pain Scale avec une sous-échelle portant sur l'évitement (rang 0-70) et une sous-échelle portant sur la fusion cognitive (rang 0-24). EVA : Echelle Visuelle Analogique (rang 0-10).

TABLEAU 9 – Caractéristiques des participants pour le protocole de recherche PERL3.

3.2 Variables cinématiques

Aucune collision n'a eu lieu entre les participants au cours de l'ensemble des sessions expérimentales.

3.2.1 Vitesse de marche

Lors des essais contrôle pour lesquels les participants étaient seuls à réaliser la tâche de marche, la vitesse de marche médiane des participants LCNS (med = 1,54 m/s, iqr = 0,14) n'était pas significativement différente des participants AA (med = 1,56 m/s, iqr = 0,12) [W = 157, $p = 0,68$, $r = 0,07$].

3.2.2 Inversion de l'ordre de passage

Sur l'ensemble des essais, plusieurs $\text{mpd}(t_{see})$ négatifs ont été rencontrés, ce qui signifie qu'une inversion de l'ordre de passage s'est produite (figure 55). Il y a eu un plus grand nombre d'inversions dans l'ordre de passage pendant les essais LCNS-LCNS (15,2 %) que pour les essais AA-LCNS (7,1%) [$X^2(1) = 4,23$, $p = 0,04$]. Il n'y avait pas de différence significative avec les deux autres groupes d'interaction LCNS-AA (10,6 %) et AA-AA (8,5 %). Une seconde analyse portant sur l'ordre de passage au moment de t_{cross} a été effectuée en comparant les interactions AA-LCNS et LCNS-AA. Les résultats révèlent que sur les 353 essais, représentant le nombre total d'interactions entre les participants AA et LCNS, les participants LCNS présentent une tendance à passer premier (198 essais LCNS-AA, 56 % contre 155 essais AA-LCNS, 44 %) [$X^2(1) = 3,45$, $p = 0,06$].

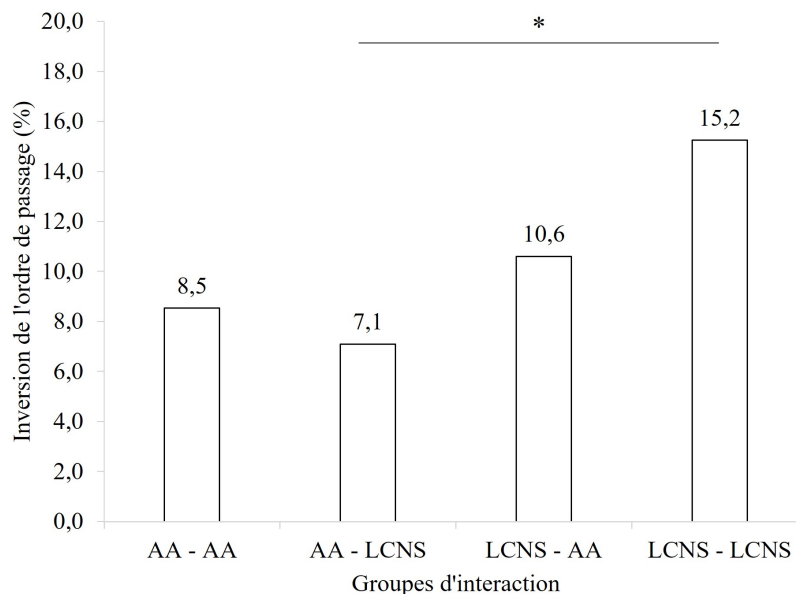


FIGURE 55 – Pourcentage des inversions de l'ordre de passage pour les quatre groupes d'interaction.

3.2.3 Seuil d'adaptation du mouvement

En considérant les essais au cours desquels il n'y a pas eu d'inversion de l'ordre de passage (c'est-à-dire que $\text{mpd}(t_{see}) > 0$), le seuil de déclenchement d'une adaptation ne diffère pas entre les groupes (figure 56). Le seuil le plus bas a été atteint au cours des essais AA-AA (0,93 m), puis des essais LCNS-LCNS (0,96 m) et des essais LCNS-AA (0,96 m) puis des essais AA-LCNS (0,97 m). Le seuil de 0,93 m a été utilisé pour les analyses $\text{mpd}(t)$ ultérieures afin de réaliser des comparaisons équitables entre les groupes en considérant les mêmes valeurs initiales maximales de mpd à t_{see} .

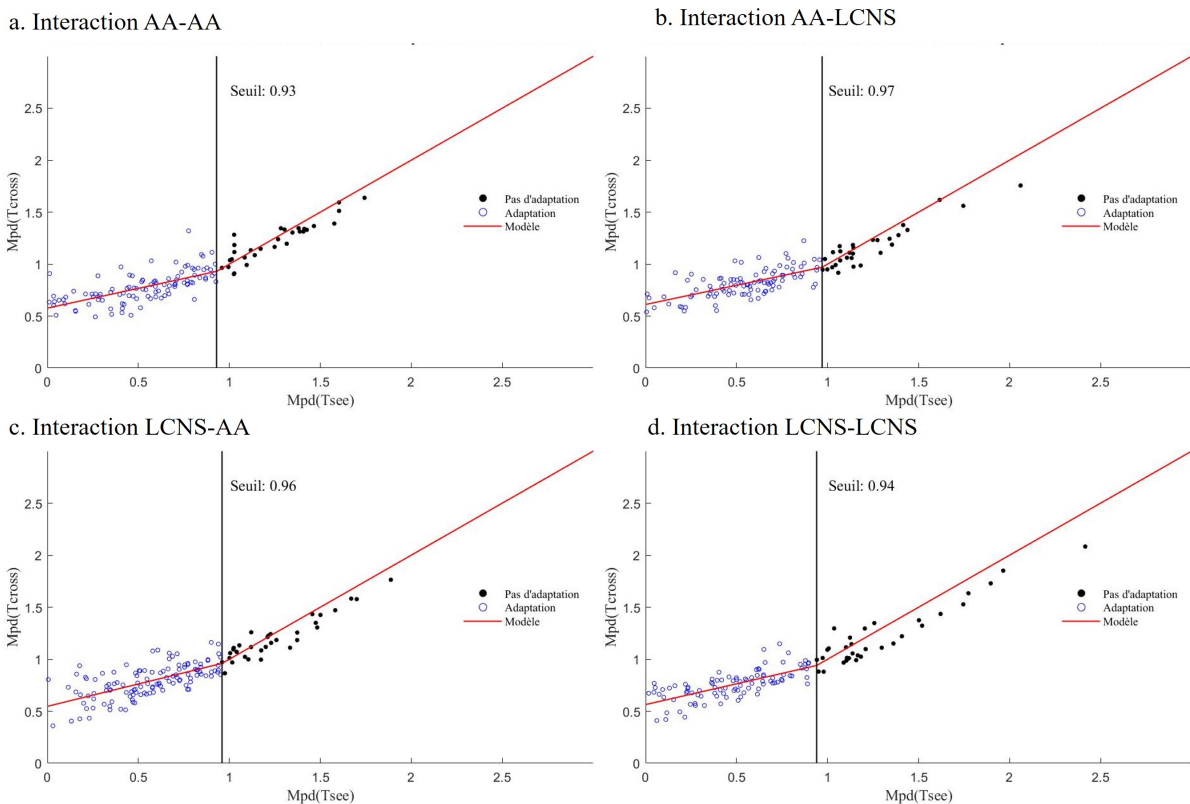


FIGURE 56 – Détermination du seuil de la distance future de croisement en deçà duquel une manoeuvre d'évitement de collision est mise en place, selon la méthode de Berton et al. [Berton *et al.*, 2019] pour l'ensemble des interactions.

3.2.4 Distance minimale prédite (mpd)

L'évolution de mpd au cours du temps (t) pour l'ensemble des essais des quatre groupes d'interaction, lorsque $\text{mpd}(t_{see}) < 0,93$ m et pour toutes les $\text{mpd}(t_{see})$ positives, a été analysée à l'aide de la méthode SPM (figure 57). Les analyses n'ont révélé aucun effet significatif du groupe d'interaction sur les valeurs relevées de mpd au cours du temps ($p > 0,05$). De même, il n'y avait pas d'effet du groupe d'interaction sur la distance finale de croisement ($\text{mpd}(t_{cross})$) ($p > 0,05$) (figure 58).

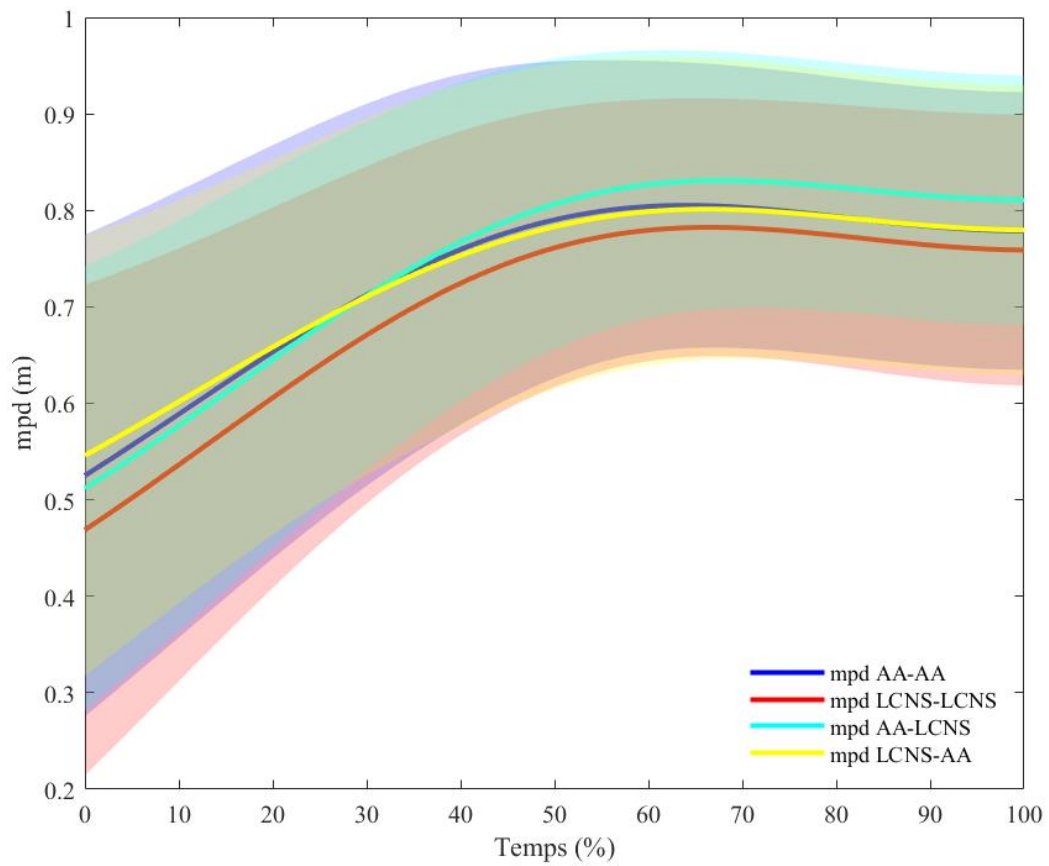
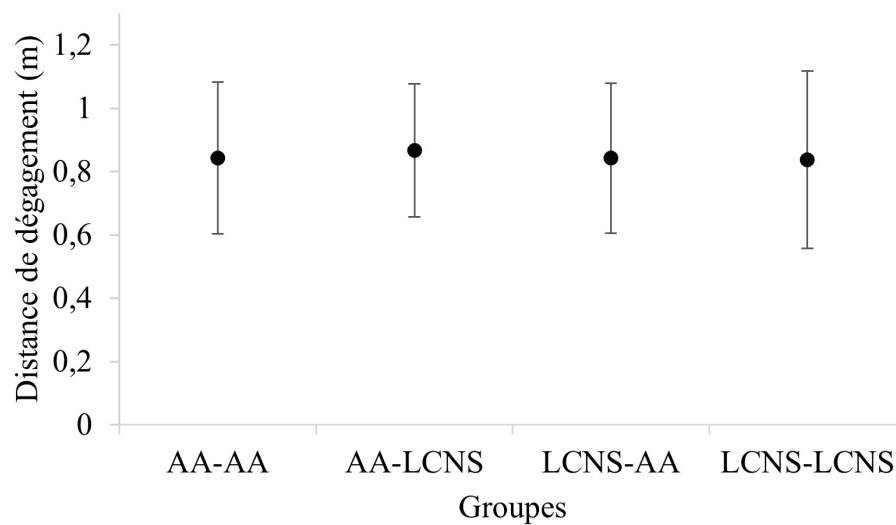


FIGURE 57 – Évolution de mpd au cours du temps pour chaque groupe d'interaction.

FIGURE 58 – Distance de croisement à $t(\text{cross})$ pour chaque groupe d'interaction.

3.2.5 Contribution à l'évitement des collisions durant l'interaction

Pendant la période d'interaction, une contribution cumulative a été considérée pour caractériser les conséquences des adaptations de mouvement de chacun des marcheurs à l'augmentation (voire parfois la diminution) de la distance future de croisement. Les analyses SPM par t-test par paires ont révélé des différences significatives entre la contribution à l'évitement de collision en fonction de la personne qui interagit avec l'autre et de son rôle, c'est-à-dire si la personne présente ou non une LCNS et la place du marcheur (premier ou second) (figure 59).

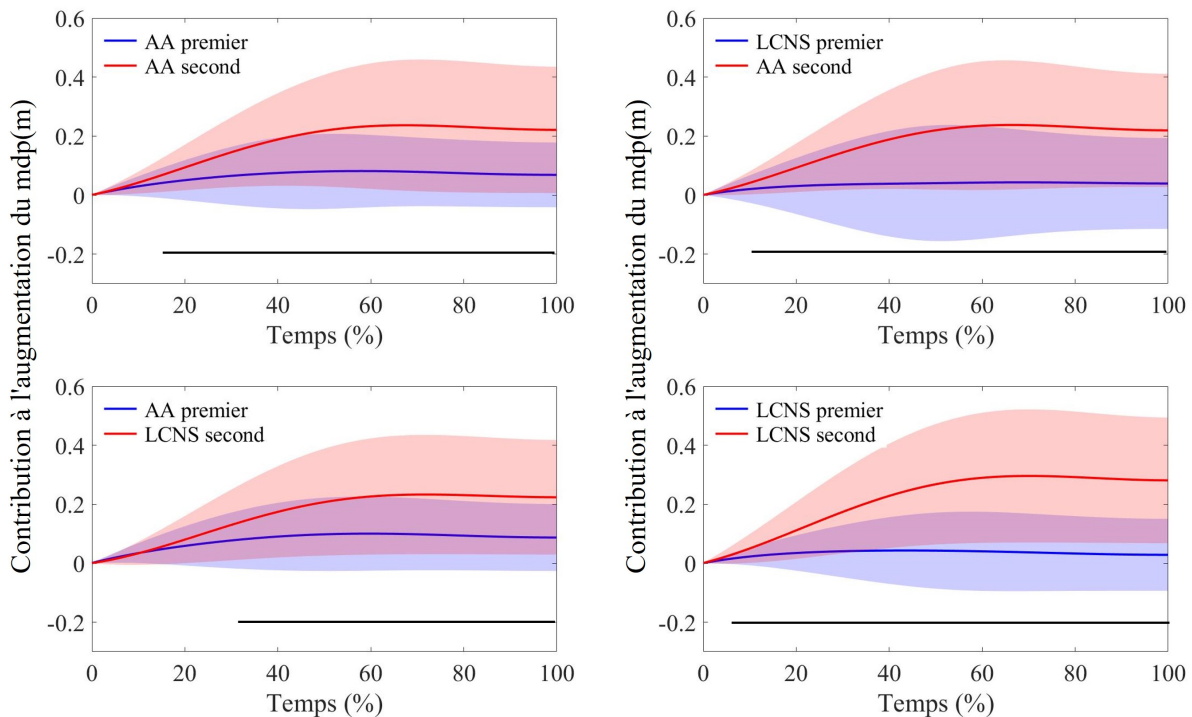


FIGURE 59 – Contribution (moyenne et écart-type) de $mpd(t)$ du marcheur 1 et du marcheur 2 pour les groupes : A) interactions AA - AA, B) interactions LCNS-AA, C) interactions AA-LCNS et D) interactions LCNS-LCNS. Les différences significatives au cours de la période d'interaction entre le marcheur qui passe en premier et le marcheur qui passe en second sont représentées par des lignes horizontales en bas de chaque graphique ($p < 0,001$). Elles caractérisent la période pendant laquelle cette différence est significative.

Dans l'interaction LCNS-LCNS, la contribution à l'évitement de collision de la personne qui passe seconde est plus importante que celle de la personne qui passe première pendant la majorité de la période d'interaction, c'est-à-dire de 5 à 100 % du temps de l'interaction ($t = 2,95$, $p < 0,001$). Dans l'interaction LCNS-AA, la contribution à l'évitement de collision de la personne qui passe seconde est plus importante que celle de la personne qui passe première de 10 à 100 % du temps de l'interaction ($t = 2,96$, $p < 0,001$). Dans

l'interaction AA-AA, la contribution à l'évitement de collision de la personne qui passe seconde est plus importante que celle de la personne qui passe première de 15 à 100 % du temps de l'interaction ($t = 2,95$, $p < 0,001$). Dans l'interaction AA-LCNS, la contribution à l'évitement de collision de la personne qui passe seconde est plus importante que celle de la personne qui passe première de 29 à 100 % du temps de l'interaction ($t = 2,95$, $p < 0,001$).

Une seconde analyse s'est intéressée à comparer les contributions totales entre les groupes d'interactions selon l'ordre de passage du participant, en considérant ainsi seulement la valeur de la contribution cumulée à *tcross*. Concernant la comparaison entre les interactions où les participants AA et LCNS sont passés premier, une différence significative entre les groupes [$X^2(3) = 22,17$, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,04$] a été identifiée (figure 60.a.). La comparaison par paire a révélé que les participants AA contribuent plus que les participants LCNS entre les groupes d'interaction AA-AA/LCNS-LCNS, AA-LCNS/LCNS-AA et AA-LCNS/LCNS-LCNS. Cette analyse n'a pas révélé de différence entre les interactions où les participants AA étaient premiers, ni pour les interactions où les participants LCNS étaient premiers. Concernant la comparaison entre les interactions où les participants AA et LCNS sont passés second, une différence significative entre les groupes [$X^2(3) = 9,7$, $p = 0,02$, $\eta_p^2 = 0,01$] a été identifiée (figure 60.b.). La comparaison par paire a révélé que les participants LCNS contribuent plus que les participants AA entre les groupes d'interaction LCNS-LCNS/AA-AA et LCNS-LCNS/LCNS-AA. Cette analyse n'a pas révélé de différence entre les interactions où les participants AA étaient seconds, ni pour les interactions où les participants LCNS étaient seconds.

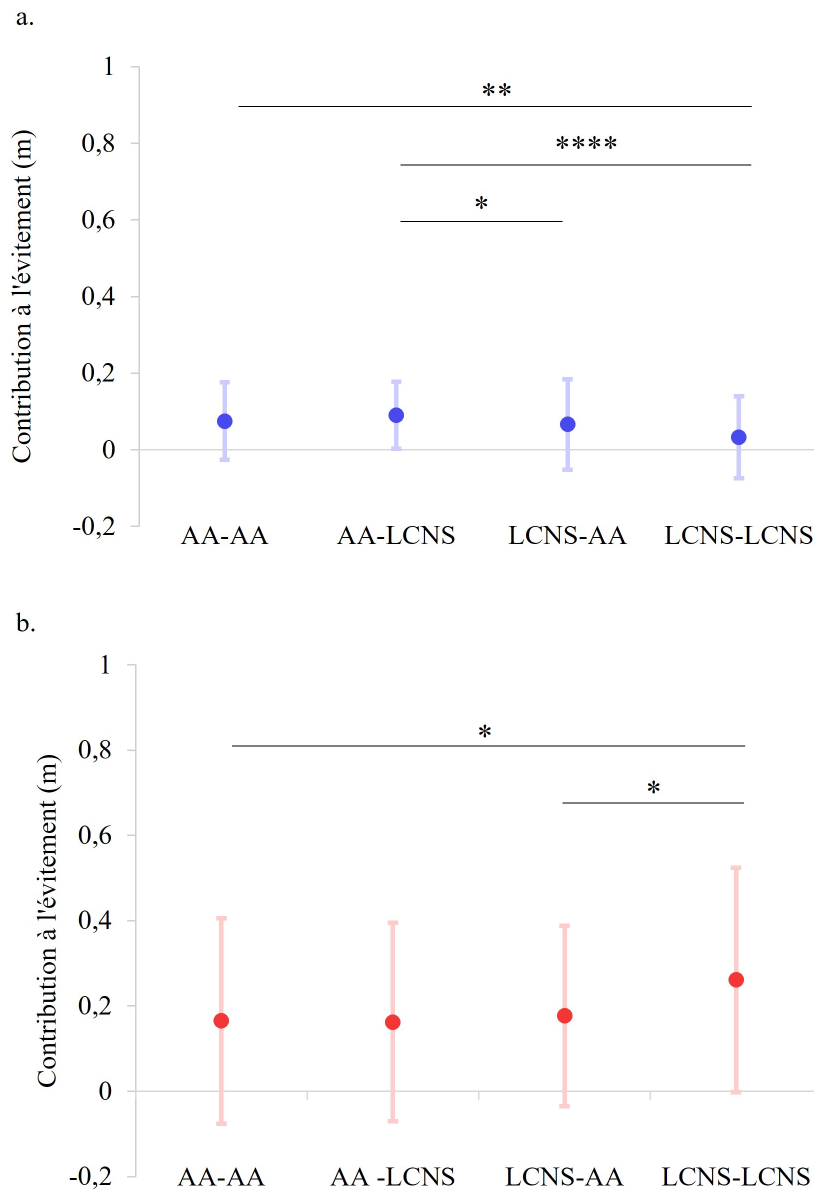


FIGURE 60 – Contribution totale (médiane et inter-quartile) de mpd entre les marcheurs passant premiers (a.) et les marcheurs passant seconds (b.) pour les interactions : A) AA-AA, B) LCNS-AA, C) AA-LCNS et D) LCNS-LCNS.

Une troisième analyse s'est intéressée à comparer le nombre d'essais où les participants ont contribué négativement à l'interaction pour chaque groupe d'interaction lorsque les participants sont passés premiers. Une différence significative entre les interactions [$X^2(3) = 9,53$, $p = 0,02$] a été identifiée (tableau 10). La comparaison par paire a révélé que le nombre de contributions négatives du premier participant lors de l'interaction LCNS-LCNS est significativement supérieure aux interactions AA-AA [$X^2(1) = 5,89$, $p = 0,01$] et AA-LCNS [$X^2(1) = 6,23$, $p = 0,01$]. Les participants ayant contribué négativement pour les interactions AA-AA et AA-LCNS sont au nombre de huit et seuls trois participants AA sont compris dans les deux groupes d'interaction. Les participants ayant contribué négativement pour l'interaction LCNS-AA sont au nombre de onze, ceux pour l'interaction LCNS-LCNS au nombre de huit et sont les huit mêmes participants qui ont contribué négativement pendant l'interaction LCNS-AA.

Groupes d'interactions	AA-AA	AA-LCNS	LCNS-AA	LCNS-LCNS
Nombre de contributions négatives	16	16	30	28
Nombre total d'essais	89	91	92	67

TABLEAU 10 – Nombre d'essais où les participants ont contribué négativement à l'interaction pour chaque groupe d'interaction lorsque les participants sont passés premiers.

3.3 Variables liées à la perception douloureuse

Les scores aux questionnaires RMDQ, FABQ, PCS, PIPS et TSK et à l'EVA sont présentés dans le tableau 9. Aucune corrélation n'a été trouvée entre les variables liées à la perception douloureuse et la contribution de chaque marcheur en fonction du groupe d'interaction et de l'ordre de passage. Cependant, une corrélation négative élevée a été observée entre la contribution à l'évitement du groupe d'interaction LCNS-LCNS où le participant LCNS est passé second et le score à l'HADSD ($r = -0,6$, $p = 0,01$). Concernant les participants AA, une corrélation négative moyenne a été observée entre la contribution à l'évitement du groupe d'interaction AA-AA où le participant AA est passé premier et le score à l'HADSD ($r = -0,48$, $p = 0,05$).

DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude était de déterminer si la LCNS modifie la perception du risque de collision usuellement décrite dans des populations AA lors d'une tâche de croisement entre deux marcheurs. En particulier, cette tâche s'intéressait à une variable décisionnelle, nous apportant des indices sur le choix du mode d'action réalisé par le participant, c'est-à-dire le seuil de risque initial de collision qui déclenche une manœuvre d'évitement de collision, tout en évaluant l'évolution temporelle de la stratégie d'évitement de collision.

Dans cette étude, le seuil d'adaptation du mouvement était similaire selon les groupes d'interaction (AA-AA : 0,93 m ; LCNS-LCNS : 0,96 m ; LCNS-AA : 0,96 m et AA-LCNS : 0,97 m). Ces résultats montrent aussi que pour une distance minimale prédite à *tsee* inférieure à 0,93 m, tous les participants modifiaient leur comportement moteur (vitesse et/ou direction). De plus, la distance de croisement n'était pas différente entre les groupes d'interaction (LCNS-LCNS : $0,76 \pm 0,14$ m ; AA-AA : $0,78 \pm 0,14$ m ; LCNS-AA : $0,78 \pm 0,15$ m et AA-LCNS : $0,81 \pm 0,15$ m). Ainsi, pour tous les groupes d'interactions, les participants se croisaient à une distance similaire d'environ 0,8 m. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes utilisant des paradigmes similaires : lorsque deux AA étaient sur une trajectoire de collision, le seuil d'adaptation au mouvement était d'environ 1 m et la distance de croisement au moment de *tcross* était d'environ 0,8 m [Olivier *et al.*, 2012, Olivier *et al.*, 2013, Rapos *et al.*, 2019, Rapos *et al.*, 2021]. Cependant, concernant la population LCNS, les résultats sont distincts de notre hypothèse où nous nous attendions à ce qu'ils présentent une stratégie d'évitement plus prudente, mise en évidence par un seuil de distance future de croisement plus élevé ainsi que par une distance de croisement plus importante en comparaison avec des participants AA. En effet dans nos deux précédentes études, les participants LCNS présentaient une stratégie décisionnelle plus conservatrice en adoptant des choix de mode d'action permettant de minimiser la rotation des épaules. Une des raisons pour expliquer ces résultats porte sur la conception expérimentale de la tâche de croisement de piéton présentée ici. En effet, les distances de croisement relevées étaient suffisamment larges pour ne pas nécessiter de rotation du tronc, contrairement aux deux précédentes études. Nous pouvons alors nous demander si, dans un nouveau contexte situationnel faisant intervenir par exemple une forte densité de piétons, les stratégies décisionnelles dues à l'évitement de plusieurs humains à des distances de croisement plus

proches, et qui demanderaient une rotation des épaules, seraient modifiées. De plus, dans la présente étude, l'évolution moyenne de la distance future de croisement au cours du temps ne présentait pas non plus de différence entre les groupes d'interaction. Ces résultats suggèrent que les participants LCNS ont adapté leur mouvement pour maintenir une distance future de croisement similaire à celle des participants AA.

Notre second objectif visait à comprendre la contribution de chaque marcheur, grâce à un changement de vitesse et/ou d'orientation à la résolution de ce risque de collision. Concernant l'ordre de passage, alors que chez les participants AA celui-ci est défini très tôt, nous avons émis l'hypothèse que les participants LCNS présenteraient des inversions de l'ordre de passage plus nombreux traduisant une mauvaise perception des conditions initiales de l'interaction. Une différence a été observée entre les groupes d'interaction LCNS-LCNS et AA-LCNS. Ces résultats traduisent que lorsque les participants AA passaient les premiers au moment du croisement, moins d'inversions d'ordre de passage se sont produites que pour le groupe d'interaction LCNS-LCNS. Passer en second ou ralentir peut-être considéré comme une stratégie prudente, car cela permet à l'individu d'observer et de maintenir la vue sur le marcheur qui passe en premier [Croft et Panchuk, 2018]. Cependant, dans le cas d'un évitement mutuel entre marcheurs, une inversion de l'ordre de passage entraîne des stratégies d'évitement inappropriées et un risque accru de collision en raison d'une altération du traitement de la perception et de l'action [Baker et Cinelli, 2014]. Il est intéressant de noter que sur l'ensemble des essais où les participants AA et LCNS pouvaient décider de passer premiers ou seconds, les participants LCNS présentent une tendance à passer premiers. Cela pourrait expliquer pourquoi une différence a été retrouvée avec le groupe d'interaction AA-LCNS qui semble être l'ordre de passage le moins adopté par les participants LCNS.

Concernant la contribution des deux marcheurs, dans l'ensemble des groupes d'interaction, les stratégies lors de la contribution à l'évitement étaient dépendantes du rôle c'est-à-dire que les individus passant en second ont contribué davantage à l'évitement de la collision que les marcheurs passant en premier, comme présenté dans les études antérieures [Olivier *et al.*, 2012, Olivier *et al.*, 2013, Rapos *et al.*, 2019, Rapos *et al.*, 2021]. Cependant la contribution à l'augmentation de la distance future de croisement était différente entre les participants AA et LCNS. Premièrement nous avons analysé la différence de contribution entre le marcheur passant en premier et le marcheur passant en second. Les résultats montrent que lorsque les participants AA passent seconds, que ce soit avec des participants du même groupe où avec les participants LCNS, le début de la contribution à l'augmentation de la distance future de croisement est compris entre 10 et 15 % de la période d'interaction. Cependant, lorsque les participants LCNS interagissent avec leur propre groupe, le début de la contribution à l'augmentation de la distance future

de croisement est plus précoce (à 5 % de l'interaction), et plus tardive avec le groupe AA (à 29 % de l'interaction). Ces résultats suggèrent que suivant le groupe d'interaction, le marcheur passant en second va devoir commencer à contribuer à l'augmentation de l'évitement de collision plus tôt ou plus tard dans l'interaction. Nous nous sommes alors demandé s'il existait des différences entre les groupes d'interaction pour d'un coté les marcheurs passant premier et de l'autre les marcheurs passant second qui pourraient expliquer ces stratégies.

Une seconde analyse portant sur la contribution totale de chaque marcheur selon l'ordre de passage et le groupe a été effectuée. Les résultats montrent que lorsque les participants sont passés seconds, les participants LCNS contribuent plus que les participants AA pour les interactions LCNS-LCNS/AA-AA et LCNS-LCNS/LCNS-AA. Ces résultats peuvent être en partie expliqués par l'analyse de la contribution du premier marcheur. En effet, les participants AA contribuent plus que les participants LCNS, notamment en comparant les groupes d'interaction AA-AA/LCNS-LCNS et AA-LCNS/LCNS-LCNS, c'est-à-dire que lorsque les participants LCNS passent premiers leur contribution est faible (med = 0,03, iqr = 0,11) et demande au participant passant second de contribuer d'autant plus à l'évitement de collision. De plus, il existe également une différence entre les groupes d'interaction AA-LCNS/LCNS-AA où les participants AA passant premiers ont contribué plus que les participants LCNS passant premiers. Ces résultats suggèrent que même si les stratégies lors de la contribution à l'évitement sont dépendantes du rôle, les participants AA contribuent malgré tout à l'évitement de collision. Les participants LCNS, quant à eux, lors d'une interaction LCNS-LCNS, semblent utiliser préférentiellement une stratégie basée sur le rôle, où le second marcheur contribue sensiblement plus à l'évitement de collision. Cependant, un résultat est surprenant concernant la contribution des participants AA lorsqu'ils passent seconds dans l'interaction LCNS-AA. En effet, une différence significative a été trouvée entre les groupes d'interaction LCNS-AA/LCNS-LCNS. Or, si les participants LCNS contribuent moins en passant premiers en comparaison avec les participants AA, cela suggère que les participants AA auraient dû contribuer plus à l'évitement pour contrer cette différence. Nous proposons deux explications possibles à ces résultats. La première est qu'il n'existe pas de différence avec les deux autres groupes d'interaction AA-AA et AA-LCNS, ce qui peut supposer qu'une contribution supérieure n'améliorait pas l'évitement de collision. Ces résultats sont également soutenus par le fait qu'aucune collision dans ce groupe d'interaction ne s'est produite. La deuxième concerne l'évolution de la distance future de croisement. En effet, aucune différence significative n'a été trouvée entre les groupes d'interaction, suggérant que pour ce groupe d'interaction, la perception des conditions de l'interaction ne demandait pas d'ajustements particuliers aux participants AA qui passaient seconds. Une dernière analyse s'est intéressée à comparer le nombre d'essais où les participants avaient contribué négativement à l'interaction, c'est-à-dire avaient diminué la distance future de croisement, pour chaque groupe

d'interaction lorsque les participants sont passés premiers. Les résultats ont montré qu'il y avait un nombre significativement plus important de participants LCNS qui avaient contribué négativement à l'interaction LCNS-LCNS en comparaison avec les interactions dans lesquelles les participants AA passaient premiers. D'après une analyse descriptive, les participants LCNS ayant contribué négativement sont les mêmes personnes pour les groupes d'interactions LCNS-AA et LCNS-LCNS. Nous pouvons alors supposer que des caractéristiques inter-individuelles liées à la douleur sont impliquées dans les stratégies d'évitement de collision.

C'est dans cette perspective que notre troisième objectif concernait l'implication des variables liées à la perception douloureuse sur les stratégies d'évitement mises en place, notamment en termes de contribution individuelle à l'évitement de collision. Les résultats n'ont pas montré de corrélation entre les scores aux questionnaires portant sur les croyances de peur et d'évitement, la kinésiophobie, l'anxiété, les fausses croyances et la qualité de vie avec la contribution à l'évitement. Cependant, des corrélations ont été trouvées pour le score de dépression pour les deux groupes. Concernant les participants LCNS, une corrélation négative a été observée entre le score de dépression et la contribution à l'évitement lors de l'interaction LCNS-LCNS lorsque le participant LCNS passait second. Autrement dit, plus le score de dépression était faible, plus la contribution à l'évitement était importante. De la même manière, pour les participants AA, une corrélation négative a été observée entre le score de dépression et la contribution à l'évitement lors de l'interaction AA-AA, ainsi plus le score de dépression était faible, plus la contribution à l'évitement du participant était élevée. Cependant, il est à noter que les scores de dépression étaient significativement différents entre les deux groupes, avec un score de dépression plus élevé chez les participants LCNS en comparaison avec les participants AA. Alors que certains participants LCNS présentaient un score de dépression avec une symptomatologie probable, c'est-à-dire un score compris entre 8 et 10 [Zigmond et Snaith, 1983], aucun participant AA ne présentait de score supérieur à 5, correspondant à une absence de symptomatologie de la dépression. De plus, comme vu précédemment, la corrélation entre le niveau au score de dépression et la contribution des marcheurs était significative pour les participants LCNS quand ils passaient seconds et pour les participants AA lorsqu'ils passaient premiers, suggérant que les mécanismes sous-jacents ne sont pas les mêmes pour les deux groupes de participants. En effet, ces résultats pourraient en partie expliquer la différence entre les groupes concernant la contribution des marcheurs en fonction de l'ordre de passage : comme vu précédemment, les participants LCNS contribuent plus que les participants AA quand ils passent seconds alors que les participants AA contribuent plus quand ils passent premiers. D'autres études sont à mener pour confirmer ces résultats.

En conclusion, les participants LCNS semblent avoir perçu la collision de manière

appropriée, mais les stratégies d'évitement mises en place diffèrent des participants AA. Ainsi, les participants LCNS lors des interactions LCNS-LCNS présentaient un plus grand nombre d'inversions de l'ordre de passage. De plus, les participants LCNS, en comparaison avec les participants AA, contribuaient moins quand ils passaient premiers et plus quand ils passaient seconds. Ces résultats peuvent être en partie expliqués par un nombre d'essais plus important où la contribution des participants LCNS diminuait la distance future de croisement à l'évitement quand ils passaient premier. Pour finir, une corrélation négative entre le niveau au score de dépression et la contribution des marcheurs était significative pour les participants LCNS quand ils passaient seconds et pour les participants AA lorsqu'ils passaient premiers, cependant d'autres études sont encore à mener pour confirmer les mécanismes expliquant ces résultats.

Discussion générale

Synthèse, discussion et limites des principaux résultats portant sur les différences entre les participants LCNS et les participants AA

Comme présenté dans la revue de la littérature (Partie 1 section 3.2), les paradigmes expérimentaux portant sur la navigation dans un environnement encombré ont largement été utilisés pour étudier les coordinations perceptivo-motrices mises en jeu pendant la locomotion aussi bien dans les populations jeunes et en bonne santé [Warren Jr et Whang, 1987, Franchak *et al.*, 2012, Hackney *et al.*, 2013, Olivier *et al.*, 2013, Tomono *et al.*, 2019] que dans des populations spécifiques (enfants ou personnes âgées) [Wilmot et Barnett, 2011, Rapos *et al.*, 2021, Hackney et Cinelli, 2013a, Hackney et Cinelli, 2011] ou cliniques (personnes présentant une dyspraxie, personnes ayant eu des commotions, ou après un AVC) [Wilmot *et al.*, 2015, Aravind et Lamontagne, 2014, Snyder *et al.*, 2022]. Ces paradigmes font appel à la théorie des affordances qui décrit les possibilités d'action offertes par l'environnement à un individu [Gibson, 1979, Gibson, 1986] : le mouvement émerge du système individu-environnement qui est caractérisé par une relation directe où les stimuli de l'environnement sont assez riches pour percevoir les possibilités d'action dans cet environnement [Fajen *et al.*, 2008]. Cette relation est également réciproque et est illustrée par une citation de Gibson [Gibson, 1979] : "*We perceive in order to move and we move in order to perceive*" signifiant qu'un individu perçoit pour se déplacer, et que ce déplacement va générer un flux optique qui va lui permettre de guider son mouvement. Les études antérieures ont montré que les possibilités d'action se basent sur des affordances à l'échelle du corps, calibrant le choix du mode d'action en mettant les propriétés de l'environnement à l'échelle des dimensions corporelles [Warren, 1984] et les affordances à l'échelle de l'action, calibrant le choix du mode d'action en mettant les propriétés de l'environnement à l'échelle des capacités d'action des individus [Warren, 1984]. Pour finir, les individus sont capables de réajuster leurs affordances à la suite d'un changement des dimensions corporelles et des capacités d'actions [Fajen *et al.*, 2008]. Différents modèles ont été décrits dans la littérature pour expliquer les comportements de changement de direction, d'évitement d'obstacles et de sélection d'itinéraire et ont montré que selon le contexte situationnel et social, les stratégies des individus pouvaient différer [Huber *et al.*, 2014, Knorr *et al.*, 2016, Bourgaize *et al.*, 2021]. Ainsi, nous présenterons dans une première partie l'influence de la LCNS dans un contexte faisant intervenir des facteurs situationnels et dans une seconde partie l'influence de la LCNS dans un contexte faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux.

Influence de la LCNS dans un environnement faisant intervenir des modifications du contexte situationnel

Les études présentées dans ce manuscrit de thèse ont permis de mettre en évidence que la LCNS influence les stratégies perceptivo-motrices notamment sur des variables décisionnelles lorsque l'environnement est statique mais que le contexte situationnel varie. Le premier constat est que dans une tâche de passage à travers une ouverture dont la largeur varie (d'une largeur plus étroite que la largeur des épaules à une largeur plus large), les participants LCNS ont présenté un seuil critique plus petit que les participants sans douleur. Pour rappel, ce seuil critique correspond à la limite entre les ouvertures franchissables sans modification et avec modification du comportement moteur [Warren Jr et Whang, 1987]. Dans la population générale, cette valeur est invariante et comprise entre 1,3 et 1,4, selon les études, et correspond au rapport entre la largeur des épaules et la largeur de l'ouverture, suggérant que les participants utilisent une stratégie basée sur leurs dimensions corporelles [Warren Jr et Whang, 1987, Franchak *et al.*, 2012, Hackney *et al.*, 2013]. Cependant, les affordances à l'échelle du corps ne suffisent pas à elles seules pour expliquer les choix des modes d'action, notamment dans des populations dont les capacités d'action sont modifiées comme par exemple chez des personnes âgées [Hackney et Cinelli, 2011], présentant une dyspraxie [Wilmot *et al.*, 2015] ou chez des jeunes individus en bonne santé dans une tâche manipulant le niveau de menace posturale [Hackney *et al.*, 2015a], dont les mouvements médio-latéraux rapportés étaient élevés. Pour l'ensemble de ces populations, le seuil critique était plus grand que celui de la population contrôle mais les auteurs ont montré que, une fois la largeur des mouvements médio-latéraux prise en compte, la différence des seuils critiques entre les groupes disparaissait [Warren Jr et Whang, 1987, Franchak *et al.*, 2012, Hackney *et al.*, 2013]. Dans la population LCNS, les participants ne présentaient pas de différences au niveau des oscillations médio-latérales, ni au niveau de l'amplitude de rotation des épaules au moment du franchissement de l'ouverture, mais marchaient significativement moins vite pendant la phase d'approche. Ces résultats suggèrent que les participants LCNS ont eu plus de temps pour préparer le mouvement, mais les oscillations médio-latérales et l'angle de rotation des épaules ne peuvent expliquer la valeur de seuil critique observée. Une récente revue systématique a par exemple montré que les participants LCNS présentaient une vitesse angulaire plus lente que les participants sans douleurs dans différentes tâches fonctionnelles faisant intervenir la rotation, la flexion et l'extension du tronc [Christe *et al.*, 2021b], et nous suggérons alors que d'autres paramètres cinématiques, tels que la vitesse angulaire de rotation des épaules, devraient être pris en compte dans les prochaines analyses afin de mieux comprendre les stratégies d'adaptation des participants LCNS, notamment sur la valeur de seuil critique observée.

Les résultats de la seconde étude vont dans la même direction pour la condition faisant intervenir un changement du contexte situationnel (ouverture large ou étroite). Les participants LCNS choisissent de franchir préférentiellement les ouvertures larges correspondant à un ratio de 1,8 fois la largeur de leurs épaules en comparaison avec l'ouverture étroite de 1 fois la largeur de leurs épaules : en effet, les participants LCNS présentent un plus grand pourcentage d'essais où l'ouverture large est franchie pour les buts à atteindre positionnés derrière l'ouverture étroite, contrairement aux participants AA, ce qui pourrait témoigner d'une stratégie plus prudente. A la différence de notre première étude, les participants n'étaient pas contraints à un chemin de marche. Nous émettons ainsi l'hypothèse selon laquelle les participants LCNS utilisent une stratégie décisionnelle orientée sur le contexte situationnel, en privilégiant les ouvertures pour lesquelles ils n'ont pas à tourner le tronc. Cependant, les variables cinématiques et liées à la perception douloureuse n'ont pas permis d'expliquer ces comportements. Des travaux sont encore à mener pour conforter cette hypothèse.

Une autre situation rencontrée quotidiennement est celle où sont présentes d'autres personnes. Les travaux antérieurs ont notamment montré que d'autres facteurs semblent influencer les stratégies de marche dans un environnement encombré comme la connaissance ou l'incertitude des mouvements des obstacles [Cinelli et Patla, 2008, Gérin-Lajoie *et al.*, 2005], de facteurs situationnels (angle de croisement, distance à l'objet) [Huber *et al.*, 2014] et/ou individuelles (en fonction des dimensions corporelles de la personne ou du sexe) [Knorr *et al.*, 2016, Bourgaize *et al.*, 2019]. Nous nous intéresserons dans la prochaine sous-section aux stratégies utilisées par les participants LCNS dans un environnement faisant intervenir des facteurs sociaux.

Influence de la LCNS dans un environnement faisant intervenir des modifications du contexte situationnel et du contexte social

Les participants LCNS semblent présenter les mêmes stratégies décisionnelles que les participants AA dans un environnement statique et dynamique avec la présence d'un second piéton sur leur trajectoire. Dans l'environnement statique, ce résultat se traduit par un décalage du seuil critique par rapport à la condition contrôle (sans modification du contexte situationnel et social), les participants préférant passer par l'ouverture large quelles que soient la position des buts à atteindre et l'orientation du piéton positionné au centre des deux ouvertures. Cependant, contrairement aux participants AA qui utilisent une stratégie décisionnelle basée sur les facteurs situationnels et sociaux, i.e. présentent un nombre d'essais plus important pour le franchissement de l'ouverture étroite dans un contexte ne faisant pas intervenir de facteurs sociaux, les participants LCNS ne changent pas de mode d'action. Nous pouvons ainsi formuler l'hypothèse selon laquelle les parti-

participants LCNS utilisent une stratégie décisionnelle orientée sur le contexte situationnel, en privilégiant leur sécurité au détriment des normes sociales. Sous certaines conditions, on pourrait alors suggérer que la présence d'une douleur chronique induit des changements dans la pondération de la place des facteurs situationnels et sociaux dans le choix des modes d'action. Dans la situation dynamique, le seuil d'adaptation au mouvement et la distance interpersonnelle au moment du croisement sont similaires entre les groupes d'interaction faisant intervenir deux participants LCNS, deux participants AA ou un participant LCNS et un participant AA. Ce constat semble suggérer que les participants LCNS perçoivent bien les conditions de l'environnement. Des différences ont cependant été observées concernant l'adaptation du mouvement.

En effet, la deuxième étude a mis en évidence que les participants LCNS marchaient plus lentement que les participants AA et présentaient une zone de dégagement plus importante en valeur absolue et en valeur relative lors du franchissement des ouvertures larges. Cependant, bien que ces stratégies puissent refléter un comportement plus prudent [Sanz *et al.*, 2015], nous n'avons pas comparé la vitesse de marche pendant la phase d'approche et celle au moment du franchissement, qui pourraient nous donner des indications sur les comportements adoptés par les participants LCNS. En effet, des facteurs situationnels tels que l'angle de croisement [Huber *et al.*, 2014] et la distance à l'obstacle au début de la tâche [Bourgaize *et al.*, 2019] semblent influencer le comportement d'évitement des individus. Huber *et al.* [Huber *et al.*, 2014] ont notamment montré qu'alors que les trajectoires de marche sont ajustées dans toutes les situations (objet statique, seconde personne arrivant à : 45°, 90°, 135° et 180°) chez des jeunes individus en bonne santé, la vitesse n'est ajustée que pour des situations où l'angle de croisement est de 45° et 90°. La comparaison entre la vitesse d'approche et la vitesse au moment du franchissement pourrait ainsi nous permettre de savoir si les participants LCNS ont ajusté leur mouvement sur la trajectoire de marche, comme montré dans les études antérieures dans de telles situations, ou ont ajusté également leur vitesse au moment du franchissement. De plus, alors que la vitesse de marche semble être influencée par la présence d'un humain sur la trajectoire [Hackney *et al.*, 2015b], nous n'avons pas trouvé de différence entre les essais sans changement du contexte social et ceux avec une personne placée au centre des deux ouvertures, ni chez les participants LCNS, ni chez les participants AA. Ce résultat peut être expliqué par la conception expérimentale. En effet, Bourgaize *et al.* [Bourgaize *et al.*, 2019] ont montré, dans une tâche d'évitement d'un obstacle humain non-confiné, que la distance au début de l'essai influençait l'initiation de la déviation de la trajectoire qui était presque immédiate pour des distances de 2 m et 4 m alors qu'elle était en moyenne de 5,06 m pour les essais à 6 m. De plus, les participants marchaient moins vite, suggérant que ces distances étaient trop courtes pour atteindre une vitesse de confort stable [Bourgaize *et al.*, 2019]. Il serait alors intéressant d'intégrer cette métrique dans nos prochaines

analyses afin de contrôler si la distance aux ouvertures était suffisante pour atteindre une vitesse de confort stable et d'étudier si les participants LCNS ont utilisé une stratégie basée uniquement sur une modification de la trajectoire ou également sur une modification de la vitesse de marche. Les résultats obtenus lors de la première étude ont montré que les participants AA comme les participants LCNS diminuaient leur vitesse de marche au fur et à mesure que la largeur de l'ouverture diminuait, cependant la distance à parcourir était plus longue (7 m). Nous pouvons penser raisonnablement que ce facteur joue un rôle important dans les résultats obtenus dans la seconde étude.

Dans notre troisième étude, des différences ont été observées concernant l'ordre de passage : le nombre d'inversions de l'ordre initial théorique était plus important pour le groupe d'interaction faisant intervenir deux participants LCNS en comparaison avec le groupe d'interaction faisant intervenir un participant AA en premier et un participant LCNS en second. Les études antérieures ont montré que la situation d'évitement de collision est une tâche impliquant la collaboration entre les deux marcheurs et des rôles seraient attribués en fonction de leur ordre de passage au moment du croisement [Olivier *et al.*, 2013]. Dans la population générale, il apparaît que l'ordre de passage est très peu modifié au cours des interactions et peut être prédit 2,5 m avant le croisement [Knorr *et al.*, 2016]. Une inversion accrue dans l'ordre de passage peut refléter une difficulté à traiter efficacement les informations, entraînant un comportement d'évitement plus risqué [Rapos *et al.*, 2021]. En effet, lors de l'interaction chez des personnes jeunes et en bonne santé, il a été montré que le marcheur qui passe second contribuerait plus à l'évitement que celui qui passe premier [Olivier *et al.*, 2013]. Une inversion dans l'ordre de passage modifierait ainsi le rôle de chaque marcheur et sa contribution à l'évitement, augmentant l'incertitude dans le comportement à adopter et induisant un risque accru de collision. De plus, la contribution à l'évitement des collisions diffère entre les groupes AA et LCNS en fonction de l'ordre de passage et de la personne qui interagit. En effet, l'analyse portant sur la contribution totale de chaque marcheur a permis de mettre en évidence que les participants LCNS contribuaient plus à l'évitement de collision quand ils passaient seconds dans le groupe d'interaction faisant intervenir deux participants LCNS en comparaison avec les groupes d'interaction faisant intervenir les participants AA. Ces résultats peuvent être en partie expliqués par une contribution faible des participants LCNS quand ils passent premiers, demandant aux participants passant seconds de contribuer d'autant plus à l'évitement. Il est aussi notable que les participants LCNS ont mis en place dans une proportion plus grande des stratégies inappropriées, conduisant à une diminution de la distance future de croisement au cours de l'essai, possiblement compensée par l'autre marcheur.

Des facteurs individuels extrinsèques tels que la taille [Bourgaize *et al.*, 2021, Knorr *et al.*, 2016] et intrinsèques tels que le sexe ou l'âge [Knorr *et al.*, 2016, Van Basten *et al.*,

2009, Pfaff et Cinelli, 2018] peuvent également entrer en compte dans les stratégies d'évitement de collision. Ces facteurs n'ont pas été pris en compte dans nos études, cette thèse visant principalement à évaluer l'effet de la douleur chronique. Pourtant, la largeur d'un piéton statique semble influencer l'amplitude de la déviation maximale de la trajectoire utilisée par le marcheur pour le contourner : cette amplitude est plus importante quand le piéton à éviter est plus large [Bourgaize *et al.*, 2019]. Le sexe de l'expérimentateur peut également avoir un effet : le participant initie la déviation de la trajectoire plus tôt lorsque l'expérimentateur est une femme [Pfaff et Cinelli, 2018]. Encore très peu d'études ont évalué les facteurs individuels et les résultats sont hétérogènes, ce qui peut se justifier souvent par une différence entre les conceptions expérimentales [Huber *et al.*, 2014, Bourgaize *et al.*, 2019, Van Basten *et al.*, 2009, Knorr *et al.*, 2016, Pfaff et Cinelli, 2018]. Il faut noter néanmoins que dans notre étude 2, la même expérimentatrice a pris part à tous les essais, limitant ainsi l'effet de ces facteurs d'influence.

Influence des variables liées à la perception douloureuse sur les stratégies perceptivo-motrices des participants LCNS

Une des questions majeures soulevées par ce travail de recherche est que les résultats ne mettent pas en évidence une association claire entre les caractéristiques de la LCNS et les stratégies perceptivo-motrices notamment en terme de choix de mode d'action, malgré des différences observées entre les participants LCNS et AA. L'une des explications possibles est la forte hétérogénéité entre les participants au niveau de leurs caractéristiques individuelles (intensité de la douleur, niveau d'anxiété et de dépression, niveau de catastrophisation, etc.) [Robinault *et al.*, 2023].

Nous nous sommes alors intéressés à comparer les scores obtenus par les participants LCNS dans les trois études pour observer s'il existait des différences entre les groupes. L'analyse de résultats à l'aide du test de Kruskal-Wallis à un facteur a révélé un effet du groupe pour les scores aux échelles et questionnaires : de l'HADS [X²(2) = 9,81, p < 0,001, η_p² = 0,20], du PCS [X²(2) = 9,58, p < 0,01, η_p² = 0,19], du TSK [X²(2) = 6,35, p < 0,05, η_p² = 0,11], du RMDQ [X²(2) = 7,55, p < 0,05, η_p² = 0,14], du FABQ (score portant sur le travail) [X²(2) = 16,5, p < 0,0001, η_p² = 0,37] et de l'EQ5D [X²(2) = 11,76, p < 0,001, η_p² = 0,25]. L'ensemble des résultats sont présentés sur la figure 61 et montrent que les participants LCNS présentent un score plus élevé de dépression (p < 0,01), de catastrophisation (p < 0,01), de peur du mouvement lié à la douleur (p < 0,05) et de difficultés fonctionnelles (p < 0,05) dans la deuxième étude (PERL2) en comparaison avec la première étude (PERL1). De plus, les participants de PERL2 présentent un score médian moins élevé concernant la qualité de vie (p < 0,01). Aucune différence entre les groupes n'a été observée pour les scores d'anxiété (HADS), de flexibilité psychologique

liée à la douleur (PIPS) et sur le niveau d'intensité douloureuse (EVA).

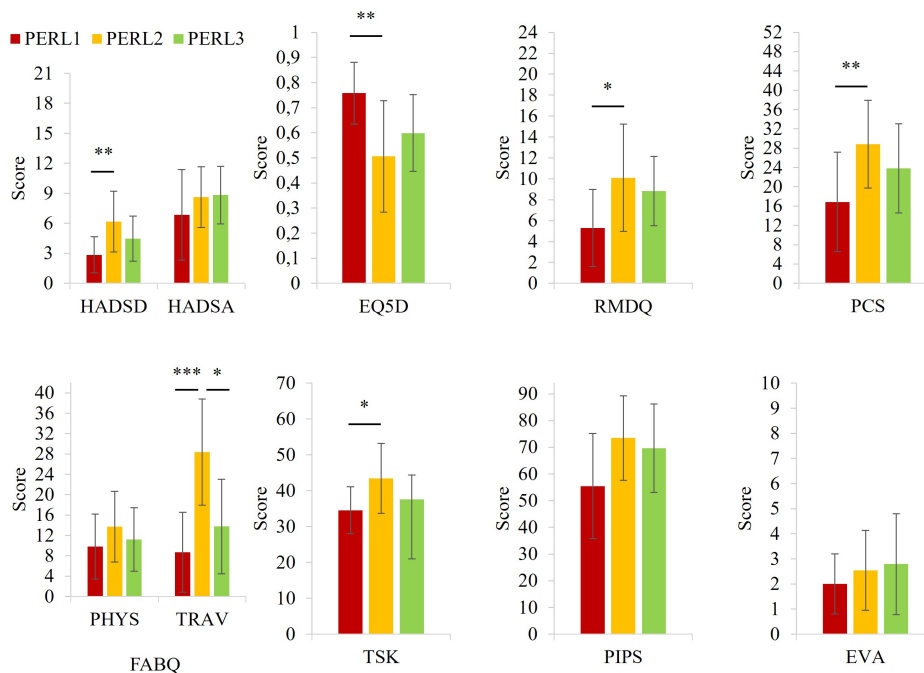


FIGURE 61 – Comparaison entre les trois études pour les scores obtenus aux échelles et questionnaires pour chaque variable portant sur les facteurs accompagnant la douleur.

Une seconde analyse s'intéressant au coefficient de variation pour chaque score aux questionnaires liés à la douleur a révélé des niveaux élevés pour les scores de dépression, d'anxiété, de catastrophisation, de flexibilité psychologique, de croyances, de peur et d'évitement lié au travail et des capacités fonctionnelles (tableau 11).

	HADSD	HADSA	PCS	TSK	PIPS	PHYS	TRAV	RMDQ	EQ5D
PERL1	0,64	0,66	0,61	0,19	0,36	0,65	0,90	0,69	0,16
PERL2	0,49	0,35	0,31	0,22	0,21	0,50	0,37	0,51	0,44
PERL3	0,51	0,33	0,39	0,18	0,24	0,56	0,67	0,37	0,26

TABLEAU 11 – Coefficient de variation pour les trois études en fonction des scores obtenus pour chaque variable aux échelles et questionnaires portant sur les facteurs accompagnant la douleur.

Pour finir, nous avons relevé le nombre de participants pour chaque étude qui présentaient un score aux échelles et questionnaires supérieur au score de coupure. Les résultats sont présentés dans le tableau 12. Le score de coupure est défini comme le score à partir duquel les individus présentent la symptomatologie mesurée par l'échelle ou le questionnaire. Le score de coupure pour l'HADSD et l'HADSA est de 8 [Zigmond et Snaith, 1983], de 30 pour le PCS [Sullivan *et al.*, 1995], de 40 pour le TSK [Vlaeyen *et al.*, 1995a] et de 4 pour le RMDQ [Stratford et Riddle, 2016].

Concernant le score à l'échelle de dépression, un participant présente un score supérieur au score de coupure dans PERL1 et un tiers des participants présentent un score supérieur pour les études PERL2 et PERL3, c'est à dire des scores décelant une symptomatologie probable de dépression. Pour le score d'anxiété, près de la moitié des participants pour l'étude PERL1 présentent un score décelant une symptomatologie probable d'anxiété ainsi que près des trois quarts des participants dans l'étude PERL2 et 90 % des participants de l'étude PERL3. 14 %, 36 % et 24 % des participants pour respectivement l'étude PERL1, l'étude PERL2 et l'étude PERL3 présentent un niveau de catastrophisation clinique. Concernant les scores de kinésiophobie, un septième, plus de la moitié et plus d'un tiers des participants sont kinésiophobes pour respectivement l'étude PERL1, l'étude PERL2 et l'étude PERL3. Enfin, la moitié des participants de l'étude PERL1 présentent des difficultés fonctionnelles et plus de 90 % des participants pour l'étude PERL2 et l'étude PERL3.

	HADSD	HADSA	PCS	TSK	RMDQ
PERL1 (n=14)	1 (7,1 %)	6 (42,9 %)	2 (14,3 %)	2 (14,3 %)	7 (50 %)
PERL2 (n=11)	4 (36,4 %)	8 (72,7 %)	4 (36,4 %)	6 (54,5 %)	10 (90,9 %)
PERL3 (n=17)	5 (29,4 %)	15 (88,2 %)	4 (23,5 %)	6 (35,3 %)	16 (94,1 %)

TABLEAU 12 – Nombre de participants pour chaque étude présentant un score aux échelles et questionnaires supérieur au score de coupure.

Ces résultats confirment d'une part qu'il existe une forte hétérogénéité dans la population LCNS de nos études et d'autre part que les résultats peuvent être influencés par la population recrutée. En effet, il est intéressant d'observer par une analyse descriptive que les patients ont été majoritairement recrutés pour les expériences PERL1 et PERL3 au sein du même centre de médecine du sport et de réadaptation à l'effort (SPORMED). Les participants ne présentaient pas de différence au niveau des caractéristiques de la douleur alors que pour la seconde expérience, la population recrutée provenait également d'un second centre de réadaptation (Patis Fraux) spécialisé dans l'insertion professionnelle des personnes en situation de handicap. Ce groupe de participants présentait une différence significative avec le groupe PERL1 pour la majorité des caractéristiques de la douleur et présentait une différence significative avec PERL 1 et 3 au score du FABQ portant sur le travail. Ces observations mettent en avant que nos résultats ne sont pas à ce jour généralisables à l'ensemble de la population LCNS et que d'autres études sont encore à mener pour mettre en lien les facteurs biologiques, psychologiques, comportementaux et sociaux.

Plusieurs pistes peuvent être proposées pour généraliser nos résultats et seront présentées dans les prochaines sous-sections. La première porte sur l'évaluation de la lombalgie non spécifique dans d'autres phases de la maladie pour contrôler l'influence des facteurs

psycho-sociaux sur les stratégies perceptivo-motrices. La seconde porte sur les systèmes de classifications de la LCNS pour homogénéiser au sein d'un même groupe les facteurs d'influence de la chronicité de la douleur. La troisième porte sur la faisabilité de l'utilisation de tels paradigmes en pratique clinique pour l'évaluation des patients LCNS.

Perspectives

Les stratégies perceptivo-motrices sont-elles les mêmes pendant les poussées aiguës de lombalgie non spécifique que lors de la phase chronique ?

Alors que ce travail de thèse s'est focalisé sur la phase chronique de la lombalgie non-spécifique, l'évaluation des patients présentant une lombalgie non spécifique dans une autre phase d'évolution de la maladie (phase aiguë et sub-aiguë) n'a jamais été étudiée dans les paradigmes de locomotion en interaction avec l'environnement. C'est dans ce cadre qu'une collaboration a été mise en place, initiée par le Docteur Michael Cinelli, Professeur des universités à l'université de Waterloo (Canada). Ce projet a débuté en janvier 2023 et propose de comparer les résultats obtenus de PERL2 (partie III) avec des participants sans douleurs et des participants en phase aiguë ou en phase chronique de lombalgie non spécifique. Des données pilotes avec des participants sans douleurs ont été collectées en début d'année 2023 à Waterloo pour vérifier le paradigme et les procédures de collecte. La mise en place de la collecte des données a été effectuée à partir de juillet 2023 en France pour les participants présentant une LCNS et sont encore en cours : date prévue de la fin des inclusions en janvier 2024 (Partie III). Pour finir, la collecte des données est en cours pour l'échantillon de participants présentant une lombalgie non spécifique en phase aiguë à Waterloo. Pour contrôler les facteurs d'influence psychosociaux (facteurs psychologiques et facteurs liés au travail) pouvant provoquer une lombalgie en phase aiguë, le protocole s'intéresse à l'influence de la douleur induite dans la région lombaire sur les stratégies perceptivo-motrices chez des adultes en bonne santé, âgés entre 18 et 65 ans. Les mêmes échelles et questionnaires que ceux utilisés pour la population LCNS seront proposés aux participants présentant une lombalgie en phase aiguë. Ce projet pourra notamment nous permettre de répondre à l'objectif suivant : alors que la douleur en phase aiguë a une fonction d'alarme qui permet à l'organisme de réagir et de se protéger face aux stimuli nociceptifs qui menacent son intégrité [Treede *et al.*, 2019], l'une des hypothèses pourrait être que la douleur induite provoque également des stratégies décisionnelles différentes de celles d'individus sans douleur, dont les mécanismes sous-jacents seraient cependant différents de ceux retrouvés chez des participants LCNS. En effet, nous supposons que les stratégies décisionnelles diffèrent entre les participants présentant une lombalgie non-spécifique en phase aiguë et en phase chronique, ce qui peut en partie s'expliquer : 1) par

le niveau des scores des échelles et questionnaires portant sur les facteurs psychosociaux accompagnant la douleur chronique mais également 2) par les difficultés fonctionnelles que présentent les participants LCNS provoquant une recalibration de la perception qu'ils ont de leur environnement. De plus, alors que l'intensité de la douleur ressentie par les participants LCNS ne semble pas influencer les stratégies d'adaptation, nous supposons que celle-ci est corrélée à la décision de franchir une ouverture large plutôt qu'étroite chez les individus présentant une lombalgie en phase aiguë.

Classification des patients LCNS

Une des propositions pour diminuer l'effet de la forte hétérogénéité inter-individuelle des participants recrutés dans les études pourrait consister à regrouper la population LCNS en plusieurs sous-groupes plus homogènes [Hartvigsen *et al.*, 2018, Haskins *et al.*, 2015]. En ce sens, il serait possible de s'appuyer sur des modèles existants visant à prédire et orienter la prise en charge des patients selon leurs caractéristiques spécifiques [Van Dieën *et al.*, 2019].

Une part importante de la mise en place de tels protocoles dans l'évaluation et la prise en charge de ces patients est de répondre à un cahier des charges précis pour la mise en pratique clinique. Ainsi, Foster *et al.* [Foster *et al.*, 2013] proposent plusieurs recommandations pour mettre en place un système de classification de la lombalgie dans le cadre de l'évaluation et du suivi des patients : 1) le système de sous-groupes doit être plausible, c'est-à-dire être compatible avec les connaissances actuelles sur la pathologie et les facteurs de risque de la lombalgie ; 2) le sous-groupement doit être exclusif, c'est-à-dire que dans la majorité des cas les patients lombalgiques catégorisés n'entrent que dans un seul sous-groupe ; 3) l'approche doit être fiable dans la mesure où un patient donné doit pouvoir être classé de la même manière par plusieurs praticiens/expérimentateurs ; 4) le système de sous-groupes doit être utile sur le plan clinique dans la mesure où il facilite le processus de prise de décision clinique et l'évaluation des soins ; et 5) le système de sous-groupes doit être simple, afin de pouvoir fonctionner dans une pratique clinique chargée sans nécessiter d'examen supplémentaires complexes, d'investigations ou d'interprétation d'algorithmes compliqués.

Une des premières classifications a été proposée au début des années 2000, regroupant les patients LCNS en deux groupes [O'Sullivan, 2005]. Le premier sous-groupe est formé de patients dont l'origine du trouble douloureux provient d'une prédominance des facteurs psychologiques et/ou sociaux (anxiété pathologique, peur, colère, dépression, croyances négatives, problèmes émotionnels non résolus, évitement excessif de l'activité comme moyen de contrôler la douleur, circonstances sociales et interpersonnelles négatives), entraînant

des niveaux élevés d'invalidité, une altération du traitement central de la douleur, une amplification de la douleur non rémittente et des troubles du mouvement et du contrôle moteur [Bergström *et al.*, 2001, Linton, 2000, O'Sullivan, 2005]. Le second sous-groupe est formé de patients dont l'origine du trouble douloureux proviendrait directement d'un trouble du mouvement fonctionnel (perte ou une altération douloureuse des mouvements physiologiques normaux, actifs ou passifs dans une ou plusieurs directions) et/ou d'un trouble du contrôle moteur (altération ou déficit dans le contrôle du segment rachidien comme cause primaire de la douleur) qui aggrave la symptomatologie douloureuse de la LCNS [O'Sullivan, 2005]. Ce second sous-groupe est généralement associé aux facteurs psychologiques et sociaux, mais ils ne sont que secondaires aux altérations du comportement moteur [O'Sullivan, 2005]. Dans les mêmes années, d'autres classifications telles que le système "*treatment-based classification system for low back pain* (TBC) [Fritz *et al.*, 2007] propose quatre sous-groupes de la lombalgie nommés en fonction du traitement auquel le patient est le plus susceptible de répondre : manipulation, stabilisation, exercice spécifique et traction, ou la classification "*motor control impairment*" (MCI) [Sahrmann, 2001] qui propose cinq sous-groupes nommés d'après la ou les directions spécifiques du mouvement lombaire considérées comme contribuant aux symptômes du patient : flexion, extension, rotation, rotation avec flexion et rotation avec extension.

D'autres études ont proposé une classification des patients LCNS grâce aux méthodes de clustering portant par exemple sur des données catégorielles (échelles et questionnaires) [Yadollahpour *et al.*, 2020] et sur le mouvement [Robinault *et al.*, 2023]. Les études portant sur les données catégorielles ont donné lieu à la création de questionnaires comme le *STart Block Tools* qui porte sur la prédiction du risque de chronicité tout en répartissant les patients en sous-groupes : risque faible, modéré et élevé de chronicisation [Wippert *et al.*, 2017], ou le *back pain screening tool Risk-Prevention-Index Social* (RPI-S) qui s'intéresse au risque psychosocial individuel de chronicisation en prenant en compte l'affectation des patients à des traitements multidisciplinaires supplémentaires [Wippert *et al.*, 2020]. Une récente étude portant sur l'analyse du mouvement des patients s'est intéressée spécifiquement aux variables liées au mouvement dans six tâches : extension du dos, flexion du dos, flexion latérale du tronc à droite, flexion latérale du tronc à gauche, rotation du tronc à droite et rotation du tronc à gauche, à deux vitesses différentes (maximale et de confort) [Robinault *et al.*, 2023]. L'analyse des données électromyographiques de la région lombaire et de la capture du mouvement ont montré une grande précision dans la catégorisation des individus présentant ou non une LCNS pour le modèle anthropométrique (l'âge, l'IMC, la taille, la masse et le sexe), le modèle biomécanique (par exemple l'amplitude maximale, le temps pour effectuer une amplitude maximale, la variabilité intra et inter-sujet, etc.), le modèle neuromusculaire (activité musculaire), le modèle d'équilibre (aire du déplacement du centre de pression, vitesse de déplacement, etc.) et le modèle

complet (contenant toutes les variables) [Robinault *et al.*, 2023]. L'analyse factorielle a révélé que les individus atteints de LCNS présentaient des schémas de mouvement différents de ceux des individus en bonne santé, caractérisés par des mouvements plus lents et plus rigides [Robinault *et al.*, 2023].

Cependant, une considération importante est que ces domaines ne sont pas indépendants les uns des autres et les systèmes de classification actuels semblent restrictifs, ne prenant pas en compte l'association entre les facteurs psychosociaux et les difficultés fonctionnelles mesurées par l'analyse cinétique et cinématique de ces patients. Ainsi, pour être complets, les systèmes de classifications en sous-groupes de la LCNS nécessiteraient une évaluation des patients dans de multiples dimensions biologiques, psychologiques et sociales. C'est dans cette perspective que le prolongement de ces travaux de thèse dans des études incluant un plus grand nombre de participants et dont l'objectif principal porterait spécifiquement sur la stratification des caractéristiques des patients lombalgiques (psychologiques et sociaux) en fonction des adaptations motrices nous semble pertinent [Ménard *et al.*, 2022, Moissenet *et al.*, 2023]. Un profilage individuel complet des patients LCNS ou des sous-groupes pourrait notamment permettre d'investiguer les conséquences des variables psychosociales sur les activités quotidiennes des patients et d'aider au pronostic et au suivi dans la prise en charge clinique.

Mise en place des paradigmes de locomotion en interaction avec l'environnement comme moyen d'évaluation de la LCNS dans la prise en charge clinique

Malgré un intérêt certain pour l'étude des stratégies perceptivo-motrices, les paradigmes utilisés dans cette thèse présentent des limites quant à leur transfert direct pour des évaluations cliniques de routine. En effet, des considérations matérielles et humaines sont essentielles à discuter. Pour mettre en place ces protocoles, nous avons eu besoin d'un espace très grand autorisant des déplacements sur au moins 14 m et nous avons enregistré le mouvement de chaque participant grâce au système optoélectronique Qualisys composé de 23 caméras synchronisées. De plus, l'environnement demandait la participation de trois expérimentateurs pour la première étude, quatre pour la seconde et cinq pour la troisième. La troisième étude nécessitait également la présence de 4 à 6 participants au même moment sur le lieu d'étude. Enfin, comme présenté dans la section 4, l'utilisation de tels paradigmes en situation réelle ne permet pas de contrôler tous les facteurs situationnels et individuels.

C'est dans ce cadre que de futurs travaux sont envisagés pour étudier l'effet de la LCNS sur les stratégies d'action en portant ces protocoles en réalité virtuelle (RV). Cette

dernière a été définie par Arnaldi et al. comme " *un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des dispositifs d'interaction en vue de simuler, dans un environnement virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori moteurs*" [Arnaldi et al., 2003]. Cela signifie qu'elle permet de solliciter les mécanismes perceptivo-moteurs des participants, tout en présentant l'avantage de contrôler l'intégralité des caractéristiques de l'environnement virtuel avec lequel l'individu interagit. Il faut noter que plusieurs études se sont penchées sur l'évaluation des comportements en RV dans des situations d'interaction avec un autre piéton et ont pu montrer que de manière qualitative les comportements à la fois locomoteurs [Sanz et al., 2015, Olivier et al., 2017, Bühler et Lamontagne, 2018] mais aussi du regard [Berton et al., 2019] étaient préservés en RV en comparaison avec des situations réelles même si quelques différences quantitatives sont observées, comme par exemple une diminution de la vitesse de marche et une augmentation des distances interpersonnelles. Ainsi, en lien avec les paradigmes étudiés dans cette thèse, la RV a déjà été utilisée pour l'étude des stratégies perceptivo-motrices dans des tâches de locomotion dans un environnement statique de passage à travers des ouvertures [Snyder et Cinelli, 2022, Bourgaize et al., 2019, Snyder et Cinelli, 2020] faisant également intervenir des facteurs sociaux [Hackney et al., 2020, Taylor et Cinelli, 2021] et de croisement de piéton [Berton et al., 2019, Fiset et al., 2020].

Concernant le paradigme de passage à travers des ouvertures, la RV a permis par exemple de modifier la durée d'observation de l'ouverture avant de la traverser et a montré que cela affectait la perception de sa praticabilité [Bourgaize et al., 2019]. Une seconde étude a modifié les entrées somatosensorielles et vestibulaires lors du franchissement et montre que ces facteurs influencent le seuil à partir duquel les participants modifient leurs stratégies de mouvement [Snyder et Cinelli, 2020]. Dans le cas du paradigme de passage à travers des ouvertures faisant varier des facteurs sociaux, la RV permet par exemple de standardiser l'emplacement et les caractéristiques d'un humain virtuel [Mousas et al., 2021] ou son déplacement [Taylor et Cinelli, 2021]. Pour finir, concernant le paradigme d'évitement de piétons, la RV a permis d'étudier le comportement du regard dans de multiples situations [Berton et al., 2019] et de manipuler la nature de l'information visuelle (stimuli globaux ou locaux) [Lynch et al., 2018]. Ainsi, ces manipulations aisées dans un environnement virtuel permettent d'élargir les possibilités de recherche dans des paradigmes qui se veulent de plus en plus écologiques.

La RV en plus d'être prometteuse pour l'évaluation des patients LCNS dans de tels paradigmes de marche en laboratoire semble pouvoir être utilisée pour le suivi des patients. En effet, au cours de la dernière décennie, l'utilisation de la RV dans le cadre

de la prise en charge de la lombalgie augmente à un rythme croissant [Bordeleau *et al.*, 2022]. La RV peut être utilisée pour moduler la douleur en détournant l'attention du patient des signaux nociceptifs, en sollicitant la mémoire de travail, en induisant l'illusion d'être propriétaire d'un corps virtuel (manipulation de la perception du corps) et en renforçant la motivation et l'engagement dans des activités comportementales ou des stratégies de mouvement spécifiques grâce à l'utilisation de jeux (défis progressifs, réalisation d'objectifs et récompenses) [Bordeleau *et al.*, 2022]. Une récente revue systématique et méta-analyse a notamment montré la capacité de la RV à diminuer l'intensité des douleurs dorsales et les incapacités fonctionnelles [Bordeleau *et al.*, 2022]. La RV a été utilisée majoritairement pour réduire la peur du mouvement par le biais de tâches de performance motrice (atteindre un objet, se pencher, porter un objet, exercices de stabilisation du tronc, inclinaisons pelviennes), en incorporant un retour sensoriel (retour visuel, acoustique, haptique et moteur) [Bordeleau *et al.*, 2022]. D'autres interventions avec de faibles niveaux d'immersion visaient à faciliter les thérapies conventionnelles en permettant au patient d'effectuer les exercices chez lui et d'être suivi à distance par le clinicien [Bordeleau *et al.*, 2022]. Comme pour les études précédentes, les outils d'évaluation les plus utilisés portaient sur des échelles, des questionnaires, l'amplitude du mouvement et l'activité musculaire [Bordeleau *et al.*, 2022]. Ainsi, au vu de ces constatations, la proposition d'utiliser la RV comme outil d'évaluation de la prise en charge de la LCNS semble d'actualité. Une réplification des paradigmes utilisés dans cette thèse en RV semble être une des perspectives clés pour transférer ces évaluations en laboratoire à des évaluations cliniques.

Ces éléments nous semblent également être des perspectives intéressantes pour évaluer l'impact des thérapies manuelles sur la prise en charge des patients LCNS. En effet, les organismes comme la NPIS ("*non-pharmacological intervention society*"), la fondation COME ("*center of osteopathic medicine*"), le NCOR ("*national council for osteopathic research*") et la IFOMPT ("*international federation of orthopaedic manipulative physical therapists*") mettent en avant l'importance de mener des recherches dans les thérapies non-interventionnelles (INM) pour contribuer au développement d'une démarche scientifique en favorisant la normalisation des INM pour la santé et permettre de promouvoir leur implantation dans les parcours individuels de soins tout en constituant un espace de réflexion sur leur développement¹.

1. <https://npisociety.org/>

Conclusion

L'originalité de ce travail de thèse repose sur la collaboration entre plusieurs champs disciplinaires portant sur les sciences du mouvement, la recherche clinique en thérapie manuelle et les sciences cognitives proposant de mettre en œuvre de nouvelles approches d'évaluation des effets de la douleur chronique. Nous nous sommes intéressés spécifiquement à la LCNS, qui est la principale cause d'invalidité dans le monde [Vos *et al.*, 2015] et qui se caractérise par *une douleur qui constitue la plainte principale [...] et qui provoque une détresse émotionnelle significative ou une incapacité fonctionnelle* [Treede *et al.*, 2019]. Les mécanismes de la chronicisation et de la persistance de la LCNS sont encore discutés dans la littérature : les résultats actuels montrent une influence des facteurs biologiques [Roussel *et al.*, 2014, Tsay *et al.*, 2015], des facteurs émotionnels [Pinheiro *et al.*, 2015, Pinheiro *et al.*, 2016], des facteurs cognitifs [Pereira Nery *et al.*, 2023], des facteurs comportementaux [Macías-Toronjo *et al.*, 2020] et des facteurs sociaux [Husky *et al.*, 2018]. Actuellement, sa prise en charge s'appuie sur le modèle biopsychosocial [Engel, 1977] et les recommandations nationales et internationales préconisent une prise en charge multidisciplinaire s'appuyant en première intention sur l'activité physique [Nicol *et al.*, 2023, HAS, 2019, WHO, 2023]. De nombreux paramètres et outils de mesure sont utilisés pour évaluer la prise en charge et l'évolution dans le temps de la symptomatologie douloureuse [HAS, 2019]. La plupart de ces outils de mesure sont des échelles et questionnaires auto-administrés portant sur les facteurs psychosociaux et fonctionnels accompagnant la douleur [Chiarotto *et al.*, 2018a, Chiarotto *et al.*, 2016a, Abbasi *et al.*, 2018]. D'autres mesures permettant d'évaluer les capacités fonctionnelles des patients sont basées sur des tests observant l'amplitude articulaire ou l'endurance musculaire [Chiarotto *et al.*, 2018a]. Cependant, bien que présentant un intérêt majeur, ces paramètres ne permettent pas d'avoir une vision complète des patients LCNS, notamment sur leurs capacités de mouvements nécessaires à la vie quotidienne.

L'objectif principal de cette thèse a donc été d'utiliser certains paradigmes de locomotion, incluant la dimension dite écologique, afin de proposer de nouvelles méthodologies pour étudier l'influence de la LCNS. Ce projet est basé sur une approche prenant en compte les capacités perceptivo-motrices des patients et évalue l'influence des caractéristiques de cette population sur les stratégies décisionnelles et d'adaptation du mouvement. Pour répondre à notre objectif, nous avons mené trois études prospectives par échantillonnage comparant un groupe d'adultes asymptomatiques (AA, contrôles) à un groupe de participants présentant une LCNS, appariés selon l'âge pour les deux premières études et l'âge et le genre pour la troisième étude. Ces études comprenaient deux phases d'évaluation, une première portant sur des échelles et des questionnaires liés aux facteurs biopsychosociaux accompagnant la douleur et une seconde phase destinée à la tâche locomotrice en interaction avec un environnement.

La première étude s'intéressait aux stratégies perceptivo-motrices des patients LCNS dans une tâche de locomotion en interaction avec un environnement statique de passage à travers différentes largeurs d'ouvertures. Les résultats ont mis en avant que les participants LCNS utilisent des stratégies décisionnelles plus prudentes avec un seuil critique plus bas que les participants sans douleur, i.e. les participants ont arrêté de tourner les épaules pour des largeurs d'ouvertures plus étroites que les participants sans douleur. En outre, ces participants ont marché plus lentement quelle que soit la largeur de l'ouverture à franchir. Cependant, ni les variables cinématiques (oscillation du tronc, rotation des épaules), ni les facteurs psychologiques et comportementaux accompagnant la douleur n'étaient associés à la valeur de seuil critique observée.

La deuxième étude a exploré les stratégies perceptivo-motrices des patients LCNS dans une tâche de locomotion en interaction avec un environnement statique de passage à travers des ouvertures faisant varier des facteurs situationnels (choix entre deux largeurs d'ouvertures : étroite et large) et sociaux (influence d'un expérimentateur sur la trajectoire). Les résultats ont montré que les participants LCNS semblent utiliser des stratégies plus orientées sur la situation, i.e. la largeur de l'ouverture à franchir, que sur les facteurs sociaux, i.e. passer devant ou derrière un individu. Ainsi, les participants ont présenté pour l'ensemble des conditions un décalage du seuil plus important que dans la condition contrôle, i.e. ils ont préféré franchir l'ouverture large plutôt que l'ouverture étroite quelle que soit la position du but à atteindre. Ainsi, les participants LCNS semblent opter pour une stratégie moins risquée qu'efficace et empruntent un chemin plus long pour atteindre l'objectif. Cependant, nous avons également observé que lors du franchissement des ouvertures larges les participants LCNS présentaient une zone de dégagement plus importante que les participants sans douleur. Nous supposons ainsi que même si la stratégie décisionnelle est orientée vers la situation, les participants LCNS utilisent des stratégies plus prudentes dans un environnement faisant intervenir des facteurs sociaux que les participants AA.

La troisième étude s'est concentrée sur les stratégies perceptivo-motrices des patients LCNS dans une tâche de locomotion en interaction avec un environnement dynamique de croisement de piétons. Les résultats ont montré que les participants LCNS perçoivent bien les conditions de l'environnement. En effet, le seuil d'adaptation au mouvement et la distance interpersonnelle au moment du croisement sont similaires entre les différents groupes d'interaction. Cependant, les stratégies d'adaptation semblent différer avec les participants AA : elles sont caractérisées par un nombre d'inversions de l'ordre de passage plus important dans le groupe faisant intervenir deux participants LCNS et par une contribution à l'évitement de collision plus importante quand les participants LCNS passent seconds et moins importante quand ils passent premiers.

En conclusion, la LCNS semble affecter les décisions des participants dans des tâches faisant intervenir des modifications du contexte situationnel dans un environnement statique et semble influencer les stratégies d'adaptation dans des tâches faisant intervenir des modifications du contexte social dans des environnements statiques ou dynamiques.

Cependant, nos résultats ne mettent pas en évidence une association claire entre les facteurs biopsychosociaux accompagnant la douleur et les stratégies perceptivo-motrices en terme de choix de mode d'action et de stratégie d'adaptation du mouvement, malgré des différences observées entre les participants LCNS et AA. Une des réponses pour expliquer ces résultats porte sur la forte hétérogénéité entre les participants LCNS. En effet, il apparaît dans la littérature que la chronicisation et la persistance de la douleur pourraient être expliquées par différents modèles. Ainsi, l'une des perspectives envisagées serait de porter ces protocoles en incluant un nombre plus important de participants pour proposer un système de classification en sous-groupes de la LCNS prenant en compte les facteurs psychosociaux et les difficultés fonctionnelles mesurées par l'analyse cinétique et cinématique de ces patients. Un tel protocole de recherche permettrait un profilage individuel complet des patients LCNS pour investiguer les conséquences des variables psychosociales sur les activités quotidiennes des patients.

L'utilisation de ces paradigmes pour mesurer l'effet de la LCNS semble prometteuse, car ils répondent aux recommandations de travaux antérieurs intégrant les plaintes des patients et leur capacité à effectuer des activités physiques quotidiennes, de leurs besoins de base jusqu'à des activités plus complexes. Cependant, malgré un intérêt certain pour l'étude des stratégies perceptivo-motrices, les paradigmes utilisés dans cette thèse présentent des limites matérielles et humaines quant à leur transfert direct pour des évaluations cliniques de routine (espace, traitement de données et expérimentateur). C'est dans ce cadre que de futurs travaux sont envisagés pour étudier l'effet de la LCNS sur les stratégies d'action en portant ces protocoles en réalité virtuelle. Cette dernière a déjà été utilisée dans des paradigmes permettant d'évaluer les stratégies perceptivo-motrices chez des adultes en bonne santé mais également des populations spécifiques (personnes âgées, enfants, personnes ayant eu un AVC) dans différents environnements faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux. De plus, elle permet de contrôler des éléments de l'environnement et ainsi de standardiser la passation des protocoles. Pour finir, la réalité virtuelle nous semble être une perspective intéressante pour évaluer l'impact des thérapies manuelles sur la prise en charge des patients LCNS.

Les résultats portant sur ces travaux ont donné lieu aux contributions suivantes :

Articles dans des revues internationales à comité de lecture :

Bilhaut, A., Ménard, M., Roze, O., Crétual, A., & Olivier, A. H. (2023). Locomotion behavior of chronic Non-Specific Low Back Pain (cNSLBP) participants while walking through apertures. *Gait & Posture*.

Bilhaut, A., Ménard, M., Draper-Rodi, J., Roze, O., Crétual, A., & Olivier, A. H. (submitted). Assessing the effects of manual therapy on pain in patients living with Persistent Non-Specific Low Back Pain (PNSLBP) : Which evaluation criteria and measurement tools used in randomised controlled clinical trials? A systematic review. *International Journal of Osteopathic Medicine*.

Congrès :

Communication orale :

Bilhaut, A., Ménard, M., Roze, O., Crétual, A., & Olivier, A. H. (2022). Etude du paradigme de passage à travers une ouverture horizontale dans une population présentant une lombalgie chronique commune. In *Société Francophone Posture Équilibre et Locomotion*, Marseille, France, Décembre 2022.

Bilhaut, A., Ménard, M., Roze, O., Crétual, A., & Olivier, A. H. (2023). Marcher à travers des ouvertures horizontales : Quelles stratégies motrices pour les patients souffrant de lombalgie chronique non spécifique?. In *Journée Francophone de Kinésithérapie*, Rennes, France, Avril 2023.

Bilhaut, A., Ménard, M., Carson-Jouzel, P., Roze, O., Crétual, A., & Olivier, A. H. (2023). Etude des stratégies perceptivo-motrices des patients lombalgiques chroniques lors de la locomotion dans des environnements complexes : vers de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi. In *Société Française Étude et de Traitement de la Douleur*, Saint-Malo, France, Novembre 2023.

Poster :

Bilhaut, A., Crétual, A., Ménard, M., & Olivier, A. H. (2022). Locomotion behavior of chronic non-specific low back pain (cNSLBP) patient while walking through apertures. In *ISPGR 2022- Congress of the International Society of Posture & Gait Research*, Montréal, Canada, Juillet 2021.

BIBLIOGRAPHIE

- [Abbasi *et al.*, 2018] ABBASI, S., ROJHANI-SHIRAZI, Z., SHOKRI, E. et SAN JOSÉ, F. G.-M. (2018). The effect of kinesio taping on postural control in subjects with non-specific chronic low back pain. *Journal of bodywork and movement therapies*, 22(2):487–492.
- [Agnus Tom *et al.*, 2022] AGNUS TOM, A., RAJKUMAR, E., JOHN, R. et JOSHUA GEORGE, A. (2022). Determinants of quality of life in individuals with chronic low back pain : a systematic review. *Health Psychology and Behavioral Medicine*, 10(1):124–144.
- [Ahmed *et al.*, 2021] AHMED, U. A., MAHARAJ, S. S. et VAN OOSTERWIJCK, J. (2021). Effects of dynamic stabilization exercises and muscle energy technique on selected biopsychosocial outcomes for patients with chronic non-specific low back pain : a double-blind randomized controlled trial. *Scandinavian journal of pain*, 21(3):495–511.
- [Al-Yahya *et al.*, 2011] AL-YAHYA, E., DAWES, H., SMITH, L., DENNIS, A., HOWELLS, K. et COCKBURN, J. (2011). Cognitive motor interference while walking : a systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(3):715–728.
- [Alvarez *et al.*, 2020] ALVAREZ, G., VAN BIESEN, T. et ROURA, S. (2020). Professional identity in the evolution of osteopathic models : Response to esteves et al. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 36:58–59.
- [Apkarian *et al.*, 2011] APKARIAN, A. V., HASHMI, J. A. et BALIKI, M. N. (2011). Pain and the brain : specificity and plasticity of the brain in clinical chronic pain. *Pain*, 152(3):S49–S64.
- [Apkarian *et al.*, 2004] APKARIAN, A. V., SOSA, Y., KRAUSS, B. R., THOMAS, P. S., FREDRICKSON, B. E., LEVY, R. E., HARDEN, R. N. et CHIALVO, D. R. (2004). Chronic pain patients are impaired on an emotional decision-making task. *Pain*, 108(1-2):129–136.
- [Aravind et Lamontagne, 2014] ARAVIND, G. et LAMONTAGNE, A. (2014). Perceptual and locomotor factors affect obstacle avoidance in persons with visuospatial neglect. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1):1–10.
- [Arguisuelas *et al.*, 2017] ARGUISUELAS, M. D., LISÓN, J. F., SÁNCHEZ-ZURIAGA, D., MARTÍNEZ-HURTADO, I. et DOMÉNECH-FERNÁNDEZ, J. (2017). Effects of myofascial release in nonspecific chronic low back pain : a randomized clinical trial.
- [Arguisuelas Martínez *et al.*, 2019] ARGUISUELAS MARTÍNEZ, M. D., LISÓN PÁRRAGA, J. F., DOMÉNECH FERNÁNDEZ, J., MARTÍNEZ HURTADO, I., SALVADOR COLOMA,

-
- P., SÁNCHEZ ZURIAGA, D. *et al.* (2019). Effects of myofascial release in erector spinae myoelectric activity and lumbar spine kinematics in non-specific chronic low back pain : randomized controlled trial. *Clinical Biomechanics*, vol. 63 (mar. 2019).
- [Arnaldi *et al.*, 2003] ARNALDI, B., FUCHS, P. et TISSEAU, J. (2003). Traité de la réalité virtuelle. *Les presses de l'école des Mines de Paris*, 8.
- [Arshad *et al.*, 2019] ARSHAD, R., PAN, F., REITMAIER, S. et SCHMIDT, H. (2019). Effect of age and sex on lumbar lordosis and the range of motion. a systematic review and meta-analysis. *Journal of biomechanics*, 82:1–19.
- [Atkinson *et al.*, 1991] ATKINSON, J. H., SLATER, M. A., PATTERSON, T. L., GRANT, I. et GARFIN, S. R. (1991). Prevalence, onset, and risk of psychiatric disorders in men with chronic low back pain : a controlled study. *Pain*, 45(2):111–121.
- [Auger *et al.*, 2021] AUGER, K., SHEDLOCK, G., COUTINHO, K., MYERS, N. E. et LORENZO, S. (2021). Effects of osteopathic manipulative treatment and bio-electromagnetic energy regulation therapy on lower back pain. *Journal of Osteopathic Medicine*, 121(6):561–569.
- [Baddeley, 2020] BADDELEY, A. (2020). Working memory. *In Memory*, pages 71–111. Routledge.
- [Baddeley et Logie, 1999] BADDELEY, A. D. et LOGIE, R. H. (1999). Working memory : The multiple-component model.
- [Bagagiolo *et al.*, 2022] BAGAGIOLO, D., ROSA, D. et BORRELLI, F. (2022). Efficacy and safety of osteopathic manipulative treatment : an overview of systematic reviews. *BMJ open*, 12(4):e053468.
- [Baker et Cinelli, 2014] BAKER, C. S. et CINELLI, M. E. (2014). Visuomotor deficits during locomotion in previously concussed athletes 30 or more days following return to play. *Physiological reports*, 2(12):e12252.
- [Baliki et Apkarian, 2015] BALIKI, M. N. et APKARIAN, A. V. (2015). Nociception, pain, negative moods, and behavior selection. *Neuron*, 87(3):474–491.
- [Baliki *et al.*, 2006] BALIKI, M. N., CHIALVO, D. R., GEHA, P. Y., LEVY, R. M., HARDEN, R. N., PARRISH, T. B. et APKARIAN, A. V. (2006). Chronic pain and the emotional brain : specific brain activity associated with spontaneous fluctuations of intensity of chronic back pain. *Journal of Neuroscience*, 26(47):12165–12173.
- [Balthazard *et al.*, 2012] BALTHAZARD, P., de GOUMOENS, P., RIVIER, G., DEMEULENAERE, P., BALLABENI, P. et DÉRIAZ, O. (2012). Manual therapy followed by specific active exercises versus a placebo followed by specific active exercises on the improvement of functional disability in patients with chronic non specific low back pain : a randomized controlled trial. *BMC musculoskeletal disorders*, 13(1):1–11.

-
- [Bandura, 1977] BANDURA, A. (1977). Self-efficacy : toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological review*, 84(2):191.
- [Barke *et al.*, 2015] BARKE, A., RIECKE, J., RIEF, W. et GLOMBIEWSKI, J. A. (2015). The psychological inflexibility in pain scale (pips)–validation, factor structure and comparison to the chronic pain acceptance questionnaire (cpaq) and other validated measures in german chronic back pain patients. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 16(1):1–10.
- [Baurès *et al.*, 2018] BAURÈS, R., MAQUESTIAUX, F., DELUCIA, P. R., DEFER, A. et PRIGENT, E. (2018). Availability of attention affects time-to-contact estimation. *Experimental Brain Research*, 236:1971–1984.
- [Bechara *et al.*, 1994] BECHARA, A., DAMASIO, A. R., DAMASIO, H. et ANDERSON, S. W. (1994). Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, 50(1-3):7–15.
- [Beck *et al.*, 1987] BECK, A. T., STEER, R. A., BROWN, G. K. *et al.* (1987). *Beck depression inventory*. Harcourt Brace Jovanovich New York :.
- [Bener *et al.*, 2013] BENER, A., VERJEE, M., DAFEEAH, E. E., FALAH, O., AL-JUHAISHI, T., SCHLOGL, J., SEDEEQ, A. et KHAN, S. (2013). Psychological factors : anxiety, depression, and somatization symptoms in low back pain patients. *Journal of pain research*, pages 95–101.
- [Benton *et al.*, 1994] BENTON, A., HAMSHER, K. et SIVAN, A. (1994). Multilingual aphasia examination : Manual of instructions. iowa city, ia : Aja associates. *Inc.[Google Scholar]*.
- [Bergström *et al.*, 2001] BERGSTRÖM, G., BODIN, L., JENSEN, I. B., LINTON, S. J. et NYGREN, Å. L. (2001). Long-term, non-specific spinal pain : reliable and valid subgroups of patients. *Behaviour research and therapy*, 39(1):75–87.
- [Berquin *et al.*, 2010] BERQUIN, A. *et al.* (2010). Le modèle biopsychosocial : beaucoup plus qu’un supplément d’empathie. *Médecine du sport*, 258(28):1511–1513.
- [Berryman *et al.*, 2013] BERRYMAN, C., STANTON, T. R., BOWERING, K. J., TABOR, A., MCFARLANE, A. et MOSELEY, G. L. (2013). Evidence for working memory deficits in chronic pain : a systematic review and meta-analysis. *Pain®*, 154(8):1181–1196.
- [Berryman *et al.*, 2014] BERRYMAN, C., STANTON, T. R., BOWERING, K. J., TABOR, A., MCFARLANE, A. et MOSELEY, G. L. (2014). Do people with chronic pain have impaired executive function? a meta-analytical review. *Clinical psychology review*, 34(7):563–579.
- [Berton *et al.*, 2019] BERTON, F., OLIVIER, A.-H., BRUNEAU, J., HOYET, L. et PETTRÉ, J. (2019). Studying gaze behaviour during collision avoidance with a virtual walker : Influence of the virtual reality setup. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 717–725. IEEE.

-
- [Bicalho *et al.*, 2010] BICALHO, E., SETTI, J. A. P., MACAGNAN, J., CANO, J. L. R. et MANFRA, E. F. (2010). Immediate effects of a high-velocity spine manipulation in paraspinal muscles activity of nonspecific chronic low-back pain subjects. *Manual therapy*, 15(5):469–475.
- [Bilhaut *et al.*, 2023] BILHAUT, A., MÉNARD, M., ROZE, O., CRÉTUAL, A. et OLIVIER, A.-H. (2023). Locomotion behavior of chronic non-specific low back pain (cnslbp) participants while walking through apertures. *Gait & Posture*.
- [Boff *et al.*, 2020] BOFF, T. A., PASINATO, F., BEN, Â. J., BOSMANS, J. E., van TULDER, M. et CARREGARO, R. L. (2020). Effectiveness of spinal manipulation and myofascial release compared with spinal manipulation alone on health-related outcomes in individuals with non-specific low back pain : randomized controlled trial. *Physiotherapy*, 107:71–80.
- [Bordeleau *et al.*, 2022] BORDELEAU, M., STAMENKOVIC, A., TARDIF, P.-A. et THOMAS, J. (2022). The use of virtual reality in back pain rehabilitation : a systematic review and meta-analysis. *The Journal of Pain*, 23(2):175–195.
- [Bourgaize *et al.*, 2019] BOURGAIZE, S., LACASSE, M., TAYLOR, E. et CINELLI, M. (2019). Differences in perceptions of aperture crossing during a virtual reality choice reaction task according to the temporality of visual stimuli. *Journal of Exercise, Movement, and Sport (SCAPPS refereed abstracts repository)*, 51(1).
- [Bourgaize *et al.*, 2021] BOURGAIZE, S. M., MCFADYEN, B. J. et CINELLI, M. E. (2021). Collision avoidance behaviours when circumventing people of different sizes in various positions and locations. *Journal of Motor Behavior*, 53(2):166–175.
- [Branchini *et al.*, 2015] BRANCHINI, M., LOPOPOLO, F., ANDREOLI, E., LORETI, I., MARCHAND, A. M. et STECCO, A. (2015). Fascial manipulation® for chronic aspecific low back pain : a single blinded randomized controlled trial. *F1000Research*, 4.
- [Brandt, 1991] BRANDT, J. (1991). The hopkins verbal learning test : Development of a new memory test with six equivalent forms. *The clinical neuropsychologist*, 5(2):125–142.
- [Breivik *et al.*, 2006] BREIVIK, H., COLLETT, B., VENTAFRIDDA, V., COHEN, R. et GALACHER, D. (2006). Survey of chronic pain in europe : prevalence, impact on daily life, and treatment. *European journal of pain*, 10(4):287–333.
- [Brevers *et al.*, 2013] BREVERS, D., BECHARA, A., CLEEREMANS, A. et NOËL, X. (2013). Iowa gambling task (igt) : twenty years after–gambling disorder and igt. *Frontiers in psychology*, 4:665.
- [Bronfort *et al.*, 2008] BRONFORT, G., HAAS, M., EVANS, R., KAWCHUK, G. et DAGE-NAIS, S. (2008). Evidence-informed management of chronic low back pain with spinal manipulation and mobilization. *The Spine Journal*, 8(1):213–225.

-
- [Brosseau *et al.*, 2015] BROSSEAU, L., LAROCHE, C., SUTTON, A., GUITARD, P., KING, J., POITRAS, S., CASIMIRO, L., TREMBLAY, M., CARDINAL, D., CAVALLO, S. *et al.* (2015). Une version franco-canadienne de la physiotherapy evidence database (pedro) scale : L'échelle pedro. *Physiotherapy Canada*, 67(3):232–239.
- [Brumagne *et al.*, 2008] BRUMAGNE, S., JANSSENS, L., JANSSENS, E. et GODDYN, L. (2008). Altered postural control in anticipation of postural instability in persons with recurrent low back pain. *Gait & posture*, 28(4):657–662.
- [Bühler et Lamontagne, 2018] BÜHLER, M. A. et LAMONTAGNE, A. (2018). Circumvention of pedestrians while walking in virtual and physical environments. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 26(9):1813–1822.
- [Burke *et al.*, 2017] BURKE, D., LINDER, S., HIRSCH, J., DEY, T., KANA, D., RINGENBACH, S., SCHINDLER, D. et ALBERTS, J. (2017). Characterizing information processing with a mobile device : measurement of simple and choice reaction time. *Assessment*, 24(7):885–895.
- [Calvino et Grilo, 2006] CALVINO, B. et GRILO, R. M. (2006). Central pain control. *Joint Bone Spine*, 73(1):10–16.
- [Caneiro *et al.*, 2020] CANEIRO, J., ROOS, E. M., BARTON, C. J., O'SULLIVAN, K., KENT, P., LIN, I., CHOONG, P., CROSSLEY, K. M., HARTVIGSEN, J., SMITH, A. J. *et al.* (2020). It is time to move beyond 'body region silos' to manage musculoskeletal pain : five actions to change clinical practice.
- [Castro-Sanchez *et al.*, 2016] CASTRO-SANCHEZ, A. M., LARA-PALOMO, I. C., MATARAN-PENARROCHA, G. A., SAAVEDRA-HERNÁNDEZ, M., PÉREZ-MÁRMOL, J. M. et AGUILAR-FERRÁNDIZ, M. E. (2016). Benefits of craniosacral therapy in patients with chronic low back pain : a randomized controlled trial. *The journal of alternative and complementary medicine*, 22(8):650–657.
- [Cedraschi *et al.*, 2009] CEDRASCHI, C., PIGUET, V. r., LUTHY, C., RENTSCH, D., DESMEULES, J. et ALLAZ, A.-F. o. (2009). Aspects psychologiques de la douleur chronique. *Revue du rhumatisme*, 76(6):587–592.
- [Celenay *et al.*, 2019] CELENAY, S. T., KAYA, D. O. et UCURUM, S. G. (2019). Adding connective tissue manipulation to physiotherapy for chronic low back pain improves pain, mobility, and well-being : a randomized controlled trial. *Journal of exercise rehabilitation*, 15(2):308.
- [Chaory *et al.*, 2004] CHAORY, K., RANNOU, F., FERMANIAN, J., GENTY, M., ROSENBERG, S., BILLABERT, C., KEMOUN, G., RICHARD, I., THEVENON, A., COUDEYRE, L. *et al.* (2004). Impact de programmes de restauration fonctionnelle sur les peurs, croyances et conduites d'évitement du lombalgique chronique. In *Annales de réadaptation et de médecine physique*, volume 47, pages 93–97. Elsevier.

-
- [Chapman *et al.*, 2011] CHAPMAN, J. R., NORVELL, D. C., HERMSMEYER, J. T., BRANSFORD, R. J., DEVINE, J., MCGIRT, M. J. et LEE, M. J. (2011). Evaluating common outcomes for measuring treatment success for chronic low back pain. *Spine*, 36:S54–S68.
- [Chiarotto *et al.*, 2018a] CHIAROTTO, A., BOERS, M., DEYO, R. A., BUCHBINDER, R., CORBIN, T. P., COSTA, L. O., FOSTER, N. E., GROTTLE, M., KOES, B. W., KOVACS, F. M. *et al.* (2018a). Core outcome measurement instruments for clinical trials in nonspecific low back pain. *Pain*, 159(3):481.
- [Chiarotto *et al.*, 2015] CHIAROTTO, A., DEYO, R. A., TERWEE, C. B., BOERS, M., BUCHBINDER, R., CORBIN, T. P., COSTA, L. O., FOSTER, N. E., GROTTLE, M., KOES, B. W. *et al.* (2015). Core outcome domains for clinical trials in non-specific low back pain. *European Spine Journal*, 24:1127–1142.
- [Chiarotto et Koes, 2022] CHIAROTTO, A. et KOES, B. W. (2022). Nonspecific low back pain. *New England Journal of Medicine*, 386(18):1732–1740.
- [Chiarotto *et al.*, 2019] CHIAROTTO, A., MAXWELL, L. J., OSTELO, R. W., BOERS, M., TUGWELL, P. et TERWEE, C. B. (2019). Measurement properties of visual analogue scale, numeric rating scale, and pain severity subscale of the brief pain inventory in patients with low back pain : a systematic review. *The journal of pain*, 20(3):245–263.
- [Chiarotto *et al.*, 2016a] CHIAROTTO, A., MAXWELL, L. J., TERWEE, C. B., WELLS, G. A., TUGWELL, P. et OSTELO, R. W. (2016a). Roland-morris disability questionnaire and Oswestry disability index : which has better measurement properties for measuring physical functioning in nonspecific low back pain ? systematic review and meta-analysis. *Physical therapy*, 96(10):1620–1637.
- [Chiarotto *et al.*, 2018b] CHIAROTTO, A., OSTELO, R. W., BOERS, M. et TERWEE, C. B. (2018b). A systematic review highlights the need to investigate the content validity of patient-reported outcome measures for physical functioning in patients with low back pain. *Journal of Clinical Epidemiology*, 95:73–93.
- [Chiarotto *et al.*, 2016b] CHIAROTTO, A., TERWEE, C. B. et OSTELO, R. W. (2016b). Choosing the right outcome measurement instruments for patients with low back pain. *Best practice & research Clinical rheumatology*, 30(6):1003–1020.
- [Choi et Mark, 2004] CHOI, H. J. et MARK, L. S. (2004). Scaling affordances for human reach actions. *Human movement science*, 23(6):785–806.
- [Cholewicki *et al.*, 2019] CHOLEWICKI, J., BREEN, A., POPOVICH JR, J. M., REEVES, N. P., SAHRMANN, S. A., VAN DILLEN, L. R., VLEEMING, A. et HODGES, P. W. (2019). Can biomechanics research lead to more effective treatment of low back pain ? a point-counterpoint debate. *journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 49(6):425–436.
- [Christe *et al.*, 2021a] CHRISTE, G., AUSSEMS, C., JOLLES, B. M. et FAVRE, J. (2021a). Patients with chronic low back pain have an individual movement signature : A compa-

-
- ri-son of angular amplitude, angular velocity and muscle activity across multiple func-tional tasks. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 9:767974.
- [Christe *et al.*, 2021b] CHRISTE, G., CROMBEZ, G., EDD, S., OPSOMMER, E., JOLLES, B. M. et FAVRE, J. (2021b). Relationship between psychological factors and spinal motor behaviour in low back pain : a systematic review and meta-analysis. *Pain*, 162(3):672–686.
- [Cinelli et Patla, 2008] CINELLI, M. E. et PATLA, A. E. (2008). Locomotor avoidance behaviours during a visually guided task involving an approaching object. *Gait & posture*, 28(4):596–601.
- [Cinelli *et al.*, 2008] CINELLI, M. E., PATLA, A. E. et ALLARD, F. (2008). Strategies used to walk through a moving aperture. *Gait & posture*, 27(4):595–602.
- [Clar *et al.*, 2014] CLAR, C., TSERTSVADZE, A., HUNDT, G. L., CLARKE, A., SUTCLIFFE, P. *et al.* (2014). Clinical effectiveness of manual therapy for the management of mus-culoskeletal and non-musculoskeletal conditions : systematic review and update of uk evidence report. *Chiropractic & manual therapies*, 22(1):1–34.
- [Clauw *et al.*, 2019] CLAUW, D. J., ESSEX, M. N., PITMAN, V. et JONES, K. D. (2019). Reframing chronic pain as a disease, not a symptom : rationale and implications for pain management. *Postgraduate medicine*, 131(3):185–198.
- [Cleeland et Ryan, 1994] CLEELAND, C. et RYAN, K. (1994). Pain assessment : global use of the brief pain inventory. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, 23(2):129–138.
- [Comalli *et al.*, 2013] COMALLI, D., FRANCHAK, J., CHAR, A. et ADOLPH, K. (2013). Ledge and wedge : Younger and older adults’ perception of action possibilities. *Expe-rimental brain research*, 228:183–192.
- [Corti *et al.*, 2021] CORTI, E. J., GASSON, N. et LOFTUS, A. M. (2021). Cognitive profile and mild cognitive impairment in people with chronic lower back pain. *Brain and cognition*, 151:105737.
- [Costa *et al.*, 2011] COSTA, L. d. C. M., MAHER, C. G., MCAULEY, J. H., HANCOCK, M. J. et SMEETS, R. J. (2011). Self-efficacy is more important than fear of movement in mediating the relationship between pain and disability in chronic low back pain. *European Journal of Pain*, 15(2):213–219.
- [Croft et Panchuk, 2018] CROFT, J. L. et PANCHUK, D. (2018). Watch where you’re going? interferer velocity and visual behavior predicts avoidance strategy during pe-destrian encounters. *Journal of motor behavior*, 50(4):353–363.
- [Cutting *et al.*, 1995] CUTTING, J. E., VISHTON, P. M. et BRAREN, P. A. (1995). How we avoid collisions with stationary and moving objects. *Psychological review*, 102(4):627.

-
- [Dal Farra *et al.*, 2021] DAL FARRA, F., RISIO, R. G., VISMARA, L. et BERGNA, A. (2021). Effectiveness of osteopathic interventions in chronic non-specific low back pain : A systematic review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 56:102616.
- [Daluiso-King et Hebron, 2022] DALUIISO-KING, G. et HEBRON, C. (2022). Is the biopsychosocial model in musculoskeletal physiotherapy adequate? an evolutionary concept analysis. *Physiotherapy theory and practice*, 38(3):373–389.
- [Dansie et Turk, 2013] DANSIE, E. et TURK, D. C. (2013). Assessment of patients with chronic pain. *British journal of anaesthesia*, 111(1):19–25.
- [Darlow *et al.*, 2014] DARLOW, B., PERRY, M., STANLEY, J., MATHIESON, F., MELLOH, M., BAXTER, G. D. et DOWELL, A. (2014). Cross-sectional survey of attitudes and beliefs about back pain in new zealand. *BMJ open*, 4(5):e004725.
- [Davidson et Strauss, 1995] DAVIDSON, L. et STRAUSS, J. S. (1995). Beyond the biopsychosocial model : Integrating disorder, health, and recovery. *Psychiatry*, 58(1):44–55.
- [Demirbüken *et al.*, 2016] DEMIRBÜKEN, İ., ÖZGÜL, B., KURU ÇOLAK, T., AYDOĞDU, O., SARI, Z. et YURDALAN, S. U. (2016). Kinesiophobia in relation to physical activity in chronic neck pain. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation*, 29(1):41–47.
- [Deyo *et al.*, 1998] DEYO, R. A., BATTIE, M., BEURSKENS, A., BOMBARDIER, C., CROFT, P., KOES, B., MALMIVAARA, A., ROLAND, M., VON KORFF, M. et WADDELL, G. (1998). Outcome measures for low back pain research : a proposal for standardized use. *Spine*, 23(18):2003–2013.
- [Didehdar *et al.*, 2020] DIDEHDAR, D., KAMALI, F., YOOSEFINEJAD, A. K. et LOTFI, M. (2020). The effect of spinal manipulation on brain neurometabolites in chronic nonspecific low back pain patients : a randomized clinical trial. *Irish Journal of Medical Science (1971-)*, 189:543–550.
- [Divya *et al.*, 2020] DIVYA, PARVEEN, A., NUHMANI, S., EJAZ HUSSAIN, M. et HUSSAIN KHAN, M. (2020). Effect of lumbar stabilization exercises and thoracic mobilization with strengthening exercises on pain level, thoracic kyphosis, and functional disability in chronic low back pain. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, 18(2):419–424.
- [Du *et al.*, 2018] DU, S., HU, L., BAI, Y., DONG, J., JIN, S., ZHANG, H. et ZHU, Y. (2018). The influence of self-efficacy, fear-avoidance belief, and coping styles on quality of life for chinese patients with chronic nonspecific low back pain : A multisite cross-sectional study. *Pain Practice*, 18(6):736–747.
- [Dueñas *et al.*, 2016] DUEÑAS, M., OJEDA, B., SALAZAR, A., MICO, J. A. et FAILDE, I. (2016). A review of chronic pain impact on patients, their social environment and the health care system. *Journal of pain research*, pages 457–467.

-
- [Dworkin *et al.*, 2015] DWORKIN, R. H., TURK, D. C., TRUDEAU, J. J., BENSON, C., BIONDI, D. M., KATZ, N. P. et KIM, M. (2015). Validation of the short-form mcgill pain questionnaire-2 (sf-mpq-2) in acute low back pain. *The journal of pain*, 16(4):357–366.
- [D'Alessandro *et al.*, 2022] D'ALESSANDRO, G., RUFFINI, N., AQUINO, A., GALLI, M., INNOCENTI, M., TRAMONTANO, M. et CERRITELLI, F. (2022). Differences between experimental and placebo arms in manual therapy trials : a methodological review. *BMC Medical Research Methodology*, 22(1):1–14.
- [Eccleston, 1995] ECCLESTON, C. (1995). Chronic pain and distraction : an experimental investigation into the role of sustained and shifting attention in the processing of chronic persistent pain. *Behaviour research and therapy*, 33(4):391–405.
- [Eccleston et Crombez, 2007] ECCLESTON, C. et CROMBEZ, G. (2007). Worry and chronic pain : a misdirected problem solving model. *Pain*, 132(3):233–236.
- [Eccleston *et al.*, 2001] ECCLESTON, C., CROMBEZ, G., ALDRICH, S. et STANNARD, C. (2001). Worry and chronic pain patients : a description and analysis of individual differences. *European Journal of Pain*, 5(3):309–318.
- [Ege, 2023] EGE, F. (2023). The relationship between kinesiophobia severity and clinical parameters in patients with mechanical low back pain. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, (Preprint):1–10.
- [Ellwood et Carnes, 2021] ELLWOOD, J. et CARNES, D. (2021). An international profile of the practice of osteopaths : a systematic review of surveys. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 40:14–21.
- [Endamli *et al.*, 2019] ENDAMLI, D., BAYRAMLAR, K. et TURHAN, B. (2019). Investigation of fascial treatment effectiveness on pain, flexibility, functional level, and kinesiophobia in patients with chronic low back pain. *Physiotherapy Quarterly*, 27(3):1–5.
- [Engel, 1977] ENGEL, G. L. (1977). The need for a new medical model : a challenge for biomedicine. *Science*, 196(4286):129–136.
- [Eslinger et Grattan, 1993] ESLINGER, P. J. et GRATTAN, L. M. (1993). Frontal lobe and frontal-striatal substrates for different forms of human cognitive flexibility. *Neuropsychologia*, 31(1):17–28.
- [Esteves *et al.*, 2020] ESTEVES, J. E., ZEGARRA-PARODI, R., van DUN, P., CERRITELLI, F. et VAUCHER, P. (2020). Models and theoretical frameworks for osteopathic care—a critical view and call for updates and research. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 35:1–4.
- [Evans et Lucas, 2023] EVANS, D. W. et LUCAS, N. (2023). What is manipulation ? a new definition. *BMC musculoskeletal disorders*, 24(1):1–11.

-
- [Fagundes Loss *et al.*, 2020] FAGUNDES LOSS, J., de Souza da SILVA, L., FERREIRA MIRANDA, I., GROISMAN, S., SANTIAGO WAGNER NETO, E., SOUZA, C. et TARRAGÔ CANDOTTI, C. (2020). Immediate effects of a lumbar spine manipulation on pain sensitivity and postural control in individuals with nonspecific low back pain : a randomized controlled trial. *Chiropractic & Manual Therapies*, 28:1–10.
- [Fajen, 2005] FAJEN, B. R. (2005). The scaling of information to action in visually guided braking. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 31(5):1107.
- [Fajen, 2007] FAJEN, B. R. (2007). Affordance-based control of visually guided action. *Ecological Psychology*, 19(4):383–410.
- [Fajen, 2013] FAJEN, B. R. (2013). Guiding locomotion in complex, dynamic environments. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 7:85.
- [Fajen et Devaney, 2006] FAJEN, B. R. et DEVANEY, M. C. (2006). Learning to control collisions : the role of perceptual attunement and action boundaries. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(2):300.
- [Fajen *et al.*, 2011] FAJEN, B. R., DIAZ, G. et CRAMER, C. (2011). Reconsidering the role of movement in perceiving action-scaled affordances. *Human Movement Science*, 30(3):504–533.
- [Fajen *et al.*, 2008] FAJEN, B. R., RILEY, M. A. et TURVEY, M. T. (2008). Information, affordances, and the control of action in sport. *international Journal of sport psychology*, 40(1):79–107.
- [Fajen et Warren, 2003] FAJEN, B. R. et WARREN, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(2):343.
- [Fernandez *et al.*, 2017] FERNANDEZ, M., COLODRO-CONDE, L., HARTVIGSEN, J., FERREIRA, M. L., REFSHAUGE, K. M., PINHEIRO, M. B., ORDOÑANA, J. R. et FERREIRA, P. H. (2017). Chronic low back pain and the risk of depression or anxiety symptoms : insights from a longitudinal twin study. *The Spine Journal*, 17(7):905–912.
- [Fields, 2004] FIELDS, H. (2004). State-dependent opioid control of pain. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(7):565–575.
- [Fiset *et al.*, 2020] FISET, F., LAMONTAGNE, A. et MCFADYEN, B. J. (2020). Limb movements of another pedestrian affect crossing distance but not path planning during virtual over ground circumvention. *Neuroscience letters*, 736:135278.
- [Foster *et al.*, 2018] FOSTER, N. E., ANEMA, J. R., CHERKIN, D., CHOU, R., COHEN, S. P., GROSS, D. P., FERREIRA, P. H., FRITZ, J. M., KOES, B. W., PEUL, W. *et al.* (2018). Prevention and treatment of low back pain : evidence, challenges, and promising directions. *The Lancet*, 391(10137):2368–2383.

-
- [Foster *et al.*, 2013] FOSTER, N. E., HILL, J. C., O’SULLIVAN, P. et HANCOCK, M. (2013). Stratified models of care. *Best practice & research Clinical rheumatology*, 27(5):649–661.
- [Franchak *et al.*, 2012] FRANCHAK, J. M., CELANO, E. C. et ADOLPH, K. E. (2012). Perception of passage through openings depends on the size of the body in motion. *Experimental brain research*, 223:301–310.
- [Franke *et al.*, 2014] FRANKE, H., FRANKE, J.-D. et FRYER, G. (2014). Osteopathic manipulative treatment for nonspecific low back pain : a systematic review and meta-analysis. *BMC musculoskeletal disorders*, 15(1):1–18.
- [French *et al.*, 2002] FRENCH, D. J., ROACH, P. J. et MAYES, S. (2002). Peur du mouvement chez des accidentés du travail : L’échelle de kinésiophobie de tampa (ekt). *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement*, 34(1):28.
- [Fritz *et al.*, 2007] FRITZ, J. M., CLELAND, J. A. et CHILDS, J. D. (2007). Subgrouping patients with low back pain : evolution of a classification approach to physical therapy. *journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 37(6):290–302.
- [Gabel *et al.*, 2012] GABEL, C. P., MELLOH, M., BURKETT, B., OSBORNE, J. et YELAND, M. (2012). The örebro musculoskeletal screening questionnaire : validation of a modified primary care musculoskeletal screening tool in an acute work injured population. *Manual therapy*, 17(6):554–565.
- [Garg *et al.*, 2020] GARG, A., PATHAK, H., CHURYUKANOV, M. V., UPPIN, R. B. et SLOBODIN, T. M. (2020). Low back pain : critical assessment of various scales. *European Spine Journal*, 29:503–518.
- [Gatchel, 2015] GATCHEL, R. J. (2015). The continuing and growing epidemic of chronic low back pain. In *Healthcare*, volume 3, pages 838–845. MDPI.
- [Gérin-Lajoie *et al.*, 2008] GÉRIN-LAJOIE, M., RICHARDS, C. L., FUNG, J. et MCFADYEN, B. J. (2008). Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments. *Gait & posture*, 27(2):239–247.
- [Gérin-Lajoie *et al.*, 2005] GÉRIN-LAJOIE, M., RICHARDS, C. L. et MCFADYEN, B. J. (2005). The negotiation of stationary and moving obstructions during walking : anticipatory locomotor adaptations and preservation of personal space. *Motor control*, 9(3):242–269.
- [Gerrits *et al.*, 2015] GERRITS, M. M., van MARWIJK, H. W., van OPPEN, P., van der HORST, H. et PENNINX, B. W. (2015). Longitudinal association between pain, and depression and anxiety over four years. *Journal of psychosomatic research*, 78(1):64–70.
- [Gerrits *et al.*, 2014] GERRITS, M. M., VAN OPPEN, P., VAN MARWIJK, H. W., PENNINX, B. W. et van der HORST, H. E. (2014). Pain and the onset of depressive and anxiety disorders. *PAIN®*, 155(1):53–59.

-
- [Gibson, 1986] GIBSON, J. (1986). The ecological approach to visual perception. *NJ : Erlbaum*.
- [Gibson, 1950] GIBSON, J. J. (1950). The perception of the visual world.
- [Gibson, 1979] GIBSON, J. J. (1979). The theory of affordances. the ecological approach to visual perception. *The people, place and, space reader*, pages 56–60.
- [Gibson et al., 1955] GIBSON, J. J., OLUM, P. et ROSENBLATT, F. (1955). Parallax and perspective during aircraft landings. *The American journal of psychology*, 68(3):372–385.
- [Grande-Alonso et al., 2019] GRANDE-ALONSO, M., SUSO-MARTÍ, L., CUENCA-MARTÍNEZ, F., PARDO-MONTERO, J., GIL-MARTÍNEZ, A. et LA TOUCHE, R. (2019). Physiotherapy based on a biobehavioral approach with or without orthopedic manual physical therapy in the treatment of nonspecific chronic low back pain : a randomized controlled trial. *Pain Medicine*, 20(12):2571–2587.
- [Grisart et Plaghki, 1999] GRISART, J. M. et PLAGHKI, L. H. (1999). Impaired selective attention in chronic pain patients. *European journal of pain*, 3(4):325–333.
- [Gureje et al., 1998] GUREJE, O., VON KORFF, M., SIMON, G. E. et GATER, R. (1998). Persistent pain and well-being : a world health organization study in primary care. *Jama*, 280(2):147–151.
- [Hackney et Cinelli, 2011] HACKNEY, A. L. et CINELLI, M. E. (2011). Action strategies of older adults walking through apertures. *Gait & posture*, 33(4):733–736.
- [Hackney et Cinelli, 2013a] HACKNEY, A. L. et CINELLI, M. E. (2013a). Older adults are guided by their dynamic perceptions during aperture crossing. *Gait & posture*, 37(1):93–97.
- [Hackney et Cinelli, 2013b] HACKNEY, A. L. et CINELLI, M. E. (2013b). Young and older adults use body-scaled information during a non-confined aperture crossing task. *Experimental brain research*, 225:419–429.
- [Hackney et al., 2015a] HACKNEY, A. L., CINELLI, M. E., DENOMME, L. T. et FRANK, J. S. (2015a). The effects of narrow and elevated path walking on aperture crossing. *Human movement science*, 41:295–306.
- [Hackney et al., 2014] HACKNEY, A. L., CINELLI, M. E. et FRANK, J. S. (2014). Is the critical point for aperture crossing adapted to the person-plus-object system ? *Journal of motor behavior*, 46(5):319–327.
- [Hackney et al., 2015b] HACKNEY, A. L., CINELLI, M. E. et FRANK, J. S. (2015b). Does the passability of apertures change when walking through human versus pole obstacles ? *Acta psychologica*, 162:62–68.

-
- [Hackney *et al.*, 2020] HACKNEY, A. L., CINELLI, M. E., WARREN, W. H. et FRANK, J. S. (2020). Are avatars treated like human obstacles during aperture crossing in virtual environments? *Gait & posture*, 80:74–76.
- [Hackney *et al.*, 2013] HACKNEY, A. L., VALLIS, L. A. et CINELLI, M. E. (2013). Action strategies of individuals during aperture crossing in nonconfined space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(6):1104–1112.
- [Hall, 1963] HALL, E. T. (1963). A system for the notation of proxemic behavior. *American anthropologist*, 65(5):1003–1026.
- [Hamacher *et al.*, 2016] HAMACHER, D., HAMACHER, D., HEROLD, F. et SCHEGA, L. (2016). Are there differences in the dual-task walking variability of minimum toe clearance in chronic low back pain patients and healthy controls? *Gait & posture*, 49:97–101.
- [Hamacher *et al.*, 2014] HAMACHER, D., HAMACHER, D. et SCHEGA, L. (2014). A cognitive dual task affects gait variability in patients suffering from chronic low back pain. *Experimental brain research*, 232:3509–3513.
- [Hartvigsen *et al.*, 2018] HARTVIGSEN, J., HANCOCK, M. J., KONGSTED, A., LOUW, Q., FERREIRA, M. L., GENEVAY, S., HOY, D., KARPPINEN, J., PRANSKY, G., SIEPER, J. *et al.* (2018). What low back pain is and why we need to pay attention. *The Lancet*, 391(10137):2356–2367.
- [HAS, 2019] HAS (2019). Prise en charge du patient présentant une lombalgie commune. *Mars*, 9(11):2021.
- [HAS, 2008] HAS, S. (2008). Douleur chronique : reconnaître le syndrome douloureux chronique, l'évaluer et orienter le patient—consensus formalisé. *Rev Neurol (Paris)*, 164:754–774.
- [Haskins *et al.*, 2015] HASKINS, R., OSMOTHERLY, P. G. et RIVETT, D. A. (2015). Validation and impact analysis of prognostic clinical prediction rules for low back pain is needed : a systematic review. *Journal of Clinical Epidemiology*, 68(7):821–832.
- [Hayes *et al.*, 2006] HAYES, S. C., LUOMA, J. B., BOND, F. W., MASUDA, A. et LILLIS, J. (2006). Acceptance and commitment therapy : Model, processes and outcomes. *Behaviour research and therapy*, 44(1):1–25.
- [Heaton et Staff, 1993] HEATON, R. K. et STAFF, P. (1993). Wisconsin card sorting test : computer version 2. *Odessa : Psychological Assessment Resources*, 4:1–4.
- [Higgins *et al.*, 2018] HIGGINS, D. M., MARTIN, A. M., BAKER, D. G., VASTERLING, J. J. et RISBROUGH, V. (2018). The relationship between chronic pain and neurocognitive function : a systematic review. *The Clinical journal of pain*, 34(3):262.
- [Higuchi *et al.*, 2006] HIGUCHI, T., CINELLI, M. E., GREIG, M. A. et PATLA, A. E. (2006). Locomotion through apertures when wider space for locomotion is necessary : adaptation to artificially altered bodily states. *Experimental Brain Research*, 175:50–59.

-
- [Hjermstad *et al.*, 2011] HJERMSTAD, M. J., FAYERS, P. M., HAUGEN, D. F., CARACENI, A., HANKS, G. W., LOGE, J. H., FAINSINGER, R., AASS, N., KAASA, S., (EPCRC, E. P. C. R. C. *et al.* (2011). Studies comparing numerical rating scales, verbal rating scales, and visual analogue scales for assessment of pain intensity in adults : a systematic literature review. *Journal of pain and symptom management*, 41(6):1073–1093.
- [Hodges et Tucker, 2011] HODGES, P. W. et TUCKER, K. (2011). Moving differently in pain : a new theory to explain the adaptation to pain. *Pain*, 152(3):S90–S98.
- [Homs *et al.*, 2022] HOMS, A. F., DUPEYRON, A. et TORRE, K. (2022). Relationship between gait complexity and pain attention in chronic low back pain. *Pain*, 163(1):e31–e39.
- [Hong *et al.*, 2022] HONG, J.-Y., SONG, K.-S., CHO, J. H., LEE, J. H. et KIM, N. H. (2022). An updated overview of low back pain management. *Asian Spine Journal*, 16(6):968.
- [Horak *et al.*, 1996] HORAK, F. B. *et al.* (1996). Adaptation of automatic postural responses. *The acquisition of motor behavior in vertebrates*, pages 57–85.
- [Horak et Nashner, 1986] HORAK, F. B. et NASHNER, L. M. (1986). Central programming of postural movements : adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of neurophysiology*, 55(6):1369–1381.
- [Huber *et al.*, 2014] HUBER, M., SU, Y.-H., KRÜGER, M., FASCHIAN, K., GLASAUER, S. et HERMSDÖRFER, J. (2014). Adjustments of speed and path when avoiding collisions with another pedestrian. *PloS one*, 9(2):e89589.
- [Husky *et al.*, 2018] HUSKY, M. M., FERDOUS FARIN, F., COMPAGNONE, P., FERMANIAN, C. et KOVESS-MASFETY, V. (2018). Chronic back pain and its association with quality of life in a large french population survey. *Health and quality of life outcomes*, 16(1):1–9.
- [Hussein *et al.*, 2021] HUSSEIN, H. M., MORSI, A. A. et ABDELRAOOF, N. A. (2021). The immediate effect of sustained natural apophyseal glide on postural stability and pain in individuals presenting with flexion-dominant chronic low back pain : A randomized single-blinded placebo-controlled trial. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 34(6):1079–1086.
- [Hussien *et al.*, 2017] HUSSIEN, H. M., ABDEL-RAOOF, N. A., KATTABEI, O. M. et AHMED, H. H. (2017). Effect of mulligan concept lumbar snag on chronic nonspecific low back pain. *Journal of chiropractic medicine*, 16(2):94–102.
- [IASP, 1979] IASP (1979). *IASP pain terms - 1979*. PAIN.
- [Innocenti *et al.*, 2023] INNOCENTI, T., SALVIOLI, S., LOGULLO, P., GIAGIO, S., OSTELO, R. et CHIAROTTO, A. (2023). The uptake of the core outcome set for non-specific low back pain clinical trials is poor : a meta-epidemiological study of trial registrations. *The Journal of Pain*.

-
- [Ippersiel *et al.*, 2022] IPPERSIEL, P., TEOLI, A., WIDEMAN, T. H., PREUSS, R. A. et ROBBINS, S. M. (2022). The relationship between pain-related threat and motor behavior in nonspecific low back pain : a systematic review and meta-analysis. *Physical therapy*, 102(2):pzab274.
- [John *et al.*, 2023] JOHN, J. N., UGWU, E. C., OKEZUE, O. C., EKECHUKWU, E. N. D., MGBEOJEDO, U. G., JOHN, D. O. et EZEUKWU, A. O. (2023). Kinesiophobia and associated factors among patients with chronic non-specific low back pain. *Disability and Rehabilitation*, 45(16):2651–2659.
- [Johnson, 2019] JOHNSON, M. I. (2019). The landscape of chronic pain : broader perspectives. *Medicina*, 55(5):182.
- [Joshi *et al.*, 2021] JOSHI, S., YADAV, R. et PAWALIA, A. (2021). Can a cervical muscle inhibition technique reduce chronic low back pain? *Advances in Rehabilitation*, 35(4): 38–46.
- [Kahraman *et al.*, 2018] KAHRAMAN, B. O., KAHRAMAN, T., KALEMCI, O. et SENGUL, Y. S. (2018). Gender differences in postural control in people with nonspecific chronic low back pain. *Gait & posture*, 64:147–151.
- [Karran *et al.*, 2017] KARRAN, E. L., MCAULEY, J. H., TRAEGER, A. C., HILLIER, S. L., GRABHERR, L., RUSSEK, L. N. et MOSELEY, G. L. (2017). Can screening instruments accurately determine poor outcome risk in adults with recent onset low back pain? a systematic review and meta-analysis. *BMC medicine*, 15(1):1–15.
- [Khera et Rangasamy, 2021] KHERA, T. et RANGASAMY, V. (2021). Cognition and pain : a review. *Frontiers in psychology*, 12:1819.
- [Knorr *et al.*, 2016] KNORR, A. G., WILLACKER, L., HERMSDÖRFER, J., GLASAUER, S. et KRÜGER, M. (2016). Influence of person-and situation-specific characteristics on collision avoidance behavior in human locomotion. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 42(9):1332.
- [Koch et Hänsel, 2018] KOCH, C. et HÄNSEL, F. (2018). Chronic non-specific low back pain and motor control during gait. *Frontiers in psychology*, 9:2236.
- [Koch et Hänsel, 2019] KOCH, C. et HÄNSEL, F. (2019). Non-specific low back pain and postural control during quiet standing—a systematic review. *Frontiers in psychology*, 10:586.
- [Kongsted *et al.*, 2016] KONGSTED, A., KENT, P., AXEN, I., DOWNIE, A. S. et DUNN, K. M. (2016). What have we learned from ten years of trajectory research in low back pain? *BMC musculoskeletal disorders*, 17(1):1–11.
- [Krismer *et al.*, 2007] KRISMER, M., VAN TULDER, M. *et al.* (2007). Low back pain (non-specific). *Best practice & research clinical rheumatology*, 21(1):77–91.

-
- [Kroenke *et al.*, 2001] KROENKE, K., SPITZER, R. L. et WILLIAMS, J. B. (2001). The phq-9 : validity of a brief depression severity measure. *Journal of general internal medicine*, 16(9):606–613.
- [Lamers *et al.*, 2011] LAMERS, F., van OPPEN, P., COMIJS, H. C., SMIT, J. H., SPINHOVEN, P., van BALKOM, A. J., NOLEN, W. A., ZITMAN, F. G., BEEKMAN, A. T. et PENNINX, B. W. (2011). Comorbidity patterns of anxiety and depressive disorders in a large cohort study : the netherlands study of depression and anxiety (nesda). *The Journal of clinical psychiatry*, 72(3):3397.
- [Lamoth *et al.*, 2006] LAMOTH, C. J., DAFFERTSHOFER, A., MEIJER, O. G. et BEEK, P. J. (2006). How do persons with chronic low back pain speed up and slow down ? : Trunk–pelvis coordination and lumbar erector spinae activity during gait. *Gait & posture*, 23(2):230–239.
- [Lamoth *et al.*, 2002] LAMOTH, C. J., MEIJER, O. G., WUISMAN, P. I., van DIEËN, J. H., LEVIN, M. F. et BEEK, P. J. (2002). Pelvis-thorax coordination in the transverse plane during walking in persons with nonspecific low back pain. *Spine*, 27(4):E92–E99.
- [Lamoth *et al.*, 2008] LAMOTH, C. J., STINS, J. F., PONT, M., KERCKHOFF, F. et BEEK, P. J. (2008). Effects of attention on the control of locomotion in individuals with chronic low back pain. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 5(1):1–8.
- [Land *et al.*, 2010] LAND, H., VERDURMEN, J., TEN HAVE, M., van DORSSELAER, S., BEEKMAN, A. et de GRAAF, R. (2010). The association between arthritis and psychiatric disorders ; results from a longitudinal population-based study. *Journal of psychosomatic research*, 68(2):187–193.
- [Latremoliere et Woolf, 2009] LATREMOLIERE, A. et WOOLF, C. J. (2009). Central sensitization : a generator of pain hypersensitivity by central neural plasticity. *The journal of pain*, 10(9):895–926.
- [Lee, 1976] LEE, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4):437–459.
- [Lépine et L'échelle, 1996] LÉPINE, J. et L'ÉCHELLE, H. (1996). Hospital anxiety and depression scale. *Evaluation*, 31.
- [Lezak, 2004] LEZAK, M. D. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.
- [Licciardone *et al.*, 2016] LICCIARDONE, J. C., GATCHEL, R. J. et ARYAL, S. (2016). Recovery from chronic low back pain after osteopathic manipulative treatment : a randomized controlled trial. *Journal of Osteopathic Medicine*, 116(3):144–155.
- [Licciardone *et al.*, 2012] LICCIARDONE, J. C., KEARNS, C. M., HODGE, L. M. et BERGAMINI, M. V. (2012). Associations of cytokine concentrations with key osteopathic lesions and clinical outcomes in patients with nonspecific chronic low back pain : results from the osteopathic trial. *Journal of Osteopathic Medicine*, 112(9):596–605.

-
- [Licciardone *et al.*, 2013] LICCIARDONE, J. C., MINOTTI, D. E., GATCHEL, R. J., KEARNS, C. M. et SINGH, K. P. (2013). Osteopathic manual treatment and ultrasound therapy for chronic low back pain : a randomized controlled trial. *The Annals of Family Medicine*, 11(2):122–129.
- [Lin *et al.*, 2023] LIN, J., HALAKI, M. et LEAVER, A. (2023). Limited evidence of altered gait parameters in people with chronic nonspecific low back pain. *Gait & Posture*, 99:98–103.
- [Linton, 2000] LINTON, S. J. (2000). A review of psychological risk factors in back and neck pain. *Spine*, 25(9):1148–1156.
- [Linton et Shaw, 2011] LINTON, S. J. et SHAW, W. S. (2011). Impact of psychological factors in the experience of pain. *Physical therapy*, 91(5):700–711.
- [Loeser et Treede, 2008] LOESER, J. D. et TREEDE, R.-D. (2008). The kyoto protocol of iasp basic pain terminology. *PAIN®*, 137(3):473–477.
- [LoMartire *et al.*, 2020] LOMARTIRE, R., ÄNG, B. O., GERDLE, B. et VIXNER, L. (2020). Psychometric properties of short form-36 health survey, euroqol 5-dimensions, and hospital anxiety and depression scale in patients with chronic pain. *Pain*, 161(1):83.
- [Lopez *et al.*, 2003] LOPEZ, M. N., LAZAR, M. D. et OH, S. (2003). Psychometric properties of the hooper visual organization test. *Assessment*, 10(1):66–70.
- [Lundberg *et al.*, 2004] LUNDBERG, M. K., STYF, J. et CARLSSON, S. G. (2004). A psychometric evaluation of the tampa scale for kinesiophobia—from a physiotherapeutic perspective. *Physiotherapy theory and practice*, 20(2):121–133.
- [Lunenborg, 2010] LUNENBURG, F. C. (2010). The decision making process. In *National Forum of Educational Administration & Supervision Journal*, volume 27.
- [Luyat et Regia-Corte, 2009] LUYAT, M. et REGIA-CORTE, T. (2009). Les affordances : de james jerome gibson aux formalisations récentes du concept. *L'Année psychologique*, 109(2):297–332.
- [Lynch *et al.*, 2018] LYNCH, S. D., KULPA, R., MEERHOFF, L. A., PETTRÉ, J., CRÉTUAL, A. et OLIVIER, A.-H. (2018). Collision avoidance behavior between walkers : Global and local motion cues. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(7):2078–2088.
- [Macías-Toronjo *et al.*, 2020] MACÍAS-TORONJO, I., ROJAS-OCAÑA, M. J., SÁNCHEZ-RAMOS, J. L. et GARCÍA-NAVARRO, E. B. (2020). Pain catastrophizing, kinesiophobia and fear-avoidance in non-specific work-related low-back pain as predictors of sickness absence. *Plos one*, 15(12):e0242994.
- [Maher *et al.*, 2017] MAHER, C., UNDERWOOD, M. et BUCHBINDER, R. (2017). Non-specific low back pain. *The Lancet*, 389(10070):736–747.

-
- [Makino *et al.*, 2023] MAKINO, R., KODAMA, K., TOMONO, T. et WATANABE, K. (2023). Effect of combining the direction of three human-like objects on choice between two apertures. *In Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, volume 45.
- [Mark, 1987] MARK, L. S. (1987). Eyeheight-scaled information about affordances : a study of sitting and stair climbing. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 13(3):361.
- [Mark et Vogele, 1987] MARK, L. S. et VOGELE, D. (1987). A biodynamic basis for perceived categories of action : A study of sitting and stair climbing. *Journal of Motor Behavior*, 19(3):367–384.
- [Martel *et al.*, 2015] MARTEL, M.-E., DIONNE, F., GAUCHET, A., ZOUIKRI-ROLAND, Y., DECKER, E., TROUILLET, R. et MONESTÈS, J. (2015). Psychological inflexibility for pain : Translation and validation for a french-speaking population. *In ACBS Annual World Conference, Berlin, Germany*.
- [Martí-Salvador *et al.*, 2018] MARTÍ-SALVADOR, M., HIDALGO-MORENO, L., DOMÉNECH-FERNÁNDEZ, J., LISÓN, J. F. et ARGUISUELAS, M. D. (2018). Osteopathic manipulative treatment including specific diaphragm techniques improves pain and disability in chronic nonspecific low back pain : a randomized trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 99(9):1720–1729.
- [Masiliūnas *et al.*, 2017] MASILIŪNAS, R., VITKUTĖ, D., STANKEVIČIUS, E., MATIJOŠAITIS, V. et PETRIKONIS, K. (2017). Response inhibition, set shifting, and complex executive function in patients with chronic lower back pain. *Medicina*, 53(1):26–33.
- [Matheve *et al.*, 2019] MATHEVE, T., DE BAETS, L., BOGAERTS, K. et TIMMERMANS, A. (2019). Lumbar range of motion in chronic low back pain is predicted by task-specific, but not by general measures of pain-related fear. *European journal of pain*, 23(6):1171–1184.
- [Mazza *et al.*, 2018] MAZZA, S., FROT, M. et REY, A. E. (2018). A comprehensive literature review of chronic pain and memory. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 87:183–192.
- [Meinke *et al.*, 2022] MEINKE, A., MASCHIO, C., MEIER, M. L., KARLEN, W. et SWANENBURG, J. (2022). The association of fear of movement and postural sway in people with low back pain. *Frontiers in Psychology*, 13:1006034.
- [Meints *et al.*, 2019] MEINTS, S. M., MAWLA, I., NAPADOW, V., KONG, J., GERBER, J., CHAN, S.-T., WASAN, A. D., KAPTCHUK, T. J., MCDONNELL, C., CARRIERE, J. *et al.* (2019). The relationship between catastrophizing and altered pain sensitivity in patients with chronic low back pain. *Pain*, 160(4):833.

-
- [Melkumova *et al.*, 2011] MELKUMOVA, K., PODCHUFAROVA, E. et YAKHNO, N. (2011). Characteristics of cognitive functions in patients with chronic spinal pain. *Neuroscience and behavioral physiology*, 41:42–46.
- [Melzack et Raja, 2005] MELZACK, R. et RAJA, S. N. (2005). The mcgill pain questionnaire : from description to measurement. *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, 103(1):199–202.
- [Melzack et Wall, 1965] MELZACK, R. et WALL, P. D. (1965). Pain mechanisms : A new theory : A gate control system modulates sensory input from the skin before it evokes pain perception and response. *Science*, 150(3699):971–979.
- [Ménard *et al.*, 2022] MÉNARD, M., COUVERTIER, M., AWAI, L., ESTEVES, J. E., BIDEAU, B. et VAUCHER, P. (2022). Exploring lumbo-pelvic functional behaviour patterns during osteopathic motion tests : a biomechanical (en) active inference approach to movement analysis. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 45:8–16.
- [Ménard *et al.*, 2020] MÉNARD, M., DRAPER-RODI, J., MERDY, O., WAGNER, A., TAVERNIER, P., JACQUOT, E. et MHADHBI, H. (2020). Finding a way between osteopathic principles and evidence-based practices : Response to esteves et al. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 37:45–47.
- [Meneghetti *et al.*, 2021] MENEGHETTI, C., MIOLA, L., TOFFALINI, E., PASTORE, M. et PAZZAGLIA, F. (2021). Learning from navigation, and tasks assessing its accuracy : The role of visuospatial abilities and wayfinding inclinations. *Journal of Environmental Psychology*, 75:101614.
- [Mescouto *et al.*, 2022] MESCOUTO, K., OLSON, R. E., HODGES, P. W. et SETCHELL, J. (2022). A critical review of the biopsychosocial model of low back pain care : time for a new approach? *Disability and Rehabilitation*, 44(13):3270–3284.
- [Miller et Forrest, 2001] MILLER, S. A. et FORREST, J. L. (2001). Enhancing your practice through evidence-based decision making : Pico, learning how to ask good questions. *Journal of Evidence Based Dental Practice*, 1(2):136–141.
- [Mills *et al.*, 2019] MILLS, S. E., NICOLSON, K. P. et SMITH, B. H. (2019). Chronic pain : a review of its epidemiology and associated factors in population-based studies. *British journal of anaesthesia*, 123(2):273–283.
- [Miyake *et al.*, 2000] MIYAKE, A., FRIEDMAN, N. P., EMERSON, M. J., WITZKI, A. H., HOWERTER, A. et WAGER, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks : A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1):49–100.
- [Moissenet *et al.*, 2023] MOISSENET, F., ARMAND, S. et GENEVAY, S. (2023). Measurement properties of 72 movement biomarkers aiming to discriminate non-specific chronic low back pain patients from an asymptomatic population. *Scientific Reports*, 13(1):6483.

-
- [Moissenet *et al.*, 2021] MOISSENET, F., ROSE-DULCINA, K., ARMAND, S. et GENEVAY, S. (2021). A systematic review of movement and muscular activity biomarkers to discriminate non-specific chronic low back pain patients from an asymptomatic population. *Scientific Reports*, 11(1):5850.
- [Mondini *et al.*, 2011] MONDINI, S., MAPELLI, D., VESTRI A, A., ARCARA, G., BISIACCHI, P. *et al.* (2011). *Esame Neuropsicologico Breve 2, ENB-2*. Raffaello Cortina Editore.
- [Montagne *et al.*, 2002] MONTAGNE, G., BUEKERS, M., de RUGY, A., CAMACHON, C. et LAURENT, M. (2002). Control of human locomotion under various task constraints. *Experimental Brain Research*, 143(1):133–136.
- [Moriarty *et al.*, 2011] MORIARTY, O., MCGUIRE, B. E. et FINN, D. P. (2011). The effect of pain on cognitive function : a review of clinical and preclinical research. *Progress in neurobiology*, 93(3):385–404.
- [Morton, 1969] MORTON, J. (1969). Categories of interference : Verbal mediation and conflict in card sorting. *British Journal of Psychology*, 60(3):329–346.
- [Moseley *et al.*, 2015] MOSELEY, A. M., SZIKSZAY, T., LIN, C.-W., MATHIESON, S., ELKINS, M. R., HERBERT, R. D., MAHER, C. G. et SHERRINGTON, C. (2015). A systematic review of the measurement properties and usage of the physiotherapy evidence database (pedro) scale. *Physiotherapy*, 101:e1043.
- [Mousas *et al.*, 2021] MOUSAS, C., KOILIAS, A., REKABDAR, B., KAO, D. et ANASTASLOU, D. (2021). Toward understanding the effects of virtual character appearance on avoidance movement behavior. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 40–49. IEEE.
- [Nambi *et al.*, 2018] NAMBI, G., KAMAL, W., ES, S., JOSHI, S. et TRIVEDI, P. (2018). Spinal manipulation plus laser therapy versus laser therapy alone in the treatment of chronic non-specific low back pain : a randomized controlled study. *European journal of physical and rehabilitation medicine*, 54(6):880–889.
- [Nicol *et al.*, 2023] NICOL, V., VERDAGUER, C., DASTE, C., BISSERIEUX, H., LAPEYRE, É., LEFÈVRE-COLAU, M.-M., RANNOU, F., RÖREN, A., FACIONE, J. et NGUYEN, C. (2023). Chronic low back pain : a narrative review of recent international guidelines for diagnosis and conservative treatment. *Journal of Clinical Medicine*, 12(4):1685.
- [Nocon et Baldwin, 1998] NOCON, A. et BALDWIN, S. (1998). Trends in rehabilitation policy : a review of the literature.
- [Oliveira et Pinto, 2021] OLIVEIRA, C. B. et PINTO, R. Z. (2021). Clinimetrics : Photograph series of daily activities-short electronic version (phoda-sev). *Journal of physiotherapy*, 67(3):222.

-
- [Olivier *et al.*, 2017] OLIVIER, A.-H., BRUNEAU, J., KULPA, R. et PETTRÉ, J. (2017). Walking with virtual people : Evaluation of locomotion interfaces in dynamic environments. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(7):2251–2263.
- [Olivier *et al.*, 2013] OLIVIER, A.-H., MARIN, A., CRÉTUAL, A., BERTHOZ, A. et PETTRÉ, J. (2013). Collision avoidance between two walkers : Role-dependent strategies. *Gait & posture*, 38(4):751–756.
- [Olivier *et al.*, 2012] OLIVIER, A.-H., MARIN, A., CRÉTUAL, A. et PETTRÉ, J. (2012). Minimal predicted distance : A common metric for collision avoidance during pairwise interactions between walkers. *Gait & posture*, 36(3):399–404.
- [Organization, 2001] ORGANIZATION, W. H. (2001). *International classification of functioning, disability and health : ICF*. World Health Organization.
- [Organization *et al.*, 1995] ORGANIZATION, W. H. *et al.* (1995). The world health organization quality of life assessment (who/qol) : position paper from the world health organization. *Soc Sci Med*, 41:1403–1409.
- [Osinski *et al.*, 2017] OSINSKI, T., LALLEMANT, A. et RUSSO, T. (2017). Modulation et dérèglements neurophysiologiques des voies de la douleur. *Kinésithérapie, la Revue*, 17(186):16–32.
- [O’Sullivan, 2005] O’SULLIVAN, P. (2005). Diagnosis and classification of chronic low back pain disorders : maladaptive movement and motor control impairments as underlying mechanism. *Manual therapy*, 10(4):242–255.
- [Page *et al.*, 2021] PAGE, M. J., MCKENZIE, J. E., BOSSUYT, P. M., BOUTRON, I., HOFFMANN, T. C., MULROW, C. D., SHAMSEER, L., TETZLAFF, J. M., AKL, E. A., BRENNAN, S. E. *et al.* (2021). The prisma 2020 statement : an updated guideline for reporting systematic reviews. *International journal of surgery*, 88:105906.
- [Park *et al.*, 2023] PARK, J., NGUYEN, V. Q., HO, R. L. et COOMBES, S. A. (2023). The effect of chronic low back pain on postural control during quiet standing : A meta-analysis. *Scientific Reports*, 13(1):7928.
- [Patla, 1991] PATLA, A. E. (1991). Understanding the control of human locomotion : a prologue. In *Advances in psychology*, volume 78, pages 3–17. Elsevier.
- [Patla, 1997] PATLA, A. E. (1997). Understanding the roles of vision in the control of human locomotion. *Gait & posture*, 5(1):54–69.
- [Patla et Greig, 2006] PATLA, A. E. et GREIG, M. (2006). Any way you look at it, successful obstacle negotiation needs visually guided on-line foot placement regulation during the approach phase. *Neuroscience letters*, 397(1-2):110–114.
- [Patla *et al.*, 2002] PATLA, A. E., NIECHWIEJ, E., RACCO, V. et GOODALE, M. A. (2002). Understanding the contribution of binocular vision to the control of adaptive locomotion. *Experimental brain research*, 142:551–561.

-
- [Pelletier *et al.*, 2018] PELLETIER, R., BOURBONNAIS, D. et HIGGINS, J. (2018). Nociception, pain, neuroplasticity and the practice of osteopathic manipulative medicine. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 27:34–44.
- [Pereira Nery *et al.*, 2023] PEREIRA NERY, E. C., ROCHA, N. P., CRUZ, V. T. et SILVA, A. G. (2023). Systematic review and meta-analysis on the association between chronic low back pain and cognitive function. *Pain Practice*, 23(4):399–408.
- [Perrot, 2015] PERROT, S. (2015). Osteoarthritis pain. *Best practice & research Clinical rheumatology*, 29(1):90–97.
- [Perrot, 2017] PERROT, S. (2017). Démographie et impact socio-économique de la douleur en france. *Livre blanc de la douleur 2017*, page 37.
- [Petrigna *et al.*, 2020] PETRIGNA, L., GENTILE, A., MANI, D., PAJAUJIENE, S., ZANNOTTO, T., THOMAS, E., PAOLI, A., PALMA, A. et BIANCO, A. (2020). Dual-task conditions on static postural control in older adults : A systematic review and meta-analysis. *Journal of Aging and Physical Activity*, 29(1):162–177.
- [Pfaff et Cinelli, 2018] PFAFF, L. M. et CINELLI, M. E. (2018). Avoidance behaviours of young adults during a head-on collision course with an approaching person. *Experimental brain research*, 236:3169–3179.
- [Pincus *et al.*, 2002] PINCUS, T., BURTON, A. K., VOGEL, S. et FIELD, A. P. (2002). A systematic review of psychological factors as predictors of chronicity/disability in prospective cohorts of low back pain. In *Orthopaedic Proceedings*, volume 84, pages 142–143. Bone & Joint.
- [Pinheiro *et al.*, 2016] PINHEIRO, M. B., FERREIRA, M. L., REFSHAUGE, K., MAHER, C. G., ORDOÑANA, J. R., ANDRADE, T. B., TSATHAS, A. et FERREIRA, P. H. (2016). Symptoms of depression as a prognostic factor for low back pain : a systematic review. *The Spine Journal*, 16(1):105–116.
- [Pinheiro *et al.*, 2015] PINHEIRO, M. B., FERREIRA, M. L., REFSHAUGE, K., ORDOÑANA, J. R., MACHADO, G. C., PRADO, L. R., MAHER, C. G. et FERREIRA, P. H. (2015). Symptoms of depression and risk of new episodes of low back pain : a systematic review and meta-analysis. *Arthritis care & research*, 67(11):1591–1603.
- [Pourahmadi *et al.*, 2023] POURAHMADI, M., NEGAHBAN, H., KOES, B. W., Fernández de LAS-PEÑAS, C., EBRAHIMI TAKAMJANI, I. et BAHRAMIAN, M. (2023). The effect of dual-task conditions on postural control in adults with low back pain : a systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 18(1):555.
- [Queneau *et al.*, 2019] QUENEAU, P., SERRIE, A., TRÈVES, R. et BONTOUX, D. (2019). Les douleurs chroniques en france recommandations pour une meilleure prise en charge-recommandations de l’académie nationale de médecine. *Douleur et Analgésie*, 32(3): 147–154.

-
- [Raja *et al.*, 2020] RAJA, S. N., CARR, D. B., COHEN, M., FINNERUP, N. B., FLOR, H., GIBSON, S., KEEFE, F., MOGIL, J. S., RINGKAMP, M., SLUKA, K. A. *et al.* (2020). The revised iasp definition of pain : Concepts, challenges, and compromises. *Pain*, 161(9):1976.
- [Ramond *et al.*, 2011] RAMOND, A., BOUTON, C., RICHARD, I., ROQUELAURE, Y., BAUFRETON, C., LEGRAND, E. et HUEZ, J.-F. (2011). Psychosocial risk factors for chronic low back pain in primary care—a systematic review. *Family practice*, 28(1):12–21.
- [Ranger *et al.*, 2020] RANGER, T. A., CICUTTINI, F. M., JENSEN, T. S., MANNICHE, C., HERITIER, S. et URQUHART, D. M. (2020). Catastrophization, fear of movement, anxiety, and depression are associated with persistent, severe low back pain and disability. *The Spine Journal*, 20(6):857–865.
- [Rapos *et al.*, 2019] RAPOS, V., CINELLI, M., SNYDER, N., CRÉTUAL, A. et OLIVIER, A.-H. (2019). Minimum predicted distance : Applying a common metric to collision avoidance strategies between children and adult walkers. *Gait & posture*, 72:16–21.
- [Rapos *et al.*, 2021] RAPOS, V., CINELLI, M. E., GRUNBERG, R., BOURGAIZE, S., CRÉTUAL, A. et OLIVIER, A.-H. (2021). Collision avoidance behaviours between older adult and young adult walkers. *Gait & Posture*, 88:210–215.
- [Regan et Gray, 2000] REGAN, D. et GRAY, R. (2000). Visually guided collision avoidance and collision achievement. *Trends in cognitive sciences*, 4(3):99–107.
- [Reitan, 1958] REITAN, R. M. (1958). Validity of the trail making test as an indicator of organic brain damage. *Perceptual and motor skills*, 8(3):271–276.
- [Riccio et Hynd, 1992] RICCIO, C. A. et HYND, G. W. (1992). Validity of benton’s judgement of line orientation test. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 10(3):210–218.
- [Riddle *et al.*, 2001] RIDDLE, D. L., LEE, K. T. et STRATFORD, P. W. (2001). Use of sf-36 and sf-12 health status measures : A quantative comparison for groups versus individual patients. *Medical care*, pages 867–878.
- [Ringheim *et al.*, 2015] RINGHEIM, I., AUSTEIN, H., INDAHL, A. et ROELEVELD, K. (2015). Postural strategy and trunk muscle activation during prolonged standing in chronic low back pain patients. *Gait & posture*, 42(4):584–589.
- [Robbins *et al.*, 1994] ROBBINS, T. W., JAMES, M., OWEN, A. M., SAHAKIAN, B. J., MCINNIS, L. et RABBITT, P. (1994). Cambridge neuropsychological test automated battery (cantab) : a factor analytic study of a large sample of normal elderly volunteers. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, 5(5):266–281.
- [Robinault *et al.*, 2023] ROBINAULT, L., NIAZI, I. K., KUMARI, N., AMJAD, I., MENARD, V. et HAAVIK, H. (2023). Non-specific low back pain : An inductive exploratory analysis through factor analysis and deep learning for better clustering. *Brain Sciences*, 13(6):946.

-
- [Roland, 1983] ROLAND, M. (1983). A study of the natural history of back pain, part 1 & part 2 : Roland-morris disability questionnaire. *Spine*, 8:141–150.
- [Roussel *et al.*, 2014] ROUSSEL, N., CAGNIE, B., DOLPHENS, M., STRUYF, F., DANNEELS, L., NIJS, J., OOSTENDORP, R. et MEEUS, M. (2014). Sensibilisation centrale et modification du traitement central de la douleur chez les patients souffrant de lombalgies. *Ortho-rhumato.-Kraainem, 2003, currens*, 12(3):29–35.
- [Rubinstein *et al.*, 2019] RUBINSTEIN, S. M., DE ZOETE, A., VAN MIDDELKOOP, M., ASSENDELFT, W. J., DE BOER, M. R. et VAN TULDER, M. W. (2019). Benefits and harms of spinal manipulative therapy for the treatment of chronic low back pain : systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *bmj*, 364.
- [Rubinstein *et al.*, 2011] RUBINSTEIN, S. M., van MIDDELKOOP, M., ASSENDELFT, W. J., de BOER, M. R. et van TULDER, M. W. (2011). Spinal manipulative therapy for chronic low-back pain : an update of a cochrane review. *Spine*, 36(13):E825–E846.
- [Rueda *et al.*, 2023] RUEDA, M. R., MOYANO, S. et RICO-PICÓ, J. (2023). Attention : The grounds of self-regulated cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Cognitive Science*, 14(1):e1582.
- [Ruhe *et al.*, 2011] RUHE, A., FEJER, R. et WALKER, B. (2011). Center of pressure excursion as a measure of balance performance in patients with non-specific low back pain compared to healthy controls : a systematic review of the literature. *European Spine Journal*, 20:358–368.
- [Ruhe *et al.*, 2012] RUHE, A., FEJER, R. et WALKER, B. (2012). Pain relief is associated with decreasing postural sway in patients with non-specific low back pain. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 13(1):1–12.
- [Rushton *et al.*, 1999] RUSHTON, S. K., HARRIS, J. M. et WANN, J. P. (1999). Steering, optic flow, and the respective importance of depth and retinal motion distribution. *Perception*, 28(2):255–266.
- [Sahrmann, 2001] SAHRMANN, S. (2001). *Diagnosis and Treatment of Movement Impairment Syndromes : Pageburst Retail*. Elsevier Mosby.
- [Salavati *et al.*, 2009] SALAVATI, M., MAZAHERI, M., NEGAHBAN, H., EBRAHIMI, I., JAFARI, A. H., KAZEMNEJAD, A. et PARNIANPOUR, M. (2009). Effect of dual-tasking on postural control in subjects with nonspecific low back pain. *Spine*, 34(13):1415–1421.
- [Santiago *et al.*, 2020] SANTIAGO, R. J., ESTEVES, J., BAPTISTA, J. S., MARQUES, A. T. et COSTA, J. T. (2020). Instrumentation used to assess pain in osteopathic interventions : A critical literature review. *International Journal of Osteopathic Medicine*, 37:25–33.
- [Sanz *et al.*, 2015] SANZ, F. A., OLIVIER, A.-H., BRUDER, G., PETTRÉ, J. et LÉCUYER, A. (2015). Virtual proxemics : Locomotion in the presence of obstacles in large immersive projection environments. In *2015 IEEE virtual reality (vr)*, pages 75–80. IEEE.

-
- [Saracoglu *et al.*, 2022] SARACOGLU, I., ARIK, M. I., AFSAR, E. et GOKPINAR, H. H. (2022). The effectiveness of pain neuroscience education combined with manual therapy and home exercise for chronic low back pain : A single-blind randomized controlled trial. *Physiotherapy Theory and Practice*, 38(7):868–878.
- [Sarker *et al.*, 2019] SARKER, K. K., SETHI, J. et MOHANTY, U. (2019). Effect of spinal manipulation on pain sensitivity, postural sway, and health-related quality of life among patients with non-specific chronic low back pain : A randomised control trial. *Journal of Clinical & Diagnostic Research*, 13(2).
- [Scarpina et Tagini, 2017] SCARPINA, F. et TAGINI, S. (2017). The stroop color and word test. *Frontiers in psychology*, 8:557.
- [Schiltewolf *et al.*, 2017] SCHILTENWOLF, M., AKBAR, M., NEUBAUER, E., GANTZ, S., FLOR, H., HUG, A. et WANG, H. (2017). The cognitive impact of chronic low back pain : Positive effect of multidisciplinary pain therapy. *Scandinavian journal of pain*, 17(1):273–278.
- [Selles *et al.*, 2001] SELLES, R. W., WAGENAAR, R. C., SMIT, T. H. et WUISMAN, P. I. (2001). Disorders in trunk rotation during walking in patients with low back pain : a dynamical systems approach. *Clinical Biomechanics*, 16(3):175–181.
- [Senna et Machaly, 2011] SENNA, M. K. et MACHALY, S. A. (2011). Does maintained spinal manipulation therapy for chronic nonspecific low back pain result in better long-term outcome ?
- [SH, 1990] SH, K. (1990). Kinesiophobia : a new view of chronic pain behavior. *Pain Manage*, 3:35–43.
- [Shumway-Cook *et al.*, 2023] SHUMWAY-COOK, A., WOOLLACOTT, M. H., RACHWANI, J. et SANTAMARIA, V. (2023). *Motor control : translating research into clinical practice*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [Silva *et al.*, 2018] SILVA, W. S., ARAVIND, G., SANGANI, S. et LAMONTAGNE, A. (2018). Healthy young adults implement distinctive avoidance strategies while walking and circumventing virtual human vs. non-human obstacles in a virtual environment. *Gait & posture*, 61:294–300.
- [Smith *et al.*, 2022] SMITH, J. A., STABBERT, H., BAGWELL, J. J., TENG, H.-L., WADE, V. et LEE, S.-P. (2022). Do people with low back pain walk differently ? a systematic review and meta-analysis. *Journal of Sport and Health Science*, 11(4):450–465.
- [Snyder et Cinelli, 2020] SNYDER, N. et CINELLI, M. (2020). Sensory conflict alters visual perception of action capabilities during crossing of a closing gap in virtual reality. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 73(12):2309–2316.
- [Snyder *et al.*, 2022] SNYDER, N., CINELLI, M., RAPOS, V., CRÉTUAL, A. et OLIVIER, A.-H. (2022). Collision avoidance strategies between two athlete walkers : Understan-

-
- ding impaired avoidance behaviours in athletes with a previous concussion. *Gait & Posture*, 92:24–29.
- [Snyder et Cinelli, 2022] SNYDER, N. A. et CINELLI, M. E. (2022). Aperture crossing in virtual reality : physical fatigue delays response time. *Journal of Motor Behavior*, 54(4):429–437.
- [Song et al., 2016] SONG, C.-Y., LIN, S.-F., HUANG, C.-Y., WU, H.-C., CHEN, C.-H. et HSIEH, C.-L. (2016). Validation of the brief pain inventory in patients with low back pain. *Spine*, 41(15):E937–E942.
- [Spranger et al., 2022] SPRANGER, J., HOMBERG, A., SONNBERGER, M. et NIEDERBERGER, M. (2022). Reporting guidelines for delphi techniques in health sciences : A methodological review. *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, 172:1–11.
- [Steel et al., 2020] STEEL, A., PENG, W., SIBBRITT, D. et ADAMS, J. (2020). Introducing national osteopathy practice-based research networks in australia and new zealand : an overview to inform future osteopathic research. *Scientific reports*, 10(1):846.
- [Steenstra et al., 2017] STEENSTRA, I. A., MUNHALL, C., IRVIN, E., ORANYE, N., PASSMORE, S., VAN EERD, D., MAHOOD, Q. et HOGG-JOHNSON, S. (2017). Systematic review of prognostic factors for return to work in workers with sub acute and chronic low back pain. *Journal of occupational rehabilitation*, 27:369–381.
- [Stefanucci et Geuss, 2010] STEFANUCCI, J. K. et GEUSS, M. N. (2010). Duck ! scaling the height of a horizontal barrier to body height. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(5):1338–1349.
- [Stilwell et Harman, 2019] STILWELL, P. et HARMAN, K. (2019). An enactive approach to pain : beyond the biopsychosocial model. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 18(4):637–665.
- [Stratford et Riddle, 2016] STRATFORD, P. W. et RIDDLE, D. L. (2016). A roland morris disability questionnaire target value to distinguish between functional and dysfunctional states in people with low back pain. *Physiotherapy Canada*, 68(1):29–35.
- [Strauss et al., 2006] STRAUSS, E., SHERMAN, E. M. et SPREEN, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests : Administration, norms, and commentary*. American chemical society.
- [Stroop, 1935] STROOP, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6):643.
- [Sullivan et al., 1995] SULLIVAN, M. J., BISHOP, S. R. et PIVIK, J. (1995). The pain catastrophizing scale : development and validation. *Psychological assessment*, 7(4):524.
- [Tagliaferri et al., 2022] TAGLIAFERRI, S. D., MITCHELL, U. H., SAUERESSIG, T., OWEN, P. J., MILLER, C. T. et BELAVY, D. L. (2022). Classification approaches for treating

-
- low back pain have small effects that are not clinically meaningful : a systematic review with meta-analysis. *journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 52(2):67–84.
- [Tamburin *et al.*, 2014] TAMBURIN, S., MAIER, A., SCHIFF, S., LAURIOLA, M. F., DI ROSA, E., ZANETTE, G. et MAPELLI, D. (2014). Cognition and emotional decision-making in chronic low back pain : an erps study during iowa gambling task. *Frontiers in psychology*, 5:1350.
- [Tamer *et al.*, 2017] TAMER, S., ÖZ, M. et ÜLGER, Ö. (2017). The effect of visceral osteopathic manual therapy applications on pain, quality of life and function in patients with chronic nonspecific low back pain. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation*, 30(3):419–425.
- [Taylor et Cinelli, 2021] TAYLOR, E. M. et CINELLI, M. E. (2021). The effects of human following behaviours on decision making during aperture crossing scenarios. *Gait & Posture*, 83:232–236.
- [Thomas *et al.*, 2020] THOMAS, J. S., CLARK, B. C., RUSS, D. W., FRANCE, C. R., PLOUTZ-SNYDER, R., CORCOS, D. M., INVESTIGATORS, R. S. *et al.* (2020). Effect of spinal manipulative and mobilization therapies in young adults with mild to moderate chronic low back pain : a randomized clinical trial. *JAMA network open*, 3(8):e2012589–e2012589.
- [Tissot *et al.*, 2023] TISSOT, L.-P. M., EVANS, D. W., KIRBY, E. et LIEW, B. X. W. (2023). Tampa scale of kinesiophobia may underestimate task-specific fear of movement in people with and without low back pain. *Pain Reports*, 8(4).
- [Tomono *et al.*, 2019] TOMONO, T., MAKINO, R., FURUYAMA, N. et MISHIMA, H. (2019). How does a walker pass between two people standing in different configurations ? influence of personal space on aperture passing methods. *Frontiers in Psychology*, 10:2651.
- [Tracey et Mantyh, 2007] TRACEY, I. et MANTYH, P. W. (2007). The cerebral signature for pain perception and its modulation. *Neuron*, 55(3):377–391.
- [Treede *et al.*, 2019] TREEDE, R.-D., RIEF, W., BARKE, A., AZIZ, Q., BENNETT, M. I., BENOLIEL, R., COHEN, M., EVERS, S., FINNERUP, N. B., FIRST, M. B. *et al.* (2019). Chronic pain as a symptom or a disease : the iasp classification of chronic pain for the international classification of diseases (icd-11). *pain*, 160(1):19–27.
- [Trudeau *et al.*, 2012] TRUDEAU, J., TURK, D., DWORKIN, R., BENSON, C., BIONDI, D., KIM, M., MOU, J. et KATZ, N. (2012). Validation of the hospital anxiety and depression scale (hads) in patients with acute low back pain. *The Journal of Pain*, 13(4):S24.
- [Tsao *et al.*, 2008] TSAO, H., GALEA, M. et HODGES, P. (2008). Reorganization of the motor cortex is associated with postural control deficits in recurrent low back pain. *Brain*, 131(8):2161–2171.

-
- [Tsao et Hodges, 2008] TSAO, H. et HODGES, P. W. (2008). Persistence of improvements in postural strategies following motor control training in people with recurrent low back pain. *Journal of electromyography and kinesiology*, 18(4):559–567.
- [Tsay et al., 2015] TSAY, A., ALLEN, T. J., PROSKE, U. et GIUMMARRA, M. J. (2015). Sensing the body in chronic pain : a review of psychophysical studies implicating altered body representation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 52:221–232.
- [Turk et al., 2015] TURK, D. C., DWORKIN, R. H., TRUDEAU, J. J., BENSON, C., BIONDI, D. M., KATZ, N. P. et KIM, M. (2015). Validation of the hospital anxiety and depression scale in patients with acute low back pain. *The Journal of Pain*, 16(10):1012–1021.
- [Turvey, 1992] TURVEY, M. T. (1992). Affordances and prospective control : An outline of the ontology. *Ecological psychology*, 4(3):173–187.
- [Vallis et McFadyen, 2003] VALLIS, L. A. et MCFADYEN, B. J. (2003). Locomotor adjustments for circumvention of an obstacle in the travel path. *Experimental brain research*, 152:409–414.
- [Van Basten et al., 2009] VAN BASTEN, B. J., JANSEN, S. E. et KARAMOUZAS, I. (2009). Exploiting motion capture to enhance avoidance behaviour in games. *In Motion in Games : Second International Workshop, MIG 2009, Zeist, The Netherlands, November 21-24, 2009. Proceedings 2*, pages 29–40. Springer.
- [Van Damme et al., 2002] VAN DAMME, S., CROMBEZ, G., BIJTTEBIER, P., GOUBERT, L. et VAN HOUDENHOVE, B. (2002). A confirmatory factor analysis of the pain catastrophizing scale : invariant factor structure across clinical and non-clinical populations. *Pain*, 96(3):319–324.
- [van der Meer, 1997] van der MEER, A. L. (1997). Visual guidance of passing under a barrier. *Infant and Child Development*, 6(3-4):149–158.
- [van Dieën et al., 2021] van DIEËN, J. H., PRINS, M. R., BRUIJN, S. M., WU, W. H., LIANG, B., LAMOTH, C. J. et MEIJER, O. G. (2021). Coordination of axial trunk rotations during gait in low back pain. a narrative review. *Journal of human kinetics*, 76(1):35–50.
- [Van Dieën et al., 2019] VAN DIEËN, J. H., REEVES, N. P., KAWCHUK, G., VAN DILLEN, L. R. et HODGES, P. W. (2019). Analysis of motor control in patients with low back pain : a key to personalized care? *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 49(6):380–388.
- [Van Hout et al., 2012] VAN HOUT, B., JANSSEN, M., FENG, Y.-S., KOHLMANN, T., BUSSCHBACH, J., GOLICKI, D., LLOYD, A., SCALONE, L., KIND, P. et PICKARD, A. S. (2012). Interim scoring for the eq-5d-5l : mapping the eq-5d-5l to eq-5d-3l value sets. *Value in health*, 15(5):708–715.

-
- [Van Wesemael *et al.*, 2023] VAN WESEMAEL, S., BOGAERTS, K., DE BAETS, L., GOOSSENS, N., VLEMINCX, E., AMERIJCKX, C., SOHAIL, S., MATHEVE, T. et JANSSENS, L. (2023). The association between pain-related psychological variables and postural control in low back pain : a systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*.
- [Vartiainen *et al.*, 2017] VARTIAINEN, P., MÄNTYSELKÄ, P., HEISKANEN, T., HAGELBERG, N., MUSTOLA, S., FÖRSSELL, H., KAUTIAINEN, H. et KALSO, E. (2017). Validation of eq-5d and 15d in the assessment of health-related quality of life in chronic pain. *Pain*, 158(8):1577–1585.
- [Vlaeyen *et al.*, 1995a] VLAEYEN, J. W., KOLE-SNIJDERS, A. M., BOEREN, R. G. et VAN EEK, H. (1995a). Fear of movement/(re) injury in chronic low back pain and its relation to behavioral performance. *Pain*, 62(3):363–372.
- [Vlaeyen *et al.*, 1995b] VLAEYEN, J. W., KOLE-SNIJDERS, A. M., ROTTEVEEL, A. M., RUESINK, R. et HEUTS, P. H. (1995b). The role of fear of movement/(re) injury in pain disability. *Journal of occupational rehabilitation*, 5:235–252.
- [Vos *et al.*, 2015] VOS, T., BARBER, R. M., BELL, B., BERTOZZI-VILLA, A., BIRYUKOV, S., BOLLIGER, I., CHARLSON, F., DAVIS, A., DEGENHARDT, L., DICKER, D. *et al.* (2015). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 301 acute and chronic diseases and injuries in 188 countries, 1990–2013 : a systematic analysis for the global burden of disease study 2013. *The lancet*, 386(9995):743–800.
- [Waddell, 1987] WADDELL, G. (1987). A new clinical model for the treatment of low-back pain. *Spine*, 12(7):632–644.
- [Waddell, 1992] WADDELL, G. (1992). Biopsychosocial analysis of low back pain. *Baillière's Clinical Rheumatology*, 6(3):523–557. Common Low Back Pain : Prevention of Chronicity.
- [Waddell et Burton, 2005] WADDELL, G. et BURTON, A. K. (2005). Concepts of rehabilitation for the management of low back pain. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 19(4):655–670.
- [Waddell *et al.*, 1993] WADDELL, G., NEWTON, M., HENDERSON, I., SOMERVILLE, D. et MAIN, C. J. (1993). A fear-avoidance beliefs questionnaire (fabq) and the role of fear-avoidance beliefs in chronic low back pain and disability. *Pain*, 52(2):157–168.
- [Wagner *et al.*, 2023] WAGNER, A., MÉNARD, M., JACQUOT, E., MARANGELLI, G., MERDY, O., CLOUZEAU, C., TAVERNIER, P., VERBEECK, J., VAUCHER, P., ESTEVES, J. E. *et al.* (2023). The profile of french osteopaths : A cross-sectional survey. *International Journal of Osteopathic Medicine*, page 100672.
- [Wall *et al.*, 2002] WALL, J., XU, J. et WANG, X. (2002). Human brain plasticity : an emerging view of the multiple substrates and mechanisms that cause cortical changes

-
- and related sensory dysfunctions after injuries of sensory inputs from the body. *Brain Research Reviews*, 39(2-3):181–215.
- [Wang *et al.*, 2019] WANG, S.-Q., CHEN, M., WEI, X., GAO, X.-X. et ZHAO, G.-D. (2019). Clinical research on lumbar oblique-pulling manipulation in combination with sling exercise therapy for patients with chronic nonspecific low back pain. *Revista da Associação Médica Brasileira*, 65:886–892.
- [Warren, 1984] WARREN, W. H. (1984). Perceiving affordances : visual guidance of stair climbing. *Journal of experimental psychology : Human perception and performance*, 10(5):683.
- [Warren, 2021] WARREN, W. H. (2021). Information is where you find it : Perception as an ecologically well-posed problem. *i-Perception*, 12(2):20416695211000366.
- [Warren et Fajen, 2008] WARREN, W. H. et FAJEN, B. R. (2008). Behavioral dynamics of visually guided locomotion. In *Coordination : neural, behavioral and social dynamics*, pages 45–75. Springer.
- [Warren Jr et Whang, 1987] WARREN JR, W. H. et WHANG, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 13(3):371.
- [Wechsler, 1945] WECHSLER, D. (1945). Wechsler memory scale.
- [Wechsler, 2008] WECHSLER, D. (2008). Wechsler adult intelligence scale–fourth edition (wais–iv). *San Antonio, TX : NCS Pearson*, 22(498):1.
- [Wechsler III, 2001] WECHSLER III, D. (2001). Mem-iii. *Échelle clinique de mémoire de Wechsler : manuel. les Éd. du Centre de psychologie appliquée*.
- [Wertli *et al.*, 2014] WERTLI, M. M., RASMUSSEN-BARR, E., WEISER, S., BACHMANN, L. M. et BRUNNER, F. (2014). The role of fear avoidance beliefs as a prognostic factor for outcome in patients with nonspecific low back pain : a systematic review. *The spine journal*, 14(5):816–836.
- [WHO, 2023] WHO (2023). *The WHO guideline for non-surgical management of chronic primary low back pain in adults in primary and community care settings*. WHO.
- [Wicksell *et al.*, 2010] WICKSELL, R. K., LEKANDER, M., SORJONEN, K. et OLSSON, G. L. (2010). The psychological inflexibility in pain scale (pips)–statistical properties and model fit of an instrument to assess change processes in pain related disability. *European Journal of Pain*, 14(7):771–e1.
- [Wilmot et Barnett, 2010] WILMUT, K. et BARNETT, A. L. (2010). Locomotor adjustments when navigating through apertures. *Human Movement Science*, 29(2):289–298.
- [Wilmot et Barnett, 2011] WILMUT, K. et BARNETT, A. L. (2011). Locomotor behaviour of children while navigating through apertures. *Experimental Brain Research*, 210:185–194.

-
- [Wilmot *et al.*, 2015] WILMUT, K., DU, W. et BARNETT, A. L. (2015). How do i fit through that gap? navigation through apertures in adults with and without developmental coordination disorder. *PLoS One*, 10(4):e0124695.
- [Wilson *et al.*, 1989] WILSON, B., COCKBURN, J., BADDELEY, A. et HIORNS, R. (1989). The development and validation of a test battery for detecting and monitoring everyday memory problems. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 11(6):855–870.
- [Wippert *et al.*, 2017] WIPPERT, P.-M., PUSCHMANN, A.-K., DRIESSLEIN, D., ARAMPATZIS, A., BANZER, W., BECK, H., SCHILTENWOLF, M., SCHMIDT, H., SCHNEIDER, C. et MAYER, F. (2017). Development of a risk stratification and prevention index for stratified care in chronic low back pain. focus : yellow flags (mispex network). *Pain reports*, 2(6).
- [Wippert *et al.*, 2020] WIPPERT, P.-M., PUSCHMANN, A.-K., DRIESSLEIN, D., BANZER, W., BECK, H., SCHILTENWOLF, M., SCHNEIDER, C. et MAYER, F. (2020). Personalized treatment suggestions : The validity and applicability of the risk-prevention-index social in low back pain exercise treatments. *Journal of Clinical Medicine*, 9(4):1197.
- [Woolf, 2011] WOOLF, C. J. (2011). Central sensitization : implications for the diagnosis and treatment of pain. *pain*, 152(3):S2–S15.
- [Yadollahpour *et al.*, 2020] YADOLLAHPOUR, N., ZAHEDNEJAD, S., YAZDI, M. J. S. et ESFANDIARPOUR, F. (2020). Clustering of patients with chronic low back pain in terms of physical and psychological factors : a cross-sectional study based on the start back screening tool. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 33(4):581–587.
- [Yağcı *et al.*, 2020] YAĞCI, N., ŞİMŞEK, Ş., TELCI, E. A. et ÇUBUKÇU, M. M. (2020). The effect of soft tissue mobilization on pain, disability level and depressive symptoms in patients with chronic low back pain. *ANNALS OF CLINICAL AND ANALYTICAL MEDICINE*.
- [Yam *et al.*, 2018] YAM, M. F., LOH, Y. C., TAN, C. S., KHADIJAH ADAM, S., ABDUL MANAN, N. et BASIR, R. (2018). General pathways of pain sensation and the major neurotransmitters involved in pain regulation. *International journal of molecular sciences*, 19(8):2164.
- [Yu *et al.*, 2021] YU, Q., HUO, Y., CHEN, M., ZHANG, Z., LI, Z., LUO, H., LIANG, Z., WANG, C., LO, W. L. A. *et al.* (2021). A study on the relationship between postural control and pain-related clinical outcomes in patients with chronic nonspecific low back pain. *Pain Research and Management*, 2021.
- [Zafereo *et al.*, 2018] ZAFEREO, J., WANG-PRICE, S., RODDEY, T. et BRIZZOLARA, K. (2018). Regional manual therapy and motor control exercise for chronic low back pain : a randomized clinical trial. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*, 26(4):193–202.
- [Zangrando *et al.*, 2017] ZANGRANDO, F., PICCININI, G., TAGLIOLINI, C., MARSILLI, G., IOSA, M., VULPIANI, M. C. et PAOLUCCI, T. (2017). The efficacy of a preparatory phase

of a touch-based approach in treating chronic low back pain : a randomized controlled trial. *Journal of pain research*, pages 941–949.

[Zerkak *et al.*, 2013] ZERKAK, D., MÉTIVIER, J.-C., FOUQUET, B. et BEAUDREUIL, J. (2013). Validation of a french version of roland–morris questionnaire in chronic low back pain patients. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 56(9-10):613–620.

[Zhu *et al.*, 2000] ZHU, Y., HALDEMAN, S., HSIEH, C.-Y. J., WU, P. et STARR, A. (2000). Do cerebral potentials to magnetic stimulation of paraspinal muscles reflect changes in palpable muscle spasm, low back pain, and activity scores? *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 23(7):458–464.

[Zigmond et Snaith, 1983] ZIGMOND, A. S. et SNAITH, R. P. (1983). The hospital anxiety and depression scale. *Acta psychiatrica scandinavica*, 67(6):361–370.

[Zuckerman, 1999] ZUCKERMAN, M. (1999). Diathesis-stress models.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LCNS : Lombalgie chronique non-spécifique

TM : Thérapie manuelle

AP : Antéro-postérieur

ML : Médio-latéral

CdP : Centre de pression

CdM : Centre de masse

LISTE DES TABLEAUX

1	Caractéristiques des études incluses.	52
2	Évaluation du risque de biais pour chaque étude.	54
3	Caractéristiques des participants de l'étude PERL1.	123
4	Caractéristiques des participants pour le protocole de recherche PERL2. . .	143
5	Nombre d'essais où les participants ont franchi l'ouverture large (1,8) pour chaque but à atteindre dans les conditions <i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i> .	147
6	Nombre de participants ayant franchi l'ouverture large pour chaque but à atteindre et chaque condition.	150
7	Nombre de participants ayant franchi l'ouverture étroite pour chaque but à atteindre et chaque condition.	150
8	Paramètres de dispersion des scores aux échelles et questionnaires portant sur la perception douloureuse.	168
9	Caractéristiques des participants pour le protocole de recherche PERL3. . .	190
10	Nombre d'essais où les participants ont contribué négativement à l'interac- tion pour chaque groupe d'interaction lorsque les participants sont passés premiers.	197
11	Coefficient de variation pour les trois études en fonction des scores obtenus pour chaque variable aux échelles et questionnaires portant sur les facteurs accompagnant la douleur.	210
12	Nombre de participants pour chaque étude présentant un score aux échelles et questionnaires supérieur au score de coupure.	211

TABLE DES FIGURES

1	Prévalence de la douleur chronique en Europe d'après Breivik et al. [Breivik et al., 2006].	3
2	Plans douleur : 30 ans d'avancées ¹	4
3	Schéma général des voies de la douleur d'après Fields [Fields, 2004].	14
4	Tâche de tri de cartes d'après Morton [Morton, 1969].	19
5	Tâche de <i>Stroop</i> d'après Stroop [Stroop, 1935].	20
6	Tâche du <i>Trail Making Test</i> d'après Reitan [Reitan, 1958].	24
7	Tâche du <i>Wisconsin Card Sorting Test</i> d'après Heaton et Staff [Heaton et Staff, 1993].	25
8	Tâche du <i>Judgement of Line Orientation</i> d'après Riccio et Hynd [Riccio et Hynd, 1992].	28
9	Tâche du <i>Digit Symbol Substitution Test</i> d'après Lezak [Lezak, 2004].	28
10	a. Tâche du <i>Stocking of Cambridge</i> et b. Tâche du <i>Choice Reaction Time</i> d'après Robbins et al. [Robbins et al., 1994] (b. image modifiée de Burke et al. [Burke et al., 2017].)	29
11	Le modèle de peur et d'évitement ou de peur liée à la douleur adapté de Linton et Shaw [Linton et Shaw, 2011].	34
12	Le modèle d'acceptation et d'engagement adapté de Hayes et al. [Hayes et al., 2006].	36
13	Le modèle de résolution de problèmes mal orientée adapté de Eccleston et Crombez [Eccleston et Crombez, 2007].	37
14	Le modèle stress-diathèse d'après Zuckerman [Zuckerman, 1999].	38
15	Éléments de l'examen systématique sous forme de diagramme de flux montrant le processus d'identification, de sélection, d'éligibilité et d'inclusion.	49
16	Nombre d'études publiées par années (a.) et Nombre d'études publiées par pays (b.) entre 2010 et 2023.	50
17	Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés par catégories principales et domaines pour l'ensemble des études incluses.	55
18	Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés dans la catégorie principale " <i>Impact sur la vie</i> ", par domaines et par critères d'évaluation.	56

19	Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés dans la catégorie principale " <i>Manifestations pathophysiologiques</i> " par domaines et par critères d'évaluation.	57
20	Représentation graphique du nombre d'outils de mesure répertoriés par catégories principales et domaines pour les études avec une bonne et une excellente qualité méthodologique.	58
21	Paradigme de passage à travers une ouverture horizontale (a.) et verticale (b.) d'après Franchak et al. [Franchak <i>et al.</i> , 2012].	82
22	Vue latérale (a.) et vue frontale (b.) du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales d'après Hackney et al. [Hackney et Cinelli, 2011].	83
23	Vue frontale du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir une modification du contexte situationnel : sans modification (a.), chemin étroit (b.) et chemin étroit et surélevé (c.) d'après Hackney et al. [Hackney <i>et al.</i> , 2015a].	86
24	Vue latérale (a.) et conditions expérimentales (b.) du protocole de passage à travers des ouvertures horizontales d'après Higuchi et al. [Higuchi <i>et al.</i> , 2006].	88
25	Vue latérale (a.) et vue du dessus (b.) du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales dans un espace non-confiné d'après Hackney et al. [Hackney <i>et al.</i> , 2014].	89
26	Vue frontale du dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux : ouverture formée par deux poteaux (a.) et ouverture formée par deux humains (b.) d'après Hackney et al. [Hackney <i>et al.</i> , 2015b].	92
27	Dispositif expérimental du passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir des facteurs sociaux et environnementaux : a. mise en évidence de la forme anisotrope de l'espace personnel et b. configuration des humains placés à la place des poteaux, c. ouverture formée par deux panneaux, d. ouverture formée par deux humains et e. ouverture formée par deux humains placés dans des cadres en forme de boîte normalisant les niveaux du corps humain d'après Tomono et al. [Tomono <i>et al.</i> , 2019].	94
28	Conditions expérimentales d'une tâche décisionnelle de passage à travers des ouvertures horizontales faisant intervenir des facteurs sociaux et environnementaux d'après Makino et al. [Makino <i>et al.</i> , 2023]. "L" correspond à la direction gauche vers laquelle est tournée la forme humanoïde. "R" correspond à la direction droite vers laquelle est tournée la forme humanoïde.	95

29	Dispositif expérimental de la tâche de croisement de piéton : a. Photo du dispositif et b. représentation du dispositif d'après Berton et al. [Berton <i>et al.</i> , 2019].	98
30	Dispositif expérimental de la tâche de croisement de piétons arrivant l'un en face de l'autre d'après Pfaff et al. [Pfaff et Cinelli, 2018].	100
31	Dispositif expérimental de la tâche de croisement de piéton selon différents angles de croisement d'après Huber et al. [Huber <i>et al.</i> , 2014].	101
32	Dispositif expérimental de la tâche d'évitement de piéton faisant varier le contexte situationnel et individuel d'après Bourgaize et al. [Bourgaize <i>et al.</i> , 2019].	103
33	Photo du gymnase expérimental	114
34	Photo de l'expérience PERL 1 (a.) et illustration d'un participant traversant une ouverture de 0,95 (b. et c.).	114
35	Vue latérale (a.) et vue frontale (b.) du dispositif expérimental où les participants devaient traverser des ouvertures horizontales de 0,9 à 1,8 fois la largeur de leurs épaules (par incréments de 0,05).	116
36	Représentation des phases analysées pour les variables cinématiques.	120
37	Seuil critique pour les deux groupes LCNS et AA.	124
38	Caractéristiques cinématiques de la marche pendant la phase d'approche et à <i>tcross</i> : a. angle de rotation des épaules, b. déphasage entre les angles scapulaire et pelvien et c. vitesse de marche.	126
39	Configuration de la zone expérimentale du protocole de recherche PERL2.	136
40	Schéma expérimental du protocole de recherche PERL2. a. Condition <i>Sym</i> . b. Condition <i>Asym</i> . c. Condition <i>HumEtroite</i> . d. Condition <i>HumLarge</i>	139
41	Représentation graphique du choix de l'ouverture franchie en fonction du but à atteindre pour les quatre conditions : a. Condition <i>Sym</i> , b. Condition <i>Asym</i> , c. Condition <i>HumEtroite</i> et d. Condition <i>HumLarge</i>	146
42	Vitesse de marche au moment du franchissement en fonction du but à atteindre et de l'ouverture franchie pour les conditions a. <i>Sym</i> et b. <i>Asym</i>	152
43	Vitesse de marche au moment du franchissement de l'ouverture large en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5").	153
44	Vitesse de marche au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").	154

45	Zone de dégagement en valeur absolue et en valeur relative au moment du franchissement en fonction du but à atteindre pour la condition <i>Sym</i> (respectivement a. et b.) et pour la condition <i>Asym</i> (respectivement c. et d.).	157
46	Zone de dégagement en valeur absolue au moment du franchissement de l'ouverture large en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5").	159
47	Zone de dégagement en valeur relative au moment du franchissement de l'ouverture large en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("-2,7", "-1,8", "-0,9", "0" et "0,5").	161
48	Zone de dégagement en valeur absolue au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").	162
49	Zone de dégagement en valeur relative au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").	163
50	Angle de rotation des épaules au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").	165
51	Déphasage au moment du franchissement de l'ouverture étroite en fonction de la condition (<i>Asym</i> , <i>HumEtroite</i> et <i>HumLarge</i>) et du but à atteindre ("0,5", "1" et "1,5").	167
52	Schéma expérimental du protocole de recherche PERL 3.	182
53	Évolution de $mpd(m)$ à t_{see} (a.) et à t_{cross} (b.).	186
54	Représentation du calcul du seuil en effectuant une bi-régression linéaire avec la distance minimale à t_{cross} en fonction de la distance minimale prédite à t_{see} .	187
55	Pourcentage des inversions de l'ordre de passage pour les quatre groupes d'interaction.	191
56	Détermination du seuil de la distance future de croisement en deçà duquel une manoeuvre d'évitement de collision est mise en place, selon la méthode de Berton et al. [Berton <i>et al.</i> , 2019] pour l'ensemble des interactions.	192
57	Évolution de mpd au cours du temps pour chaque groupe d'interaction.	193
58	Distance de croisement à $t(cross)$ pour chaque groupe d'interaction.	193

59	Contribution (moyenne et écart-type) de mpd(t) du marcheur 1 et du marcheur 2 pour les groupes : A) interactions AA - AA, B) interactions LCNS-AA, C) interactions AA-LCNS et D) interactions LCNS-LCNS. Les différences significatives au cours de la période d'interaction entre le marcheur qui passe en premier et le marcheur qui passe en second sont représentées par des lignes horizontales en bas de chaque graphique ($p < 0,001$). Elles caractérisent la période pendant laquelle cette différence est significative.	194
60	Contribution totale (médiane et inter-quartile) de mpd entre les marcheurs passant premiers (a.) et les marcheurs passant seconds (b.) pour les interactions : A) AA-AA, B) LCNS-AA, C) AA-LCNS et D) LCNS-LCNS.	196
61	Comparaison entre les trois études pour les scores obtenus aux échelles et questionnaires pour chaque variable portant sur les facteurs accompagnant la douleur.	210

Titre : Stratégies perceptivo-motrices durant la locomotion des patients atteints de lombalgie chronique non-spécifique : vers de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi.

Mot clés : lombalgie chronique, stratégies perceptivo-motrice, locomotion, interaction, évaluation.

Résumé : La lombalgie chronique non spécifique (LCNS) a été identifiée comme l'une des principales causes d'invalidité dans le monde. Elle est évaluée majoritairement grâce à des échelles ou questionnaires, rapportant l'influence de facteurs cognitifs, émotionnels et comportementaux. Cependant, peu d'études l'ont évaluée dans des situations de la vie quotidienne, telles que passer à travers une ouverture de porte ou éviter un piéton sur sa trajectoire. L'objectif de cette thèse a été d'évaluer l'influence de la LCNS dans des paradigmes de locomotion en interaction avec l'environnement, faisant intervenir des facteurs situationnels et sociaux afin de proposer de nouvelles méthodes d'analyse et de suivi des patients. Les participants LCNS ont été comparés à des adultes asymptomatiques (AA) dans 3 tâches de marche dirigée vers un but : 1)

une tâche de passage à travers différentes largeurs d'ouvertures où les participants LCNS ont cessé de tourner leurs épaules pour une ouverture plus étroite que les AA, 2) une tâche faisant intervenir des facteurs situationnels (ouverture large ou étroite) et sociaux (expérimentateur au milieu des deux ouvertures) où les participants LCNS modifient leur décision de franchir une ouverture en fonction des facteurs situationnels, et 3) une tâche de croisement de piétons où les participants LCNS semblent bien percevoir les conditions de l'interaction (seuil de déclenchement d'une adaptation et distance de croisement) mais contribuent différemment. En conclusion, la LCNS semble affecter les décisions des participants utilisant des stratégies perceptivo-motrices basées sur le contexte situationnel plutôt que sur le contexte social.

Title: Perceptual-motor strategies during locomotion in patients with chronic non-specific low back pain: towards new methods of analysis and follow-up.

Keywords: chronic low back pain, perceptual-motor strategies, locomotion, interaction, evaluation.

Abstract: Chronic non-specific low back pain (cNSLBP) has been identified as one of the leading causes of disability worldwide. It is mainly assessed using scales or questionnaires, reporting the influence of cognitive, emotional and behavioural factors. However, few studies have assessed it in everyday situations, such as passing through a doorway or avoiding a pedestrian in the path. The aim of this thesis was to evaluate the influence of cNSLBP in locomotion paradigms interacting with the environment, involving situational and social factors, in order to propose new methods for analysing and follow-up patients. cNSLBP participants were compared to asymptomatic adults (AA) in 3 goal-directed walking tasks: 1) a task of passing through dif-

ferent widths of apertures where cNSLBP participants stopped turning their shoulders for a narrower opening than AA, 2) a task involving situational (wide or narrow aperture) and social factors (experimenter in the middle of the two apertures) where cNSLBP participants modified their decision to pass through an aperture according to the situational factors, and 3) a pedestrian crossing task where cNSLBP participants seemed to perceive the interaction conditions well (threshold for triggering an adaptation and crossing distance) but contributed differently. In conclusion, cNSLBP seems to affect the decisions of participants using perceptual-motor strategies based on the situational context rather than the social context.