



Facteurs prédictifs de la qualité du contrôle postural et de sa compensation dans les pathologies traumatiques et dégénératives du genou

Laetitia Peultier-Celli

► To cite this version:

Laetitia Peultier-Celli. Facteurs prédictifs de la qualité du contrôle postural et de sa compensation dans les pathologies traumatiques et dégénératives du genou. Médecine humaine et pathologie. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0150 . tel-01905030

HAL Id: tel-01905030

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01905030>

Submitted on 1 Jul 2019

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

École Doctorale BioSE (Biologie – Santé – Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

Par Laetitia PEULTIER-CELLI

**Facteurs prédictifs de la qualité du contrôle postural et
de sa compensation dans les pathologies traumatiques
et dégénératives du genou.**

le 15 septembre 2017

MEMBRES DU JURY :

Rapporteurs :

Mme Naïma DEGGOUJ

Professeur, Université de Catholique de Louvain, Belgique

Mme Gaëlle QUARCK

Maître de Conférences-HDR, Université de Caen Basse-Normandie

Examineurs :

Mme Isabelle CHARY-VALCKENAERE

Professeur, Université de Lorraine

M. Herman KINGMA

Professeur, Université de Maastricht, Pays-Bas

M. Jean PAYSANT

Professeur, Université de Lorraine - Co-directeur de Thèse

M. Philippe PERRIN

Professeur, Université de Lorraine - Directeur de Thèse

M. Hannes PETERSEN

Professeur, Université d'Islande, Islande

Mme Dominique VIBERT

Professeur, Université de Berne, Suisse

Membres invités :

M. Mans MAGNUSSON

Professeur, Université de Lund, Suède

M. Art MALLINSON

PhD, Vancouver General Hospital, Canada

M. Frank WEIN

Chirurgien orthopédiste, Médipôle de Gentilly, Nancy



EA 3450 DevAH – Développement, Adaptation et Handicap
Régulations cardio-respiratoires et de la motricité Université de Lorraine
Faculté de Médecine et UFR STAPS de Nancy

Laboratoire d'Analyse de la Posture, de l'Équilibration et de la Motricité (LAPEM)
Hôpitaux de Brabois, CHRU de Nancy

*« La vie, c'est comme une bicyclette,
il faut avancer pour ne pas perdre
l'équilibre »*

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

La thèse est un travail de longue haleine, comme un défi lancé contre soi-même. En préambule, je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont conseillée tout au long de ce projet, qui ont contribué à la réussite de ce troisième cycle universitaire et qui m'ont, tout simplement, aidée à relever ce défi.

Mes remerciements s'adressent au Professeur **Philippe Perrin**, directeur de l'EA 3450 DevAH – Développement, Adaptation et Handicap et du Laboratoire d'Analyse, de la Posture, de l'Equilibration et de la Motricité (LAPEM) au CHRU de Nancy, pour son accueil au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour son soutien indéfectible et ses encouragements permanents. Puisse cette thèse représenter l'expression de ma reconnaissance.

Je tiens à remercier sincèrement le Professeur **Jean Paysant**, directeur de l'IRR, pour avoir accepté de co-encadrer ce travail de thèse et pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Un merci particulier au Professeur **Naïma Deggouj** et au Dr. **Gaëlle Quarck** de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de ce travail de thèse.

Je remercie le Professeur **Didier Mainard** pour son implication dans mon Comité de Suivi de Thèse. Un très grand merci au Dr. **Frank Wein** pour son investissement dans le projet Thermasport et pour avoir accepté de juger ce travail. Merci également au Dr. **Nicolas Paris** et à l'ensemble des chirurgiens orthopédistes impliqués dans le projet : Dr. **Manuela Barla**, Dr. **Rémi Belleville**, Dr. **Benoît Goudot**, Dr. **Jean-Baptiste Gross**, Dr. **Nicolas Hummer**, Dr. **Michael Mangin**, Dr. **Maurice Morel** et Dr. **Vincent Seivert**. Sans eux ce travail de thèse n'aurait pas été possible.

Un grand merci au Professeur **Isabelle Chary-Valckenaere** pour son aide précieuse, ses conseils dans la rédaction des articles scientifiques, le temps qu'elle y a consacré et pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie les Professeurs **Herman Kingma**, **Mans Magnusson**, **Hannes Peterson**, **Dominique Vibert** et le Dr. **Art Mallinson** qui m'ont fait le très grand plaisir de juger ce travail de thèse.

Je tiens à remercier la **Métropole du Grand Nancy**, en particulier Madame **Marie-Catherine Tallot** pour avoir accepté l'appui financier qui m'a permis de réaliser ma thèse sur le projet Thermasport et le Dr. **André Rossinot**, Président de la Métropole.

Je remercie sincèrement les Professeurs **Michel Boulangé** et **Gisèle Kanny** en tant que médecins investigateurs pour le temps qu'ils ont consacré à cette étude et leurs conseils avisés.

Je remercie tout particulièrement **Patrick Boisseau, Alexandre Ferry** et l'ensemble des masseurs-kinésithérapeutes, **Johnny Afonso, Xavier Celli, Jessy Courtier, Suzy Diller, Jean-Philippe De Jesus Goncalves, Antoine Fourcaux, Laureline Grajon, Elodie Jussy, Angélique Labey, Thibaut Lombardet, Aurélie Muller, Camille Pons** et **Thomas Wysocki** pour leur implication dans l'étude Thermasport et leur bonne humeur.

J'aimerais adresser un remerciement à « l'expert » des appareils, **Alexis Lion**, pour avoir pris le temps de me former sur les différents outils mais également pour son aide dans la rédaction des articles scientifiques. Je tiens également à remercier **Zheng Zhang** pour m'avoir accompagnée au cours de mes premiers pas en posturographie.

Merci à Monsieur **René Gueguen**, le roi des statistiques, pour avoir partagé avec moi ses connaissances.

Un grand merci à **Guillaume Mornieux** pour son aide sur la partie méthodologique de l'étude Thermasport.

Je souhaite remercier **Julien Frère** pour ses qualités pédagogiques et ses cours passionnants sur le langage MATLAB.

Un grand merci à l'ensemble des sujets qui ont bien voulu prendre part à cette étude et qui ont accepté de prêter leur corps (et surtout leurs genoux !) à la recherche.

Une large pensée à mes amis, **Claire, Elodie, Sophie, Ludovic, Bastien, Gaëlle, Line**...pour m'avoir aidée, pour m'avoir changé les idées au cours de ce long travail de thèse et permis de m'évader ne serait-ce que quelques heures.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance à **mes beaux-parents**, ainsi qu'à **mes belles-sœurs** pour leur soutien et pour m'avoir toujours accueillie si gentiment. Dans l'attente d'avoir la possibilité de leur rendre la pareille. Infiniment merci...

Une pensée à **Seb** et **Jérém**. Parce qu'après tout vous êtes mes frères et que sans vous, la vie serait moins drôle.

Un tendre merci à **Emilie**, ma sœur jumelle, pour tous les bons moments passés ensemble, pour nos regards et nos fous rires que personne ne peut comprendre à part nous. Merci également à **Damien** pour m'avoir pendant quelques mois si gentiment prêté son « ancêtre ».

J'adresse mes plus sincères remerciements à ceux qui ont veillé sur moi depuis toujours, pour leur soutien, leur patience, pour m'avoir poussée à l'excellence et à la perfection au cours de toutes ces années d'études...**mes parents**. Merci pour tout...

Une pensée toute particulière à **Florian**, mon tendre et cher amour pour son soutien quotidien et son optimisme à tout égard ! De Nancy à Berlin, de Berlin à Paris, de Paris à Nancy...même si certains choix ont pu être difficiles, sache que rien ne me rend plus heureuse que d'être auprès de toi. Que cette thèse soit, non pas la mienne, mais la nôtre. Tout simplement...merci !

De façon générale, j'exprime ma gratitude à l'ensemble des personnes que j'ai pu rencontrer au cours de mon doctorat, qui ont contribué, de près ou de loin, à ce projet et à cette expérience et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
II. ANATOMIE DU GENOU ET ORGANISATION DE LA FONCTION D'ÉQUILIBRATION.....	5
II.1. ANATOMIE ET BIOMÉCANIQUE DE L'ARTICULATION DU GENOU	6
II.1.1. Articulation du genou.....	6
II.1.2. Stabilité de l'articulation du genou	6
<i>II.1.2.1. Stabilité passive du genou</i>	<i>6</i>
<i>II.1.2.2. Stabilité active du genou.....</i>	<i>9</i>
II.2. ORGANISATION DE LA FONCTION D'ÉQUILIBRATION	9
II.2.1. Équilibre et posture	9
II.2.2. Afférences somesthésiques	11
II.2.3. Traitement central des informations sensorielles	11
II.2.4. Réponses motrices.....	13
III. ÉTUDE 1 : RÉÉDUCATION EN MILIEU AQUATIQUE APRÈS LIGAMENTOPLASTIE DU GENOU CHEZ LE SPORTIF.....	15
III.1. INTRODUCTION.....	16
III.1.1 Mécanismes de rupture du LCA	16
III.1.2 Rupture du LCA et contrôle postural.....	16
III.1.3. Ligamentoplastie du genou	18
III.1.4. Rééducation post-ligamentoplastie	19
III.2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	22
III.3. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	23
III.3.1. Participants.....	23
III.3.2. Protocole de rééducation.....	23
<i>III.3.2.1. Protocole de rééducation dit « conventionnel ».....</i>	<i>24</i>
<i>III.3.2.2. Protocole de rééducation dit « innovant »</i>	<i>25</i>
III.3.3. Mesures	26
<i>III.3.3.1. Test posturographique.....</i>	<i>27</i>
<i>III.3.3.2 Tests d'évaluation de la récupération</i>	<i>30</i>
<i>III.3.3.3. Questionnaires</i>	<i>39</i>

III.3.4. Méthode	41
III.3.4.1. Randomisation.....	41
III.3.4.2. Analyse statistique.....	41
III.4. RÉSULTATS.....	43
III.4.1. Caractéristiques de la cohorte	43
III.4.1.1. Données anthropométriques	45
III.4.1.2. Pratique d'activités physiques et origine lésionnelle.....	45
III.4.1.3. Technique chirurgicale	47
III.4.2. Analyse transversale	47
III.4.2.1. Tests d'équilibre.....	47
III.4.2.2. Evaluation cinématique.....	57
III.4.2.3. Évaluation de la douleur	58
III.4.2.4. Évaluation proprioceptive.....	59
III.4.2.5. Amplitudes articulaires	60
III.4.2.6. Trophicité	62
III.4.2.7. Évaluation manuelle de la force musculaire.....	63
III.4.2.8. Performance de marche	64
III.4.2.9. Test d'isocinétisme	65
III.4.2.10. Questionnaires	67
III.4.3. Analyse longitudinale	72
III.4.3.1. Tests d'équilibre.....	72
III.4.3.2. Évaluation cinématique.....	77
III.4.3.3. Évaluation de la douleur	79
III.4.3.4. Évaluation proprioceptive.....	81
III.4.3.5. Amplitudes articulaires	82
III.4.3.6. Trophicité	85
III.4.3.7. Évaluation manuelle de la force musculaire.....	86
III.4.3.8. Performance de marche	89
III.4.3.9. Questionnaires	90
III.5. DISCUSSION	94
III.6. CONCLUSION	100
IV. ÉTUDE 2 : INFLUENCE DES ÉLÉMENTS MÉTÉOROLOGIQUES SUR LE CONTRÔLE POSTURAL ET LA DOULEUR DES PATIENTS PRÉSENTANT UNE ARTHROSE DU GENOU	101

IV.1. INTRODUCTION.....	102
IV.1.1. Arthrose du genou.....	102
IV.1.2. Gonarthrose et contrôle postural.....	103
IV.1.3. Arthrose et paramètres météorologiques	103
IV.2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	106
IV.3. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	107
IV.3.1. Participants	107
IV.3.2. Mesures.....	107
IV.3.2.1. <i>Test posturographique</i>	107
IV.3.2.2. <i>Échelle Visuelle Analogique</i>	108
IV.3.2.3. <i>Paramètres météorologiques</i>	108
IV.3.3. Méthode	108
IV.3.3.1. <i>Procédure</i>	108
IV.3.3.2. <i>Analyse statistique</i>	109
IV.4. RÉSULTATS.....	111
IV.4.1. Caractéristiques de la cohorte	111
IV.4.2. Effet des paramètres météorologiques sur le contrôle postural	113
IV.4.3. Effet de l'âge et du sexe sur le contrôle postural.....	114
IV.4.4. Effet des paramètres météorologiques sur la douleur.....	114
IV.5. DISCUSSION	115
IV.6. CONCLUSION.....	118
V. DISCUSSION GÉNÉRALE	119
VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	122
VII. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	124
VIII. ANNEXES	142
ANNEXE 1 - ARTICLE IN FRONTIERS IN SURGERY, 2017.....	143
ANNEXE 2 – POSTER PRÉSENTÉ AU CONGRÈS POSTURE, ÉQUILIBRE, MOUVEMENT, 2016.....	154
ANNEXE 3 - ARTICLE IN INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY, 2017	156
ANNEXE 4 – ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX THERMALES.....	165
ANNEXE 5 - CALENDRIER DE L'ÉTUDE THERMASPORT	168

ANNEXE 6 - DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES DU CALCUL DU CENTRE DE GRAVITÉ	170
ANNEXE 7 – ALGORITHME POUR L’ANALYSE DES DONNÉES DES CAPTEURS BIOVAL.....	173
ANNEXE 8 - CONSIGNES DU 6 MINUTES “WALKING TEST”.....	177
ANNEXE 9 - FICHE DE TEGNER ET LYSHOLM.....	180
ANNEXE 10 - QUESTIONNAIRE IKDC.....	184
ANNEXE 11 - QUESTIONNAIRE DU GENOU KOOS.....	190
ANNEXE 12 - AUTO-QUESTIONNAIRE SUR LA PRATIQUE DES ACTIVITÉS PHYSIQUES ET SPORTIVES	198
ANNEXE 13 - AUTO-QUESTIONNAIRE DES PARAMÈTRES SOCIAUX ET PROFESSIONNELS	200

TABLEAUX

Tableau I : Paramètres pris en charge à chaque séance de rééducation en milieu aquatique.	26
Tableau II : Entrées sensorielles présentes (blanc), faussées (gris) ou supprimées (noir) dans chaque condition sensorielle du test d'équilibre.	29
Tableau III : Évaluation de la force musculaire du quadriceps.	35
Tableau IV : Évaluation de la force musculaire des ischio-jambiers.	37
Tableau V : Moyenne et écart-type de l'âge, de la taille, du poids et de l'indice de masse corporelle observés chez les patients du protocole de rééducation conventionnel et du protocole de rééducation innovant.	45
Tableau VI : Pratique d'activités physiques et sportives.	45
Tableau VII : Comparaison de la surface couverte (en mm ²) par le centre de pression des pieds dans les deux groupes de rééducation, à chaque évaluation.	48
Tableau VIII : Comparaison de la longueur parcourue (en mm) par le centre de pression des pieds dans les deux groupes de rééducation, à chaque évaluation.	50
Tableau IX : Comparaison des ratios somesthésique, visuel et vestibulaire entre les deux groupes de rééducation.	53
Tableau X : Comparaison de la latéralisation (en mm) entre les deux groupes de rééducation et en fonction du côté pathologique.	56
Tableau XI : Comparaison des stratégies d'équilibre utilisées dans les deux groupes de rééducation. .	58
Tableau XII : Comparaison des amplitudes articulaires (en degrés) du genou lésé entre les deux groupes de rééducation lors du maintien de l'équilibre sur un plateau de Freeman.	58
Tableau XIII : Comparaison de la douleur entre les deux groupes de rééducation à chaque évaluation.	59
Tableau XIV : Test de proprioception permettant d'apprécier la différence d'amplitude angulaire (en degrés) entre une position initiale du genou et une position de remplacement entre les deux groupes de rééducation.	60

Tableau XV : Comparaison des amplitudes articulaires en flexion et en extension (en degrés) entre les deux groupes de rééducation.	61
Tableau XVI : Évaluation de la trophicité par le test du godet entre les deux groupes de rééducation, au niveau du membre opéré.....	62
Tableau XVII : Comparaison de la force musculaire des muscles quadriceps et ischio-jambiers entre les deux groupes de rééducation.....	63
Tableau XVIII : Performance de marche (en mètres) lors du test des six minutes marche dans les deux groupes de rééducation.	65
Tableau XIX : Comparaison de la force musculaire et du déficit musculaire par isocinétisme entre les deux groupes de rééducation six mois après l'intervention chirurgicale.....	65
Tableau XX : Comparaison du score fonctionnel de Lysholm-Tegner entre les deux groupes de rééducation.	67
Tableau XXI : Comparaison du score fonctionnel IKDC entre les deux groupes de rééducation.	68
Tableau XXII : Comparaison des scores de qualité de vie entre les deux groupes de rééducation.....	69
Tableau XXIII : Suivi longitudinal du contrôle postural dans le groupe ayant bénéficié de la rééducation conventionnelle.....	72
Tableau XXIV : Latéralisation (en mm) en fonction du côté pathologique chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel.	74
Tableau XXV : Suivi longitudinal du contrôle postural dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	75
Tableau XXVI : Latéralisation (en mm) en fonction du côté pathologique chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant.....	77
Tableau XXVII : Suivi longitudinal des stratégies d'équilibre employées par les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel.....	78
Tableau XXVIII : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires du genou lésé (en degrés) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel lors du maintien de l'équilibre sur un plateau de Freeman.....	78

Tableau XXIX : Suivi longitudinal des stratégies d'équilibre employées par les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant.....	78
Tableau XXX : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires du genou lésé (en degrés) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant lors du maintien de l'équilibre sur un plateau de Freeman.	79
Tableau XXXI : Suivi longitudinal de la douleur dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.....	79
Tableau XXXII : Suivi longitudinal de la douleur dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	80
Tableau XXXIII : Suivi longitudinal du déficit proprioceptif (en degrés) dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.	81
Tableau XXXIV : Suivi longitudinal du déficit proprioceptif (en degrés) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	82
Tableau XXXV : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires (en degrés) dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.	83
Tableau XXXVI : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires (en degrés) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	84
Tableau XXXVII : Suivi longitudinal de la trophicité du genou opéré chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.....	85
Tableau XXXVIII : Suivi longitudinal de la trophicité du genou opéré chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	86
Tableau XXXIX : Suivi longitudinal de la force musculaire chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.....	87
Tableau XL : Suivi longitudinal de la force musculaire chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.....	88
Tableau XLI : Suivi longitudinal de la performance de marche sur six minutes (en mètres) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.	89

Tableau XLII : Suivi longitudinal de la performance de marche sur six minutes (en mètres) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	89
Tableau XLIII : Suivi longitudinal du score fonctionnel de Lysholm-Tegner pour les patients ayant bénéficié du protocole rééducation conventionnel.	90
Tableau XLIV : Suivi longitudinal du score fonctionnel de Lysholm-Tegner chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	90
Tableau XLV : Suivi longitudinal du score fonctionnel IKDC chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.	91
Tableau XLVI : Suivi longitudinal du score fonctionnel IKDC chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	92
Tableau XLVII : Suivi longitudinal du score de qualité de vie chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.	92
Tableau XLVIII : Suivi longitudinal du score de qualité de vie chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.	93
Tableau XLIX : Arthrose et variables météorologiques : revue de la littérature sur PubMed/Medline au cours des trois dernières décennies. Les critères de recherche suivants ont été utilisés : "osteoarthritis"[All Fields] AND ("weather"[All Fields] OR "meteorology"[All Fields]).	105
Tableau L : Mesures des conditions atmosphériques sur la période de l'étude (9 mois).	112
Tableau LI : Régressions linéaires multiples - paramètres météorologiques et anthropométriques relatifs aux données posturographiques (longueur parcourue et surface couverte par le centre de pression des pieds).	113
Tableau LII : Régressions linéaires multiples – variables météorologiques et anthropométriques liées à la douleur.	114

FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique, dans le plan sagittal, du ligament croisé antérieur du genou droit, composé des faisceaux antéromédial (orange) et postérolatéral (bleu). a : extension ; b : flexion à 90° (Bicer <i>et al.</i> , 2019).	8
Figure 2 : Capteurs sensoriels impliqués dans la fonction d'équilibration (d'après Berthoz, 2008).	10
Figure 3 : Organisation de la fonction d'équilibration.	14
Figure 4 : Variation du poids apparent suivant le niveau d'immersion. 1. Immersion sternale ; 2. Immersion xiphoïdienne ; 3. Immersion ombilicale ; 4. Immersion pubienne ; 5. Immersion fémorale ; 6. Immersion tibiale (Kemoun <i>et al.</i> , 2006).	20
Figure 5 : Frise chronologique du protocole de rééducation. Phases de rééducation conventionnelle et de rééducation spécifique à l'étude. Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant avec une partie conventionnelle et une partie en milieu aquatique.	24
Figure 6 : Chronologie des évaluations. Eval. 1 : évaluation avant l'intervention chirurgicale ; Eval. 2 : évaluation 15 jours après l'intervention chirurgicale ; Eval. 3 : évaluation un mois après l'intervention chirurgicale ; Eval. 4 : évaluation deux mois après l'intervention chirurgicale ; Eval. 5 : évaluation six mois après l'intervention chirurgicale.	27
Figure 7 : Posturographie. Plateforme de forces verticales (Win-Posturo, Medicapteurs, Balma, France) (www.medicapteurs.fr).	27
Figure 8 : Evaluation de l'équilibre postural avec sensibilisation par modification des afférences visuelles (lunettes de réalité virtuelle, RM Ingénierie, Rodez, France).	28
Figure 9 : Statokinésigramme obtenu par le test de posturographie statique. Longueur parcourue et surface couverte (ellipse de confiance englobant 90 % des points) par le centre de pression des pieds dans les conditions yeux ouverts (C1) et yeux fermés (C2, valeurs élevées).	30
Figure 10 : Analyse cinématique à l'aide de capteurs de mouvement (BioVal, RM Ingénierie, Rodez, France).	31
Figure 11 : Evaluation proprioceptive du genou.	33
Figure 12 : Test de performance de marche.	38

Figure 13 : Evaluation de la force musculaire par isocinétisme. A : chaise de positionnement ; B : sangles ; C : dynamomètre ; D : bras de levier ; E : sanglage tibial ; F : plateau de coordination ; G : système informatique (Figure adaptée de Törpel <i>et al.</i> , 2017).....	39
Figure 14 : Organigramme de participation à l'étude. Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant.....	44
Figure 15 : Cause lésionnelle des ruptures du ligament croisé antérieur.	46
Figure 16 : Nombre de ruptures de ligament croisé antérieur dans les différentes activités physiques et sportives pratiquées par les patients participant à l'étude.	47
Figure 17 : Comparaison de la répartition, en pourcentage, des patients ayant repris ou non une activité sociale en fonction du groupe de rééducation. Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant.	70
Figure 18 : Comparaison de la répartition, en pourcentage, des patients ayant repris ou non une activité professionnelle en fonction du groupe de rééducation. Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant.....	71
Figure 19 : Période d'enregistrement du contrôle postural et des paramètres météorologiques.....	109

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Al : Aluminium

B : Bore

B : coefficient non standardisé

Br- : Bromure

C : Conditions du test d'équilibre

CG : Centre de Gravité

CHRU : Centre Hospitalier Régional Universitaire

CPP : Centre de Pression des Pieds

DIDT : Droit-Interne, Demi-Tendineux

E : Extension

EMFM : Evaluation Manuelle de la Force Musculaire

Ens : Ensoleillement

ET : Ecart-type

EVA : Echelle Visuelle Analogique

F : Flexion

HAS : Haute Autorité de Santé

HR : Humidité Relative

ILFMK : Institut Lorrain de Formation en Masso-Kinésithérapie

IKDC : International Knee Documentation Committee

IMC : Indice de Masse Corporelle

IRM : Imagerie par Résonnance Magnétique

IRR : Institut Régional de médecine physique et de Réadaptation

KJ : Kenneth Jones

KOOS : Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score

LAPEM : Laboratoire d'Analyse de la Posture de l'Equilibration et de la Motricité

LCA : Ligament Croisé Antérieur

LCP : Ligament Croisé Postérieur

Li : Lithium

NA : Non évalué

NaCl : chlorure de sodium

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

P : Précipitations

PA : Pression Atmosphérique

R^{SOM} : Ratio somesthésique

R^{VEST} : Ration vestibulaire

R^{VIS} : Ratio visuel

Se : Sélénium

SGE : Score Global d'Equilibre

SNC : Système Nerveux Central

T : Température

TLS : Tape Locking Screw

V : Vent

Zn : Zinc

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le 17 décembre 2013, la skieuse française Tessa Worley se blessait gravement au genou droit. La championne du monde de géant mettait fin à sa course, à Courchevel en Savoie, lors d'une épreuve de la Coupe du monde de ski alpin. Le verdict était tombé, avec une rupture du ligament croisé antérieur (LCA), la française ne pouvait pas participer aux Jeux Olympiques de Sotchi programmés au mois de février 2014. Le LCA est la structure clé de l'articulation du genou. Cette structure, de type bande de tissu conjonctif dense, possède ses insertions au niveau du fémur et du tibia. Son rôle est de résister aux translations tibiales antérieures et aux charges en rotation (Duthon *et al.*, 2006). Selon la Haute Autorité de Santé (HAS, 2008a), la rupture du LCA représente, actuellement, l'une des principales lésions en sport et chaque année en France quelques 32000 victimes de cette pathologie ligamentaire sont dénombrées, notamment chez les jeunes sportifs. Cette lésion ligamentaire, faiblement représentée dans la population générale, est observée dans toutes les activités physiques et sportives et plus particulièrement dans les activités qui impliquent des contraintes en rotation des membres inférieurs comme le football, le rugby, le handball, le basket-ball, le volley-ball et surtout le ski (Alidrisi *et al.*, 2011).

Le LCA ne guérit pas spontanément du fait de la pauvreté de sa vascularisation (Scapinelli, 1997) et sa rupture peut conduire à de graves conséquences fonctionnelles à court, moyen et long terme. A court et moyen terme, une instabilité du genou voire des déséquilibres responsables d'une gêne fonctionnelle peuvent se manifester dans les activités sportives, en particulier dans les sports de pivot ou au cours des activités de la vie quotidienne (HAS 2008b). Cette instabilité peut, en perdurant et en s'aggravant, retentir sur l'état du genou en lien avec des lésions des ménisques, qui jouent un véritable rôle d'amortisseur, avec usure des cartilages du fémur et du tibia, conduisant, à long terme, à l'arthrose.

L'arthrose est un trouble articulaire chronique et progressif. Sa prévalence varie de 8 à 15 % pour les pays industrialisés, soit pour la France environ 10 millions de français atteints par cette pathologie. Le pourcentage des personnes atteintes augmente avec l'âge et 65 % des plus de 65 ans sont concernés par l'arthrose (Société Française de Rhumatologie).

Dans l'articulation, une mince couche de cartilage articulaire recouvre les os. Ce tissu spécialisé est riche en composants de matrice extracellulaire qui attirent des molécules d'eau abondantes (Blalock *et al.*, 2015), qui absorbent et traduisent aux os les forces de compression qui sont appliquées à l'articulation pendant les mouvements. Par ailleurs, la cavité articulaire est doublée par la synoviale, un mince tissu conjonctif qui produit le liquide synovial lubrifiant. L'arthrose se caractérise par des fibrillations et des ulcérations, une perte de matrice extracellulaire et une mort cellulaire survenant dans le tissu. Les dommages dans le

cartilage articulaire sont typiquement caractérisés par des fissures dans sa couche superficielle qui s'étendent progressivement dans les couches plus profondes et conduisent finalement à une perte sévère de la structure et du volume du cartilage (Thysen *et al.*, 2015). Les symptômes sont variables pouvant aller de douleurs articulaires légères à sévères, accompagnées d'une raideur entraînant souvent une altération sévère de la cinétique articulaire et une incapacité permanente. Les facteurs génétiques ainsi que les facteurs acquis, notamment les traumatismes articulaires et les facteurs de risque liés au style de vie (tels que l'obésité et l'utilisation excessive de l'articulation dans les activités professionnelles ou de loisirs) peuvent contribuer à l'apparition et à la progression de l'arthrose (Bijlsma *et al.*, 2011 ; Hunter & Felson, 2006).

Ces pathologies du genou, que ce soit l'atteinte traumatique aigue de la rupture du LCA, l'instabilité chronique secondaire ou l'atteinte dégénérative par la gonarthrose (post-traumatique ou non), peuvent entraîner une altération du contrôle postural. En effet, le contrôle postural est une fonction sensori-motrice complexe qui requiert l'intégration au niveau du système nerveux central (SNC) de trois afférences neurosensorielles : visuelle, vestibulaire (oreille interne) et somesthésique. La somesthésie comprend l'extéroception, c'est-à-dire les informations qui proviennent de l'extérieur, et la proprioception, c'est-à-dire les informations musculo-tendino-articulaires. Par exemple, la capsule articulaire, les ménisques, les ligaments et les tendons présents dans l'articulation du genou possèdent des mécanorécepteurs capables de renseigner le SNC sur la position ou les mouvements de l'articulation. En règle générale, les entrées sensorielles génèrent une réponse motrice spécifique au contexte, ce qui conduit à la stabilisation du regard et de la posture (Keshner *et al.*, 1987). Néanmoins, dans le cas des pathologies du genou, une altération des mécanorécepteurs peut entraîner une perturbation du contrôle postural, voire des chutes.

Dans ce contexte, ce travail de thèse avait pour objet d'analyser les modifications posturales engendrées par les pathologies du genou. Il comportait deux analyses :

- La première analyse avait pour objet d'étude la rééducation en milieu aquatique après ligamentoplastie du genou chez le sportif. La rééducation a pour objectifs principaux de restaurer les capacités fonctionnelles, elles-mêmes dépendantes de la mobilité articulaire, la force musculaire et les fonctions proprioceptives du genou (Berger *et al.*, 2005). La rééducation se fait à travers une reprogrammation sensori-motrice rendue possible grâce à la plasticité neuronale. Cette reprogrammation permet ainsi de pallier l'instabilité posturale. Pourtant, à ce jour, il ne semble pas que

les effets à plus ou moins long terme de la balnéothérapie sur le contrôle postural et la proprioception, suite à une reconstruction chirurgicale du LCA, aient été comparés aux effets à plus au moins long terme d'une rééducation « à sec » sur ces mêmes paramètres. Le projet multicentrique « Thermasport », impliquant le Centre Hospitalier Régional Universitaire (CHRU) de Nancy, la Polyclinique de Gentilly, la Clinique Saint-André, la Clinique Louis Pasteur, l'Institut Régional de médecine physique de Réadaptation (IRR), l'Institut Lorrain de Formation en Masso-Kinésithérapie (ILFMK) de Lorraine et le centre Nancy-Thermal visait à comparer les bénéfices d'un protocole de rééducation innovant avec une partie en milieu aquatique et une partie à sec par rapport au protocole de rééducation conventionnel établi par la Haute Autorité de Santé (HAS, 2008a). L'analyse concernait le contrôle postural, la cinétique de récupération et le développement des compétences proprioceptives des sportifs opérés d'une ligamentoplastie du genou. Cette étude, dont le promoteur est le CHRU de Nancy, a fait l'objet d'une publication internationale intitulée « Comparison of an innovative rehabilitation, combining reduced conventional rehabilitation with balneotherapy, and a conventional rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes » (Peultier-Celli *et al.*, 2017) (Annexe 1), de communications orales et affichées (Annexe 2) et d'une publication nationale intitulée « Rééducation en milieu aquatique après ligamentoplastie du genou chez le sportif » (Peultier *et al.*, 2015).

- La deuxième analyse avait pour objet d'étude l'influence des paramètres météorologiques sur le contrôle postural et la douleur chez les patients présentant une gonarthrose. Il est fréquemment relaté que les symptômes de l'arthrose sont influencés par les conditions météorologiques mais aucune étude n'a analysé les modifications du contrôle postural en lien avec les changements météorologiques. Cette étude, dont le promoteur est également le CHRU de Nancy, a fait l'objet d'une publication internationale : « Influence of meteorological elements on balance control and pain in patients with symptomatic knee osteoarthritis » (Peultier *et al.*, 2017) (Annexe 3).

Des locaux dévolus à la recherche au sein de la piscine ronde de Nancy Thermal ont bénéficié d'une Autorisation de Lieu de Recherche par l'Agence Régionale de Santé.

II. ANATOMIE DU GENOU ET ORGANISATION DE LA FONCTION D'ÉQUILIBRATION

II.1. ANATOMIE ET BIOMÉCANIQUE DE L'ARTICULATION DU GENOU

II.1.1. Articulation du genou

L'articulation du genou est une articulation importante du squelette humain qui unit la cuisse à la jambe. Le poids du corps repose en grande partie sur elle lorsque le sujet court, reste debout, ou encore s'accroupit. C'est une articulation synoviale composée de deux systèmes articulaires, à savoir, l'articulation fémoro-tibiale de type bicondylienne et l'articulation fémoro-patellaire de type ginglyme comprenant deux compartiments, un médial de stabilité et un latéral de mobilité (De Peretti *et al.*, 1983 ; Paulsen & Waschke, 2013 ; Saunders, 1933). Cette articulation possède deux degrés de liberté permettant de réaliser des mouvements de flexion et d'extension auxquels peuvent s'ajouter en flexion des mouvements de rotation médiale et latérale. Ces mouvements sont liés à la forme des trois surfaces articulaires (l'épiphyse distale du fémur, l'épiphyse proximale du tibia et la patella sur l'avant du fémur) associées aux ligaments, aux ménisques et aux muscles (Saunders, 1933).

II.1.2. Stabilité de l'articulation du genou

L'incongruence des surfaces articulaires est compensée par une stabilité passive et active du genou.

II.1.2.1. Stabilité passive du genou

La stabilité passive est assurée par la capsule articulaire, la synoviale, les ménisques, les tendons et les ligaments.

Capsule articulaire :

La capsule articulaire est une enveloppe composée de fibres de collagène qui renferme le liquide synovial. Elle recouvre les deux articulations : fémoro-patellaire et fémoro-tibiale et contribue à maintenir en contact les structures de l'articulation. Elle participe à la stabilité passive en limitant les mouvements de l'articulation (Blalock *et al.*, 2015).

Synoviale :

La membrane synoviale tapisse la face interne de la capsule articulaire. Elle sécrète le liquide synovial qui baigne l'articulation et qui a pour fonction de nourrir et lubrifier les surfaces articulaires (Blalock *et al.*, 2015).

Ménisques :

L'articulation du genou est constituée de deux ménisques interne et externe de forme semi-lunaire, constitués de fibrocartilage souple et résistant et disposés entre le fémur et le tibia (Fox *et al.*, 2015). Ils remplissent plusieurs rôles. Ils protègent les cartilages de l'arthrose en répartissant le poids du corps, en absorbant et en amortissant les chocs auxquels sont contraints les genoux, ils augmentent la surface de contact et assurent une bonne congruence entre le fémur et le tibia, ils assurent la lubrification et la nutrition de l'articulation et ils améliorent la concordance et donc la stabilité (Dufour & Pillu, 2007; Fox *et al.*, 2015).

Tendons :

Les tendons environnant l'articulation du genou sont les tendons du semi-membraneux, de la patte d'oie, du muscle poplité ou encore les puissantes origines tendineuses du gastrocnémien. Les tendons sont des tissus conjonctifs denses et réguliers. Ils relient un muscle à un os. Leur fonction principale est de transférer la force du muscle vers l'os mais ils interviennent également dans la stabilité passive de l'articulation (Blalock *et al.*, 2015 ; Dufour & Pillu, 2007).

Ligaments extrinsèques du genou :

Les ligaments périphériques du genou sont au nombre de deux. Le ligament collatéral tibial s'insère sur la face médiale de l'épiphyse distale du fémur et sur la face médiale de l'épiphyse proximale du tibia. Le ligament collatéral fibulaire s'étend obliquement vers le bas et vers l'arrière à partir de la face latérale de l'épiphyse distale du fémur jusqu'à la face latérale de l'épiphyse proximale du péroné. Ces deux ligaments limitent les mouvements de valgus et de varus en maintenant le genou en dedans et en dehors.

Sur la face dorsale de l'articulation du genou, se trouvent le ligament poplité oblique qui s'étend du condyle latéral du fémur en direction médiale et inférieure, ainsi que le ligament poplité arqué qui suit un trajet inverse et surcroise le muscle poplité (Paulsen & Waschke, 2013).

Ligaments intrinsèques du genou :

Au nombre de deux, les ligaments croisés forment le « pivot central » de l'articulation du genou. Ils sont situés dans la fosse intercondyalaire et se croisent dans les plans sagittal et frontal pour s'enrouler l'un sur l'autre (Baqué & Maes, 2008).

Le ligament croisé antérieur ou LCA, complètement intra-articulaire, est situé dans l'échancrure du fémur (Figure 1). Cette bande de tissu conjonctif dense possède deux insertions : une insertion tibiale au niveau de la surface pré-spinale et une insertion fémorale au niveau de la partie postérieure de la face médiale du condyle latéral. Il joue un double rôle en s'opposant au tiroir antérieur, à savoir au déplacement vers l'avant du tibia par rapport au fémur et en s'opposant à la rotation interne et externe du tibia par rapport au fémur en début de flexion (Domnick *et al.*, 2016 ; Duthon *et al.*, 2006 ; Halewood & Amis, 2015).

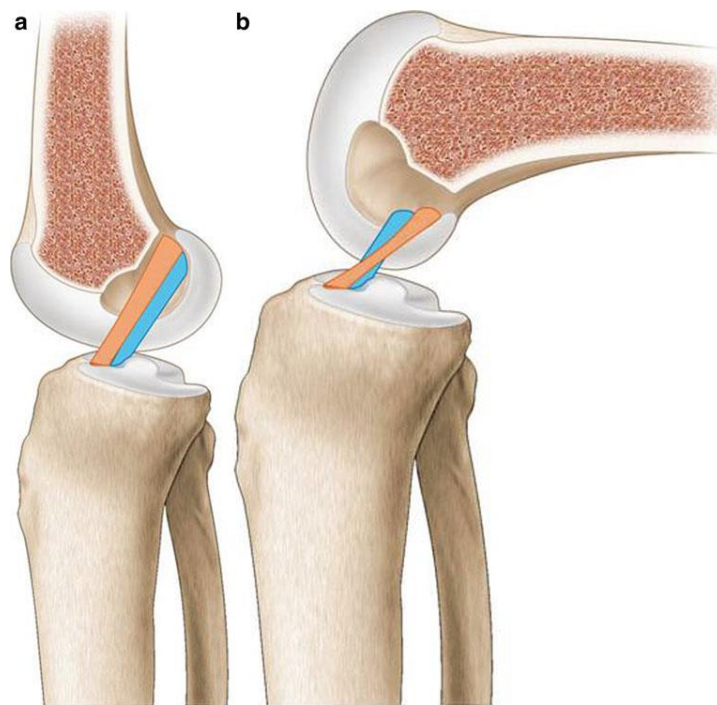


Figure 1 : Représentation schématique, dans le plan sagittal, du ligament croisé antérieur du genou droit, composé des faisceaux antéromédial (orange) et postérolatéral (bleu). a : extension ; b : flexion à 90° (Bicer *et al.*, 2019).

Le ligament croisé postérieur ou LCP possède une insertion au niveau de l'arrière du plateau tibial et une insertion au niveau de la face interne du condyle fémoral interne. Il a pour rôle de s'opposer au tiroir postérieur du tibia par rapport au fémur, c'est-à-dire au déplacement du tibia vers l'arrière, aux mouvements de varus et valgus, ainsi qu'à la rotation externe du genou (Fanelli *et al.*, 2010).

II.1.2.2. Stabilité active du genou

La stabilité active du genou est assurée par les muscles périphériques et notamment par le muscle quadriceps, qui intervient dans la stabilisation postérieure et qui comprend quatre chefs (le muscle droit fémoral, le muscle vaste latéral, le muscle vaste médial et le muscle vaste intermédiaire), par les ischio-jambiers (le biceps, le demi-membraneux et le muscle semi-tendineux) qui assurent la stabilisation antérieure, par le triceps sural (le muscle gastrocnémien et le muscle soléaire) ainsi que par les muscles poplité et court biceps qui ont un rôle de réglage et de stabilisation (Dufour & Pillu, 2007).

Par ailleurs, l'ensemble des éléments participant à la stabilité passive du genou, à savoir, la capsule articulaire, les ménisques (Blalock *et al.*, 2015 ; Fox *et al.*, 2015), les ligaments (Adachi *et al.*, 2002) mais aussi les tendons (Cabuk & Kuskü Cabuk, 2016) possèdent des mécanorécepteurs qui renseignent le SNC sur la position de l'articulation, la tension exercée sur celle-ci, le degré d'étirement ou encore les mouvements de l'articulation. Ces mécanorécepteurs participent ainsi au contrôle postural et au maintien de l'équilibre humain.

II.2. ORGANISATION DE LA FONCTION D'ÉQUILIBRATION

II.2.1. Équilibre et posture

L'homme primate érigé est un organisme pluri-articulé soumis aux lois inéluctables de la gravité (Perrin & Lestienne, 1994). Du fait de la bipédie, de l'étroitesse du polygone de sustentation et de la position élevée du centre de gravité (CG) en avant des deuxième ou troisième vertèbres sacrées, le rapport « surface d'appui/taille » est faible rendant l'équilibre plus instable et précaire que chez les quadrupèdes. L'homme doit donc corriger en permanence les micro-déplacements physiologiques de son CG afin que la verticale passant par celui-ci se projette toujours à l'intérieur du polygone de sustentation (Perrin & Lestienne,

1994). Ces ajustements sont possibles par l'intégration continue d'informations, au niveau du SNC, provenant de trois entrées sensorielles (visuelle, vestibulaire et somesthésique) (Figure 2). Les informations perçues par ces entrées sensorielles sont comparées entre elles mais aussi avec le vécu du sujet, de manière à élaborer une réponse motrice adaptée visant à stabiliser le regard et la posture (Ageberg, 2002 ; Perrin & Lestienne, 1994). Néanmoins, dès lors que des modifications s'opèrent dans l'environnement ou dans les conditions de la tâche à effectuer, le poids de chaque afférence sensorielle dans le maintien de l'équilibre est modifié. De même, l'altération d'une de ces entrées sensorielles, à l'instar de l'information somesthésique dans une pathologie du genou, peut entraîner une perturbation du contrôle postural se traduisant par des déséquilibres voire des chutes (Gauchard *et al.*, 2010).

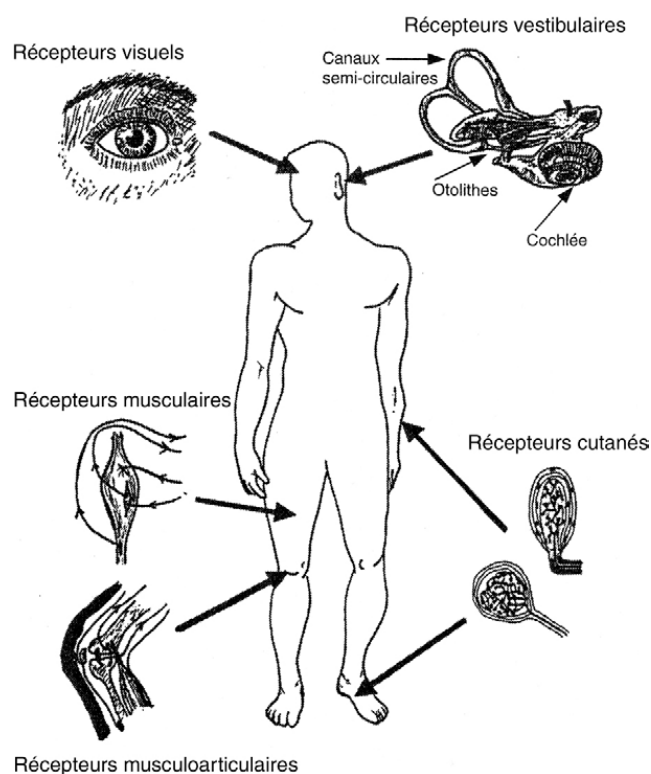


Figure 2 : Capteurs sensoriels impliqués dans la fonction d'équilibration (d'après Berthoz, 2008).

II.2.2. Afférences somesthésiques

Etymologiquement, la somesthésie se rapporte aux sensations (« aïsthêsis ») du corps (« sôma »). Elle comprend à la fois l'extéroception (perception des stimuli qui proviennent de l'extérieur) et la proprioception (sensibilité musculo-tendino-articulaire). Le terme « proprioception » a été utilisé pour faire référence à l'information afférente provenant des récepteurs proprioceptifs (Sherrington, 1906). Ces récepteurs contribuent au maintien de la position du corps et de la tête ainsi qu'à la coordination de leurs mouvements sans les voir (Ruskell, 1999).

Les mécanorécepteurs responsables de l'information proprioceptive sont principalement situés dans les tendons (organe tendineux de Golgi), la capsule articulaire et les ligaments (les corpuscules de Pacini et Ruffini, les récepteurs de Golgi, les terminaisons nerveuses libres) ainsi que dans les muscles (les fuseaux neuro-musculaires) (Ageberg, 2002 ; Cabuk & Kuskü Cabuk, 2016 ; Tortora & Derrickson, 2007 ; Sherrington, 1906 ; Solomonow & Krogsgaard, 2001 ; Wyke, 1967).

II.2.3. Traitement central des informations sensorielles

Les informations perçues par les afférences sensorielles sont traduites en influx nerveux et traversent un ensemble de structures qui interviennent dans le contrôle et la régulation du mouvement et/ou de la locomotion et qui constituent le SNC (Bioulac *et al.*, 2004).

Moelle épinière :

La moelle épinière, partie intrarachidienne du SNC, est impliquée dans certains réflexes et joue également un rôle de conduction des messages entre les nerfs qui lui sont rattachés et l'encéphale (Bioulac *et al.*, 2004). En effet, la zone centrale, composée de substance grise, est formée par des interneurones, les corps cellulaires et les dendrites des neurones efférents et afférents, les fibres des neurones afférents et des cellules gliales. La substance grise est entourée de substance blanche, formée de groupes d'axones myélinisés. Ces groupes de fibres cheminent le long de la moelle, certains descendant pour relayer l'information de l'encéphale vers la moelle épinière, d'autres montant pour transmettre l'information vers l'encéphale. Les groupes de fibres afférentes qui proviennent des nerfs

périphériques pénètrent dans la moelle épinière par les racines dorsales. Les ganglions des racines dorsales contiennent les corps cellulaires de ces neurones afférents. Les axones des neurones efférents quittent la moelle épinière par les racines ventrales. A peu de distance de la moelle, les racines dorsales et ventrales du même niveau s'unissent pour former un nerf spinal, un de chaque côté de la moelle (Widmaier *et al.*, 2007). Elle est donc à la fois un centre de relais pour les commandes en provenance des centres supérieurs et également un centre d'intégration des informations sensorielles (Bioulac *et al.*, 2004).

Cerveau :

Le cerveau est constitué d'une couche de substance grise, appelé cortex cérébral, qui recouvre l'ensemble des deux hémisphères. Le cortex cérébral apparaît comme une structure qui, à partir de multiples afférences sensorielles, gère le tonus musculaire, les ajustements posturaux nécessaires au maintien de l'équilibre et assure un contrôle fin de la motricité (Perrin *et al.*, 1987). Enfoncés profondément sous le cortex, les ganglions de la base, ou noyaux gris centraux, assurent la répartition du tonus musculaire, la régulation de certains automatismes moteurs, le choix et l'ajustement des schémas moteurs posturocinétiques les plus appropriés en fonction des informations sensorielles (Perrin & Lestienne, 1994).

Tronc cérébral :

Le tronc cérébral formé par le bulbe rachidien, le pont et le mésencéphale est composé de nombreuses structures comme le noyau rouge, la substance réticulée et les noyaux vestibulaires. Les noyaux vestibulaires et la formation réticulée se projettent sur la zone intermédiaire et la corne antérieure de la moelle en relation avec le contrôle de la musculature axiale et proximale des membres. Les noyaux vestibulaires et la formation réticulée sont fortement impliqués dans le contrôle de l'équilibre et de la posture.

Cervelet :

Le cervelet joue un rôle important dans le contrôle moteur. Il n'est pas à l'origine du mouvement mais contribue à la coordination et à la synchronisation des gestes et à la précision des mouvements. Il assure, par l'intermédiaire de trois parties qui le composent (archeocerebellum, paleocerebellum, neocerebellum), des activités musculaires du

mouvement volontaire global, des activités musculaires toniques de la posture et des activités musculaires réflexes du maintien de l'équilibre. Les entrées et les sorties cérébelleuses prennent naissance et aboutissent au niveau médullaire par l'intermédiaire du complexe nucléaire vestibulaire, des noyaux réticulaires du pont et du noyau rouge. Cette connectivité est sous le contrôle du cortex cérébelleux qui correspond à une double couche de substance grise (Perrin & Lestienne, 1994 ; Widmaier *et al.*, 2007). La microcircuiterie du cortex cérébelleux est assimilable à une étonnante machinerie capable de moduler le jeu des muscles agonistes et antagonistes permettant de régler l'amplitude et la vitesse du mouvement ou/et d'assurer la coordination temporelle des activités musculaires (Perrin & Lestienne, 1994).

II.2.4. Réponses motrices

L'intégration et la comparaison des différentes informations sensorielles au niveau du SNC permettent l'élaboration d'une réponse motrice visant à stabiliser à la fois le regard et la posture (Perrin & Lestienne, 1994) (Figure 3).

La stabilité visuelle est assurée essentiellement par le jeu des réflexes vestibulo-oculaires et optocinétiques (Perrin & Lestienne, 1994) :

- le réflexe vestibulo-oculaire est un réflexe d'origine vestibulaire déclenché par les mouvements de la tête. Ce réflexe a pour but de stabiliser l'image visuelle sur la rétine pendant les mouvements de la tête grâce à des mouvements oculaires compensatoires. Schématiquement, chaque paire de canaux semi-circulaires active une paire de muscles oculaires dont la contraction entraîne le mouvement de l'œil dans un plan sensiblement parallèle au plan des canaux. Cette activation est réalisée par un arc réflexe à trois neurones dans lequel le complexe nucléaire vestibulaire joue un rôle prépondérant ;
- d'origine visuelle, les réflexes visuo-moteurs déclenchent des mouvements oculaires dont le but est de stabiliser l'image visuelle sur la rétine lors du mouvement de cibles visuelles. Ils comprennent le réflexe optocinétique et la poursuite visuelle. Le réflexe optocinétique est constitué par une phase lente du regard qui compense le déplacement de l'environnement visuel. Ce mouvement lent est interrompu par une phase rapide de sens opposé, dit saccade de recentrage. La poursuite oculaire est un mouvement oculaire

continu dont le but est de maintenir une cible visuelle mobile capturée lors de la saccade sur la zone centrale de la rétine.

Les voies sensibles et motrices du corps humain vont acheminer les influx nerveux moteurs (efférents) vers les muscles squelettiques de la tête et du reste du corps (Tortora & Derrickson, 2007) qui vont eux-mêmes exercer leur force par le biais des insertions tendineuses. Le muscle est ainsi l'organe chargé d'effectuer le transfert entre les énergies mécanique et chimique produites par l'activité nerveuse et l'énergie mécanique capable d'assurer le déplacement des différents segments corporels (Bioulac *et al.*, 2004). Cette cohésion ostéoarticulaire assurée par le système musculaire permet la stabilisation de la posture qui passe par le maintien de la projection du CG à l'intérieur du polygone de sustentation.

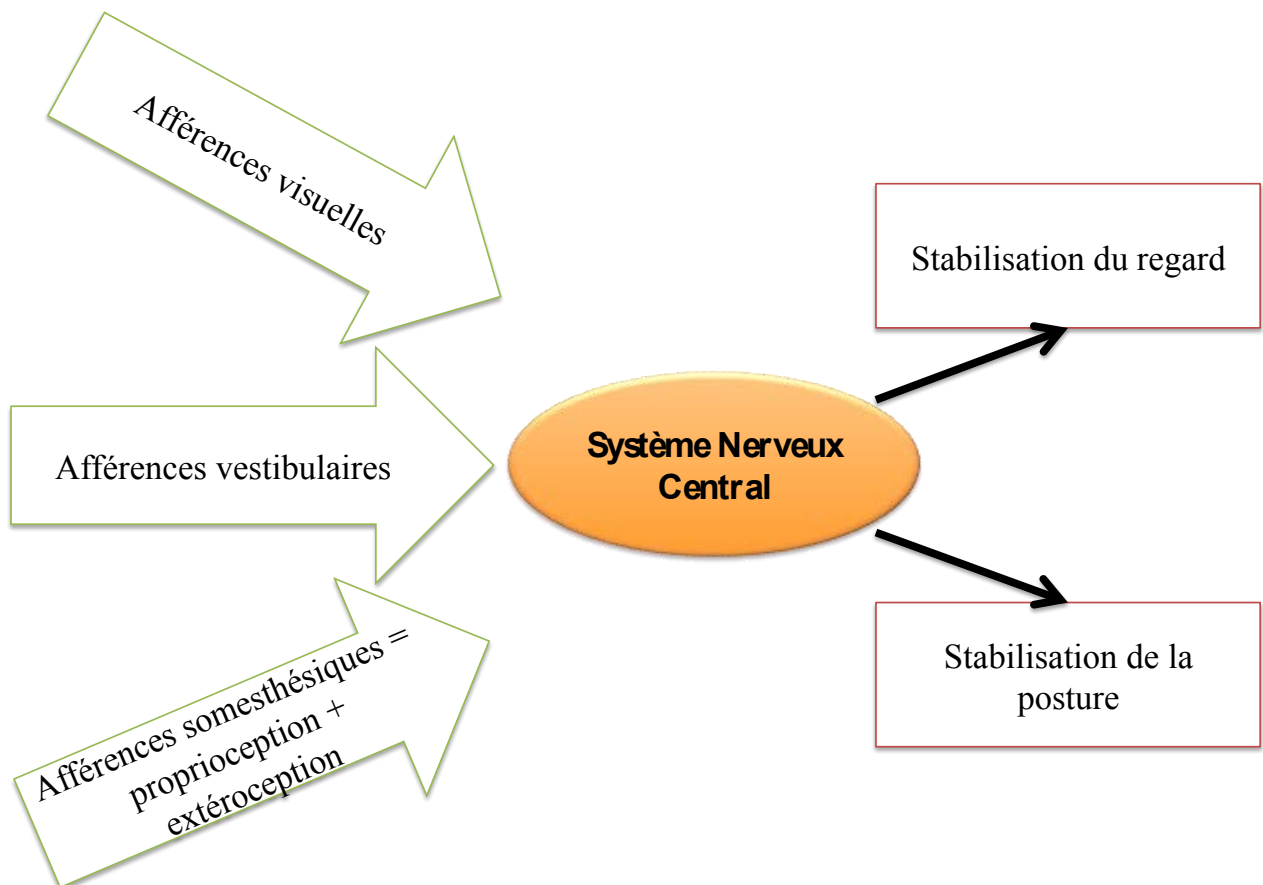


Figure 3 : Organisation de la fonction d'équilibration.

III. ÉTUDE 1 : RÉÉDUCATION EN MILIEU AQUATIQUE APRÈS LIGAMENTOPLASTIE DU GENOU CHEZ LE SPORTIF

III.1. INTRODUCTION

III.1.1 Mécanismes de rupture du LCA

Différents mécanismes peuvent être à l'origine d'une rupture isolée ou non du ligament croisé antérieur en fonction du degré de flexion, du sens de la rotation et des contraintes en valgus et en varus. Les mécanismes les plus souvent retrouvés sont de trois types :

- le mécanisme de valgus-flexion-rotation externe (Grassi *et al.*, 2017). Il provoque une atteinte non seulement du LCA mais aussi du plan capsulo-ligamentaire interne qui comprend le ligament collatéral médial et le ménisque interne, notamment sa corne postérieure qui se désinsère de la capsule (Järvinen *et al.*, 1994). Ce mécanisme survient en particulier chez le footballeur lorsqu'il pivote brusquement du côté opposé à la jambe porteuse ;
- le mécanisme de varus-flexion-rotation interne (Järvinen *et al.*, 1994). Il provoque une atteinte du LCA, du plan capsulo-ligamentaire externe et du ménisque externe. Il survient lors d'un brusque changement de direction sur le pied intérieur ;
- le mécanisme d'hyper-extension (Kobayashi *et al.*, 2010). Il provoque une rupture du LCA par un effet de cisaillement au sommet de l'échancrure intercondylienne. C'est le classique shoot dans le vide au football et de la réception de saut, genou en extension, au handball.

III.1.2 Rupture du LCA et contrôle postural

Chez l'Homme, la rupture du LCA entraîne une modification de la cinématique du genou avec trois conséquences principales : une perte de contrôle de la translation antérieure du tibia, une modification de l'axe de rotation du genou et une perte de la synchronisation entre le condyle fémoral latéral et le tibia qui se manifeste par un ressaut.

En dehors de sa fonction mécanique stabilisatrice, le LCA possède des propriétés proprioceptives. Il est abondamment innervé (près de 1 % de sa section est constitué de tissu neuronal) (Bicer *et al.*, 2010) et les mécanorécepteurs (corpuscules de Ruffini, corpuscules de Pacini, terminaisons nerveuses libres) sont capables de fournir des informations au SNC sur le sens de positionnement de l'articulation et sur le seuil de détection du mouvement (Fischer-

Rasmussen & Jensen, 2000 ; Corrigan *et al.*, 1992 ; Bonfim *et al.*, 2003). Lorsque les récepteurs intraligamentaires détectent une différence entre la position adoptée par le corps et la position souhaitée, des ajustements posturaux et des régulations musculaires vont être initiées grâce au système du contrôle postural afin de maintenir l'équilibre corporel (Halata *et al.*, 1999 ; Fromm & Kummer, 1994).

Après une rupture du LCA, un déficit proprioceptif (Barrack *et al.*, 1989 ; Corrigan *et al.*, 1992 ; Godinho *et al.*, 2014 ; Kim *et al.*, 2016a ; Roberts *et al.*, 1999) et des dysfonctionnements apparaissent : hyperlaxité articulaire avec translation tibiale excessive (Borsa *et al.*, 1997 ; Johansson *et al.*, 1991 ; Shiraishi *et al.*, 1996), diminution de la vitesse de marche et du mouvement actif du genou (Lorentzen *et al.*, 1999 ; Wilson *et al.*, 1996) ou encore diminution de la force musculaire du membre lésé, notamment au niveau du quadriceps (Brasileiro *et al.*, 2011 ; Carter *et al.*, 1997 ; Ernst *et al.*, 2000 ; Kim *et al.*, 2016b ; Lee *et al.*, 2009). Cette diminution de la force musculaire s'expliquerait par la réduction de l'activation des fibres musculaires causée par une altération des feedbacks afférents provenant des mécanorécepteurs situés au niveau du LCA lésé. Or, l'équilibre requiert des ajustements continus de l'activité musculaire et de la position de l'articulation afin de stabiliser les segments du corps et maintenir la projection du CG à l'intérieur du polygone de sustentation (Lane, 1969 ; Zätterström, 1999). Des études ont d'ailleurs montré que, dans le cas d'une pathologie des membres inférieurs et notamment d'une rupture du LCA, le contrôle postural est altéré en comparaison au contrôle postural de sujets sains (Dauty *et al.*, 2010 ; Dingenen *et al.*, 2015 ; Fernandes *et al.*, 2016 ; Lysholm *et al.*, 1998 ; O'Connell *et al.*, 1998 ; Perrot *et al.*, 2000) avec une augmentation de la surface couverte et de la longueur parcourue par le centre de pression des pieds (Lysholm *et al.*, 1998 ; Okuda *et al.*, 2005). L'instabilité posturale est relativement bien compensée dans les activités quotidiennes mais devient nettement plus importante lors de la pratique des activités physiques, notamment celles qui sont associées à des mouvements de torsion. Corrigan *et al.*, (1992) ont ainsi suggéré que les muscles autour de l'articulation du genou étaient capables de compenser l'instabilité à des vitesses relativement faibles mais, dès lors que l'activité devient plus intense et que la vitesse d'exécution des mouvements augmente, cette compensation devient insuffisante. Cette contraction musculaire dépend d'un arc réflexe direct entre les récepteurs du LCA et les muscles entourant l'articulation du genou. Après rupture du LCA, cet arc réflexe est altéré et affecte la stabilisation dans les activités de la vie quotidienne et surtout lors de la pratique d'activités sportives (Bonfim *et al.*, 2003).

III.1.3. Ligamentoplastie du genou

Afin de pallier l'instabilité après rupture du LCA et de réduire les risques de lésions secondaires au niveau méniscal et au niveau cartilagineux, il est possible d'avoir recours à la reconstruction ligamentaire par chirurgie, appelée ligamentoplastie. En effet, en cas de rupture totale du LCA, la cicatrisation spontanée est impossible du fait du caractère intra-articulaire du LCA et de la pauvreté de sa vascularisation (HAS, 2008b ; Scapinelli, 1997). La reconstruction du LCA par auto-greffe tendineuse offre aujourd'hui le meilleur compromis entre stabilité et iatrogénie (HAS, 2008b). Plusieurs études ont d'ailleurs montré le retour de la stabilité posturale (Dauty *et al.*, 2010 ; Harrison *et al.*, 1994 ; Papalia *et al.*, 2015 ; Shiraishi *et al.*, 1996 ; Henriksson *et al.*, 2001) qui peut s'expliquer par la régénérescence des neurones sensoriels après ligamentoplastie du genou (Ochi *et al.*, 1999).

Parmi les techniques de reconstruction, la technique DIDT (droit-interne, demi-tendineux) utilise les tendons des muscles droit-interne et demi-tendineux (Domnick *et al.*, 2016). Une fois prélevés, ces tendons sont pliés en deux afin d'obtenir un nouveau ligament à quatre brins. Parmi d'autres techniques, la méthode TLS (Tape Locking Screw), décrite à Bruxelles par Collette en 2001, est utilisée en France dans 10 % des cas (Alidrissi *et al.*, 2011) et vise, quant à elle, à ne prélever qu'un seul fragment du tendon du muscle demi-tendineux (le tendon du muscle droit interne peut néanmoins être parfois utilisé). Le greffon est placé dans des tunnels osseux de faible diamètre avec des bandelettes de suspension et une vis d'interférence.

Enfin, la technique de Kenneth Jones (KJ) s'appuie sur le prélèvement du tiers central du tendon rotulien avec une baguette osseuse à chaque extrémité, au niveau de la rotule pour la partie proximale et, sur le tibia pour la partie distale (Cowan, 1965 ; Jones, 1963). Quelle que soit la technique, le greffon prélevé est calibré puis préparé avant d'être inséré et fixé dans deux tunnels osseux tibial et fémoral.

La technique chirurgicale utilisée dépend généralement du tableau clinique du patient et des activités physiques et sportives pratiquées. Par exemple, les techniques DIDT et TLS seront privilégiées dans les sports qui impliquent fortement le quadriceps alors que la technique KJ sera privilégiée dans les sports qui impliquent fortement les ischio-jambiers.

III.1.4. Rééducation post-ligamentoplastie

Plusieurs études ont montré que la rééducation après rupture du LCA jouait un rôle important dans la récupération fonctionnelle du membre inférieur lésé notamment pour le renforcement musculaire, la mise en charge progressive et la récupération des amplitudes articulaires (Arms *et al.*, 1984 ; Brewster *et al.*, 1983 ; Yasuda *et al.*, 1987). Les progrès dans les approches chirurgicales tels que le placement du greffon, sa fixation et l'utilisation de procédures d'arthroscopie assistées ont influencé la rééducation grâce à la connaissance des contraintes pouvant s'exercer sur le LCA au cours de différents exercices (Shelbourne & Nitz, 1990). Ainsi, les programmes de rééducation après rupture ou reconstruction chirurgicale du LCA sont fondés sur des modèles théoriques et des expériences cliniques. Les objectifs principaux sont de restaurer l'amplitude des mouvements articulaires, la force musculaire et de retrouver les fonctions du genou à un niveau équivalent à celui avant la lésion (Ageberg, 2002 ; Solomonow & Krogsgaard, 2001). Néanmoins, la stabilité mécanique du genou après ligamentoplastie n'est pas suffisante. La récupération proprioceptive est tout aussi importante et significative dans cette procédure globale de reconstruction (Dhillon *et al.*, 2011). En effet, l'équilibre postural est restauré par la réduction du déficit proprioceptif suite à l'intervention chirurgicale et une rééducation adaptée avec des mouvements actifs de l'articulation du genou (Friemert *et al.*, 2006).

Plusieurs techniques de rééducation sont utilisées et des études ont été réalisées pour comparer les effets d'une rééducation dans l'eau par rapport à une rééducation plus traditionnelle à sec (Tovin *et al.*, 1994). Tovin *et al.*, (1994) ont montré que les exercices en milieu aquatique pouvaient ne pas être aussi efficaces qu'à sec pour le regain de force musculaire mais que l'eau avait néanmoins un effet bénéfique sur la résorption de l'épanchement intra-articulaire et sur la réduction de la douleur. D'autres études ont montré que les exercices dans l'eau pouvaient accélérer la rééducation car, en dépit du stress qui peut apparaître chez certains patients lorsqu'ils sont dans l'eau, une diminution des contraintes sur les articulations améliore la circulation, facilite la mobilité fonctionnelle (Golland, 1981), entraîne une sédation de la douleur, facilite le relâchement musculaire, favorise la détente et la relaxation, aide à la verticalisation précoce, contribue à une mise en charge progressive et, enfin, favorise le développement proprioceptif (Chevutschi *et al.*, 2007 ; Golland, 1981 ; Nasermoaddeli & Kagamimori, 2005).

Les bienfaits de la balnéothérapie s'expliquent en partie par les propriétés de l'eau. Parmi les effets hydrostatiques de l'immersion, la diminution apparente du poids du corps

permet une remise en charge progressive par abaissement du niveau d'immersion (Figure 4). Par exemple, un patient immergé jusqu'au niveau sternal a un poids apparent égal à 20 % de son poids réel. La mobilisation active d'un membre est alors facilitée car elle nécessite l'activation de peu d'unités motrices pour que le mouvement soit réalisable. L'utilisation de matériel, à l'instar de flotteurs, va également dans ce sens. En effet, son action sur le poids apparent permet de soutenir tout ou une partie du corps pendant un exercice. Dès lors, le mouvement est facilité. Par ailleurs, en milieu aquatique, la pression hydrostatique joue un double rôle. Premièrement, associée à la viscosité, elle est à l'origine de stimuli sensoriels extéroceptifs qui permettent une meilleure perception de la position des membres dans l'espace. Deuxièmement, elle stimule intensivement les récepteurs baresthésiques qui seraient à l'origine d'une antalgie dans les articulations (théorie du *gate control system*) (Kemoun *et al.*, 2006). Tout comme la pression hydrostatique, la résistance à l'avancement favorise également les informations extéroceptives mais aussi les informations proprioceptives qui permettent une meilleure prise de conscience du schéma corporel d'ensemble lors du mouvement (Kemoun *et al.*, 2006).

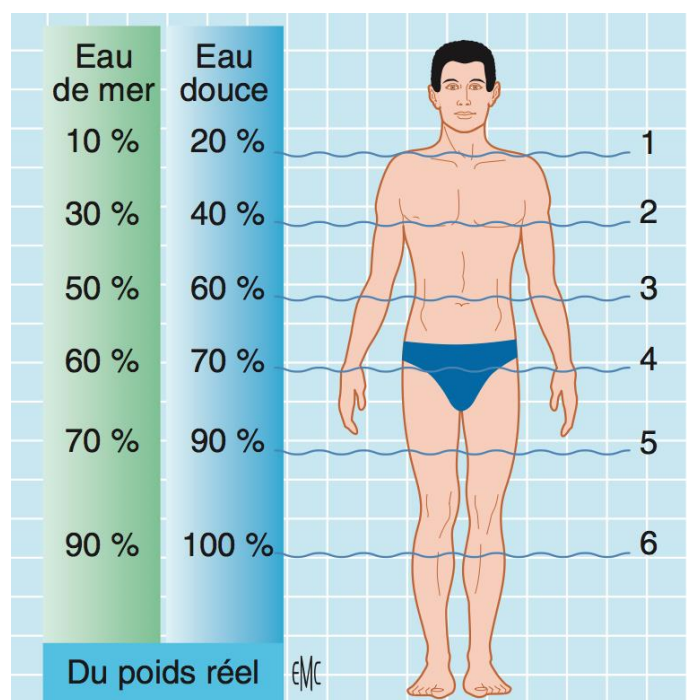


Figure 4 : Variation du poids apparent suivant le niveau d'immersion. 1. Immersion sternale ; 2. Immersion xiphoïdienne ; 3. Immersion ombilicale ; 4. Immersion pubienne ; 5. Immersion fémorale ; 6. Immersion tibiale (Kemoun *et al.*, 2006).

La progression dans l'eau provoque des efforts dit « effet hydrodynamique » qu'il est possible d'augmenter par modification de la surface d'attaque, en particulier par l'addition de palmes ou de planches ou en plaçant les membres perpendiculairement à la surface de l'eau. Plus la surface d'attaque est importante et le mouvement rapide, plus la résistance au mouvement augmente, favorisant le travail musculaire. Les turbulences créées par les déplacements en milieu aquatique peuvent augmenter ou diminuer les résistances à l'avancement et être utilisées comme hydromassage. L'hydromassage facilite l'irrigation tissulaire et procure un effet décontracturant. Les bains chauds (supérieurs à 35°C) favorisent également la décontraction musculaire et jouent un rôle dans la sédation de la douleur (Kemoun *et al.*, 2006).

La rééducation en milieu aquatique permet de stimuler le circuit proprioceptif en créant des situations de déséquilibre que le patient est invité à contrôler progressivement. Le travail de l'équilibre en milieu aquatique permet de tonifier en synergie tous les muscles de maintien en relation avec une sollicitation importante et nouvelle de la proprioception (Kemoun *et al.*, 2006).

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau thermale sont également à prendre en compte. A Nancy, le nouveau et quatrième forage (forage Michel Boulangé) a été effectué durant l'automne 2010 et la profondeur atteinte, environ 720 mètres, explorée un siècle plus tôt par les Etablissements Planchin de Vichy, a pu fournir une eau chlorurée sodique avoisinant 35°C, utilisée généralement en rhumatologie et en rééducation physique. L'eau thermale nancéienne possède les caractéristiques suivantes : chlorurée sodique faible (NaCl), avec quelques traces de bore (B), aluminium (Al), sélénium (Se), zinc (Zn), lithium (Li) et bromure (Br-) (Académie Nationale de Médecine ; Boulangé & Ruscade-Cholay, 2012 ; <http://www.medecinethermale.fr>) (Annexe 4).

III.2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Des déficits sensoriels et moteurs peuvent persister après ligamentoplastie du genou (Bonfim *et al.*, 2003). Lorsque le LCA est endommagé ou remplacé par un greffon, plusieurs mécanorécepteurs et terminaisons nerveuses ne sont pas restaurés et, bien que les mécanorécepteurs soient présents dans d'autres structures autour du genou, ils ne semblent pas fournir suffisamment d'informations pour compenser le manque de mécanorécepteurs au niveau du LCA. Néanmoins, ce déficit proprioceptif peut être progressivement compensé par une rééducation adaptée. Parmi les modes de rééducation, la rééducation dite « à sec » et la rééducation en milieu aquatique sont notamment utilisées. La rééducation dans l'eau a montré son efficacité sur la réduction de l'épanchement articulaire et sur la récupération des amplitudes articulaires, mais une faiblesse musculaire persiste en comparaison à la rééducation conventionnelle deux mois après l'intervention chirurgicale. Il a alors été suggéré que les études futures devraient analyser l'efficacité d'un programme qui combine exercices traditionnels et exercices dans l'eau avec un échantillon de patients plus important sur une période de suivi plus longue (Tovin *et al.*, 1994).

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude était de comparer un protocole de rééducation innovant, avec une partie en milieu aquatique et une partie à sec, à un protocole de rééducation conventionnel (selon les recommandations HAS, 2008a). Les dimensions d'évaluation principales étaient la cinétique de récupération et le développement des compétences proprioceptives des sportifs opérés d'une ligamentoplastie du genou.

La comparaison du protocole de rééducation innovant et du protocole de rééducation conventionnel avait pour objectifs secondaires de mettre en évidence l'amélioration fonctionnelle (douleur, amplitudes articulaires, force musculaire, performances de marche) et un retour précoce aux activités sportives, sociales et professionnelles.

Cette étude multicentrique impliquant le CHRU de Nancy, le Médipôle de Gentilly, les cliniques Louis Pasteur et Saint-André, l'IRR, l'ILFMK de Nancy et Nancy Thermal était une étude prospective, contrôlée, avec un groupe témoin suivant une rééducation conventionnelle, et randomisée, avec répartition des sujets dans deux groupes de rééducation différents par tirage au sort.

III.3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

III.3.1. Participants

Soixante-sept patients âgés de 18 à 49 ans ont participé à cette étude. Les volontaires ont été informés par les chirurgiens orthopédistes du Médipôle de Gentilly, des cliniques Louis Pasteur et Saint-André et du CHRU de Nancy.

Tous les sujets étaient des sportifs de loisir ou de compétition. Ils présentaient tous une instabilité chronique du genou, secondaire à une lésion confirmée par Imagerie par Résonnance Magnétique (IRM) ; l'indication d'une ligamentoplastie du LCA de première intention, selon les techniques TLS, DIDT ou KJ, avait été posée à l'ensemble des volontaires. Un examen médical préalable avait été réalisé par le chirurgien des patients concernés. Les sujets ne présentaient pas de difficulté de compréhension des consignes, étaient indemnes de toute maladie neurologique (accident vasculaire cérébral, maladies dégénératives du SNC ou du système nerveux périphérique) et ne prenaient pas de médication à visée psychotrope ou antihypertensive. Aucun ne présentait de contre-indication aux activités aquatiques (en particulier cutanée), ni d'autre entorse récente datant de moins de trois mois au niveau des membres inférieurs pouvant interférer sur le contrôle postural.

Cette étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes de Lorraine et enregistrée dans ClinicalTrials.gov avec l'identifiant : NCT02225613. Un consentement écrit a été recueilli auprès de chacun des patients de l'étude.

III.3.2. Protocole de rééducation

Tous les patients participant à l'étude ont débuté la même prise en charge conventionnelle en masso-kinésithérapie, selon les recommandations de la Haute Autorité de Santé, jusqu'à cicatrisation des tissus (HAS, 2008a).

Pendant trois semaines, à partir du quinzième jour post-opératoire, les sujets ont poursuivi la rééducation en fonction de la randomisation qui avait été effectuée au décours de l'inclusion, préalablement à l'intervention chirurgicale : protocole de rééducation conventionnel (selon les recommandations HAS) (Groupe 1) ou protocole de rééducation innovant dit « Nancy thermal » (Groupe 2). La durée totale de prise en charge des patients était la même quel que soit le protocole de rééducation suivi, à savoir, 45 minutes, une fois par jour, cinq fois par semaine du lundi au vendredi, durant trois semaines. Au cours des

séances de 45 minutes, 20 minutes étaient réalisées en direct avec le masseur-kinésithérapeute et 25 minutes étaient réalisées en surveillance par le masseur-kinésithérapeute.

Au-delà de ces trois semaines, les patients ont à nouveau bénéficié d'une prise en charge chez leur masseur-kinésithérapeute respectif et ont poursuivi un traitement kinésithérapique conventionnel (Figure 5).

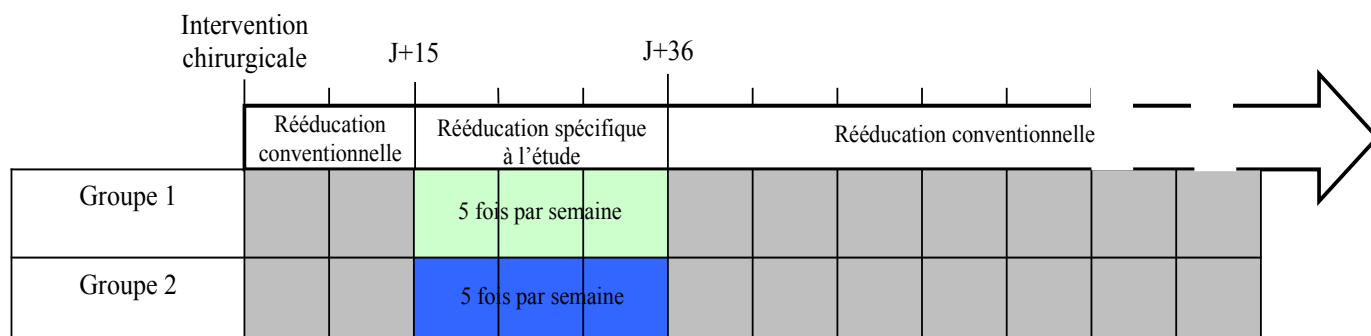


Figure 5 : Frise chronologique du protocole de rééducation. Phases de rééducation conventionnelle et de rééducation spécifique à l'étude. Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant avec une partie conventionnelle et une partie en milieu aquatique.

La rééducation, quel que soit le protocole suivi, visait à diminuer les douleurs, prévenir les troubles trophiques et circulatoires, restaurer la mobilité d'extension et de flexion du genou, obtenir le verrouillage actif du genou en extension, sécuriser l'indépendance fonctionnelle du patient, obtenir un contrôle actif du genou afin d'avoir une bonne stabilité, renforcer le membre inférieur contralatéral et obtenir une parfaite stabilité fonctionnelle.

III.3.2.1. Protocole de rééducation dit « conventionnel »

Le protocole de rééducation conventionnel se déroulait en cabinet libéral de kinésithérapie et comprenait :

- le massage : il facilite la prise de contact avec le patient et il est recommandé pour le drainage circulatoire, l'antalgie, la libération des tissus cutanés et sous-cutanés et la préparation du travail musculaire et proprioceptif (HAS, 2008a) ;
- la mobilisation passive continue : elle peut être utile pour entretenir les amplitudes articulaires lorsqu'elle est associée à la mobilisation active (HAS, 2008a) ;

- le renforcement musculaire : il concerne tous les muscles du membre inférieur. L'indication du renforcement musculaire en chaîne cinétique fermée et/ou ouverte repose sur un accord commun entre le chirurgien et le rééducateur (HAS, 2008a). Une rééducation musculaire adéquate permet d'améliorer les performances proprioceptives et donc la stabilité des sujets ayant une rupture du LCA (Tegner *et al.*, 1984) ;
- la reprogrammation neuro-motrice : elle doit être initiée précocement, en décharge puis en charge, d'un appui bipodal vers progressivement un appui unipodal. Les stimulations sont réalisées au niveau du genou mais aussi au niveau des ceintures pelvienne et scapulaire. Au fil des séances de rééducation, le travail de l'équilibre peut être poursuivi sur plan instable et la marche, initiée dans un premier temps sur terrain plat sans et avec obstacles, peut être réalisée en terrain accidenté (HAS, 2008a).

III.3.2.2. Protocole de rééducation dit « innovant »

Le protocole de rééducation innovant se déroulait au sein de la piscine ronde de Nancy Thermal et était assuré par des masseurs-kinésithérapeutes libéraux. La séance de rééducation était divisée en deux parties avec 20 minutes de rééducation à « sec » selon le protocole de rééducation conventionnel et 25 minutes de kinésithérapie en milieu aquatique.

La prise en charge en milieu aquatique comprenait la prise en charge de cinq fonctions :

- l'amplitude articulaire et la trophicité : mobilisation de la rotule, mobilisation du genou en flexion et en extension, massage profond du quadriceps ;
- le renforcement musculaire : co-contraction quadriceps/ischio-jambiers à différents degrés de flexion, travail statique du quadriceps en verrouillage du genou, squats immergés, flexion/extension avec un flotteur sous le pied, renforcement musculaire global (ischio-jambiers, fessiers, abdominaux...) ;
- la proprioception : travail de l'équilibre en immersion (bipodal, unipodal...), « surf » sur une planche ;
- la déambulation : marche immergée avec surveillance de différents paramètres (déroulé du pas, utilisation des amplitudes du genou, dissociation des ceintures...), exercices de marche (en avant, en arrière, pas chassés, montées de genou...), passage d'obstacles immergés ;
- l'endurance : marche rapide, aquabike, deep water running.

Ces paramètres permettaient un appui précoce, un renforcement musculaire sécurisé, un travail d'endurance, une lutte efficace contre la douleur et l'œdème, ainsi que le développement des informations somesthésiques. Trois des cinq items étaient travaillés par séance de rééducation en milieu aquatique (Tableau I).

Tableau I : Paramètres pris en charge à chaque séance de rééducation en milieu aquatique.

Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Amplitude/trophicité	Déambulation	Amplitude/trophicité	Déambulation	Amplitude/trophicité
Renforcement	Endurance	Renforcement	Endurance	Renforcement
Proprioception	Proprioception	Proprioception	Proprioception	Proprioception

III.3.3. Mesures

L'ensemble des sujets a bénéficié de cinq évaluations (Annexe 5) au sein des locaux bénéficiant, à Nancy Thermal, d'une Autorisation de Lieu de Recherche, sous l'œil avisé des Pr Boulangé, Pr Kanny et Pr Perrin. Ces évaluations ont eu lieu dans les huit jours qui précédaient l'intervention chirurgicale puis 15 jours, un mois, deux mois et six mois après l'intervention chirurgicale (Figure 6).

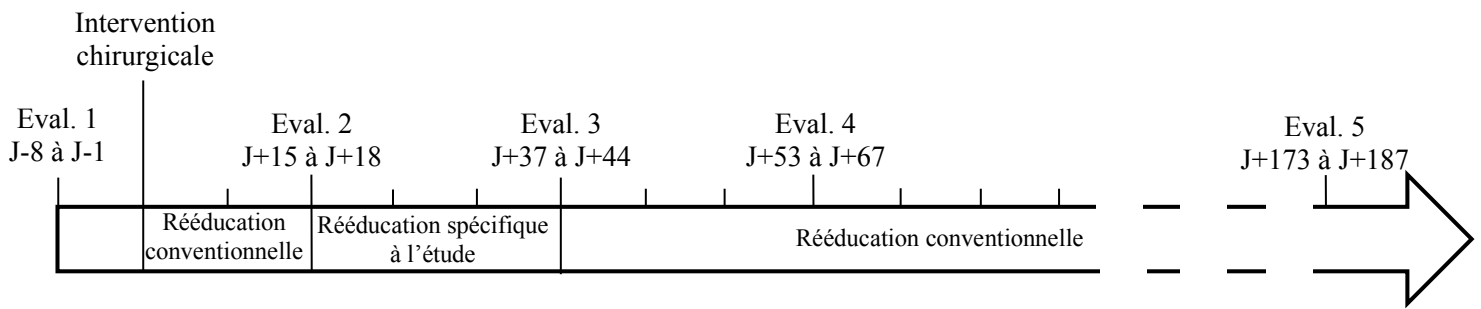


Figure 6 : Chronologie des évaluations. Eval. 1 : évaluation avant l'intervention chirurgicale ; Eval. 2 : évaluation 15 jours après l'intervention chirurgicale ; Eval. 3 : évaluation un mois après l'intervention chirurgicale ; Eval. 4 : évaluation deux mois après l'intervention chirurgicale ; Eval. 5 : évaluation six mois après l'intervention chirurgicale.

III.3.3.1. Test posturographique

L'ensemble des sujets a été soumis à une épreuve de posturographie statique sur une plateforme de forces verticales informatisée (Win-Posturo, Medicauteurs, Balma, France) (Figure 7). Cette plateforme est composée d'un plateau reposant sur trois jauges de pression. Ces jauges permettent d'enregistrer le centre de pression des pieds (CPP) et ses déplacements, c'est-à-dire le point d'application de la force résultante des forces de réactions au sol (Dupui & Montoya, 2003).



Figure 7 : Posturographie. Plateforme de forces verticales (Win-Posturo, Medicauteurs, Balma, France) (www.medicapteurs.fr).

Le test se déroulait dans une pièce insonorisée avec un éclairage artificiel. Au cours des enregistrements, les sujets, en position orthostatique sur la plateforme, devaient maintenir leurs pieds nus au niveau des repères avec un intervalle de 30°, garder les bras le long du

corps et la tête droite, respirer normalement, rester stable et détendu en minimisant autant que possible les mouvements du corps et fixer une cible placée à hauteur des yeux et séparée de la plateforme d'une distance d'un mètre vingt (Lion *et al.*, 2013 ; Perrin *et al.*, 1997).

L'évaluation de l'équilibre postural sur la plateforme de posturographie a été effectuée dans six conditions (C1 à C6), avec sensibilisation par modifications des afférences somato-sensorielles (plateau mousse) et visuelles (lunettes de réalité virtuelle, RM Ingénierie, Rodez, France) (Chiarovano *et al.*, 2015) (Figure 8) afin d'évaluer la contribution respective de chaque entrée sensorielle dans le contrôle de l'équilibre à chacune des cinq évaluations prévues dans le protocole (Tableau II). Ainsi, l'équilibre a été mesuré les yeux ouverts (C1), les yeux fermés (C2) et vision faussée ou asservie par le port de lunettes de réalité virtuelle projetant une photographie de la cible fixée par les patients à C1 (C3). Puis les mesures ont été réalisées avec les yeux ouverts, les yeux fermés, la vision faussée ou asservie par le port de lunettes de réalité virtuelle en ajoutant un revêtement en mousse sur la plateforme pour fausser les informations somesthésiques (C4, C5 et C6) (Peultier *et al.*, 2015 ; Shumway-Cook & Horak, 1986).



Figure 8 : Evaluation de l'équilibre postural avec sensibilisation par modification des afférences visuelles (lunettes de réalité virtuelle, RM Ingénierie, Rodez, France).

Tableau II : Entrées sensorielles présentes (blanc), faussées (gris) ou supprimées (noir) dans chaque condition sensorielle du test d'équilibre.

Posturographie Conditions sensorielles du test	Oreille interne	Vision	Somesthésie
C1 – Yeux ouverts			
C2 – Yeux fermés			
C3 – Vision faussée			
C4 – Yeux ouverts, somesthésie faussée			
C5 – Yeux fermés, somesthésie faussée			
C6 – Vision faussée, somesthésie faussée			

C1 : condition 1 ; C2 : condition 2 ; C3 : condition 3 ; C4 : condition 4 ; C5 : condition 5 ; C6 : condition 6.

Les déplacements du CPP étaient enregistrés pendant 25,6 secondes à une fréquence d'acquisition de 40 Hz pour chacune des six conditions et représentés sous la forme d'un statokinésigramme (Figure 9). Ces déplacements permettaient de mesurer la longueur parcourue et la surface couverte par le CPP. Plus les valeurs en longueur et en surface étaient faibles, meilleur était le contrôle postural (Era & Heikkinen, 1985 ; Perrin *et al.*, 1999 ; Gauchard *et al.*, 2003) reflétant respectivement la consommation d'énergie requise pour assurer le contrôle postural et la précision de ce système (Perrin *et al.*, 1996). Le test d'équilibre permettait également de quantifier les déviations dans le plan médio-latéral (Xmoyen). Plus les valeurs étaient proches de zéro moins la déviation était marquée, les valeurs négatives reflétant une déviation latérale gauche et des valeurs positives une déviation latérale droite.

Un Score Global d'Equilibre (SGE) était calculé pour chaque patient en faisant la moyenne des résultats obtenus pour la surface couverte et la longueur parcourue par le CPP dans les six conditions du test d'équilibre. Ce calcul du SGE a été adapté du Sensory Organization Test (Shumway-Cook & Horak, 1986 ; Herpin *et al.*, 2009). Plus les valeurs étaient faibles, plus elles reflétaient un bon contrôle postural (Peultier *et al.*, 2017 ; Tarantola *et al.*, 1997 ; Vouriot *et al.*, 2005).

Les surfaces des scores d'équilibre obtenus dans certaines conditions étaient rapportées à celles obtenues en C1 de manière à évaluer la qualité d'utilisation de chaque système sensoriel impliqué dans le contrôle postural. Le ratio $C2/C1$ (R^{SOM}) représente la contribution proprioceptive dans le contrôle de l'équilibre, le ratio $C4/C1$ (R^{VIS}) la contribution visuelle et le ratio $C5/C1$ (R^{VEST}) la contribution vestibulaire (Gauchard *et al.*, 2010). Plus les ratios des entrées sensorielles étaient faibles, meilleure était l'utilisation de ces entrées sensorielles.

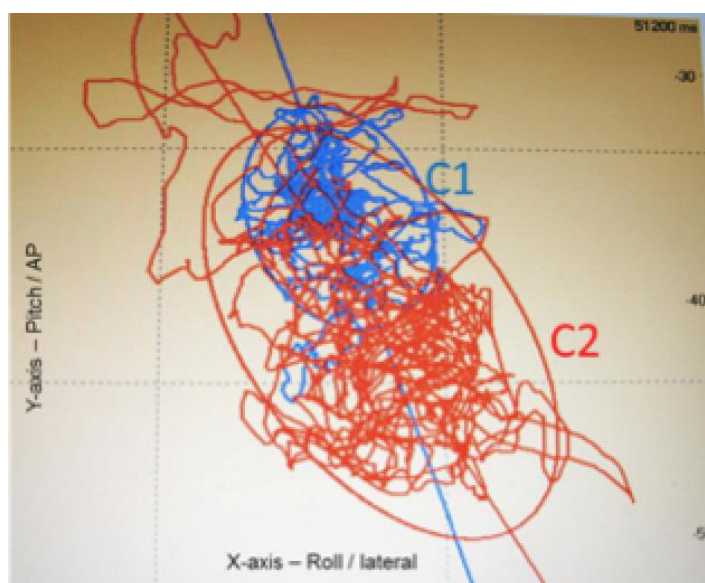


Figure 9 : Statokinésigramme obtenu par le test de posturographie statique. Longueur parcourue et surface couverte (ellipse de confiance englobant 90 % des points) par le centre de pression des pieds dans les conditions yeux ouverts (C1) et yeux fermés (C2, valeurs élevées) (Win-Posturo, Medicauteurs, Balma, France).

III.3.3.2 Tests d'évaluation de la récupération

Analyse cinématique du membre inférieur atteint :

L'analyse cinématique a été réalisée à partir de quatre capteurs de mouvement (BioVal, RM Ingénierie, Rodez, France) à l'évaluation 1, et à l'évaluation 4. Ces capteurs permettaient de mesurer les angles articulaires entre deux segments corporels. Les capteurs, après calibration, étaient placés au niveau des CG du pied, de la jambe et de la cuisse du membre lésé ainsi qu'au niveau de la cinquième vertèbre lombaire et fixé à l'aide d'un patch

autocollant. Les CG de chaque segment étaient calculés à partir de la longueur du segment et des tables anthropométriques de Winter (1990b) (Annexe 6).

Au cours de cette analyse cinématique, les patients devaient maintenir leur équilibre sur un plateau de Freeman qui oscillait dans le plan antéro-postérieur. Après 10 secondes en station debout à côté du plateau de Freeman afin de calibrer les capteurs BioVal, les sujets disposaient de 10 secondes pour monter sur le plateau puis devaient maintenir leur équilibre pendant 40 secondes (Figure 10).

Les sujets avaient pour consigne de fléchir légèrement les genoux, de placer les bras le long du corps, de fixer un point placé au mur et séparé du plateau de 1,20 mètres et de maintenir l'équilibre en oscillant le moins possible.



Figure 10 : Analyse cinématique à l'aide de capteurs de mouvement (BioVal, RM Ingénierie, Rodez, France).

Les données brutes obtenues ont été traitées avec logiciel MATLAB[®] (The MathWorks[™] Inc., Natick, MA, USA) (Annexe 7). Ce traitement de données visait à mettre en évidence la stratégie d'équilibration utilisée par le patient :

- articulation de la cheville. Une sollicitation importante de la cheville dans le maintien de l'équilibre correspond à une stratégie ascendante (« bottom up ») ou de cheville (ankle strategy) (Nashner & McCollum, 1985 ; Horak & Nashner, 1986). Dans ce type

de stratégie, qui traduit une grande stabilité, le sujet déplace son centre de gravité corporel par rotation autour de l'axe formé par l'articulation de la cheville. Il oscille comme un pendule inversé, les mouvements du genou et de la hanche étant négligeables (Rouanne *et al.*, 1993). Ce type de stratégie est considéré comme anticipatoire (Gauchard *et al.*, 2001b ; Perrin *et al.*, 2002) ;

- articulation de la hanche. Cette stratégie d'équilibre témoigne d'une certaine instabilité et correspond à une stratégie descendante (« top down ») ou stratégie de hanche (hip strategy) (Nashner & McCollum, 1985 ; Horak & Nashner, 1986). Cette stratégie favorise un ancrage visuel et un référentiel vestibulaire, impliquant des mouvements des hanches qui vont repositionner le CG à l'intérieur du polygone de sustentation. Ce type de stratégie est considéré comme réactionnel (Gauchard *et al.*, 2001b).

Par ailleurs la réalisation d'une tâche posturale sur un plateau mobile n'est pas associée à la mise en place d'une simple stratégie de cheville mais s'accompagne d'une stratégie inter-segmentaire plus complexe. L'articulation du genou a un rôle crucial pour dissiper les forces inertielles induites par les mouvements du plateau mobile (Noé *et al.*, 2017). Gauchard *et al.*, (2010) ont d'ailleurs montré qu'une amélioration des capacités dynamiques du genou chez les patients souffrant d'arthrose leur redonnait la possibilité d'utiliser une stratégie de cheville dans le maintien de l'équilibre à un niveau équivalent à celui de sujets sains.

Échelle de douleur du genou atteint :

L'Échelle Visuelle Analogique (EVA) est une échelle subjective permettant aux patients d'évaluer l'intensité de la douleur ressentie au moyen d'un curseur. Elle se présente généralement sous la forme d'une ligne droite, verticale ou horizontale, longue de 100 mm. Les deux extrémités représentent les limites extrêmes de l'échelle de douleur, l'une des extrémités correspondant à l'absence de douleur et l'autre extrémité correspondant à la pire douleur ressentie. L'évaluation consistait à mesurer la distance (en millimètres) entre le point marquant l'absence de douleur et le point d'évaluation (Boureau & Luu, 1988 ; Huskisson, 1974). La douleur était mesurée aux cinq évaluations prévues dans le protocole.

Évaluation proprioceptive du genou atteint :

Ce test était réalisé en position assise, sur une chaise, sans contact avec l'assise de la moitié inférieure de la partie postérieure de la cuisse. Le membre testé reposait sur un skateboard. Les patients réalisaient alternativement, yeux fermés, des mouvements de flexion et d'extension. Le membre inférieur était amené, par le masseur-kinésithérapeute, passivement en flexion ou en extension à une angulation arbitraire avant d'être replacé passivement dans la position initiale neutre. Les patients, yeux fermés, devaient alors fléchir activement le membre testé afin de le replacer au même angle que la position passive déterminée par le masseur-kinésithérapeute (Good *et al.*, 1999). L'erreur était mesurée en degrés grâce à un inclinomètre placé sur la partie proximale du tibia, en dessous de la tubérosité antérieure (Figure 11). Le test était réalisé aux évaluations 1 et 4, au niveau du membre sain et du membre blessé, en flexion puis en extension afin de déterminer l'erreur proprioceptive entre les deux genoux (Carter *et al.*, 1997 ; Chatrenet, 2013 ; Fisher-Rasmussen & Jensen, 2000 ; Missaoui *et al.*, 2008).

Ce test permettait de déterminer l'approche proprioceptive du genou blessé par rapport à l'approche proprioceptive du genou sain, c'est-à-dire, la capacité des sujets à percevoir la position de leurs membres dans l'espace.



Figure 11 : Evaluation proprioceptive du genou.

Amplitudes articulaires du genou atteint :

Les amplitudes articulaires étaient mesurées à partir d'un goniomètre qui permettait de quantifier le débattement articulaire, les déformations orthopédiques mais aussi d'observer les phénomènes douloureux et les sensations de fin de course. Afin de réaliser les mesures, trois points anatomiques étaient choisis rigoureusement et correspondaient à des repères osseux : le centre du goniomètre était placé sur la projection cutanée du centre articulaire du genou en regard de l'épicondyle latéral, la branche fixe en correspondance du milieu du bord supérieur du grand trochanter et la branche mobile en correspondance de l'apex de la malléole latérale. Les amplitudes articulaires étaient évaluées en flexion et en extension, actives et passives (Chatrenet, 2013 ; Neiger & Genot, 1983 ; Royer & Cecconello, 2004), la goniométrie active ayant l'avantage de donner un aspect fonctionnel de la mobilité articulaire (Neiger & Genot, 1983). Ces amplitudes articulaires étaient mesurées dans le plan sagittal aux évaluations 2, 3, 4 et 5.

Trophicité du genou atteint :

La trophicité correspond à l'ensemble des mécanismes et des processus qui participent à la nutrition et à la croissance des organes et des tissus. L'évaluation clinique trophique du genou concerne les aspects circulatoires et la cavité articulaire. L'épanchement de la cavité articulaire se traduit par une augmentation de son volume, gonflant les culs-de-sacs synoviaux. L'œdème du genou lié à des troubles veinolymphatiques se caractérise par une augmentation du volume du genou diffusant largement sur la jambe et la cuisse. La trophicité était mesurée à l'aide du test du godet aux évaluations 2, 3, 4 et 5. Ce test consistait à exercer une pression digitale sur l'œdème après quoi, il était observé si l'empreinte laissée par le doigt disparaissait rapidement ou non. Ce test était positif si l'empreinte disparaissait lentement (Chatrenet, 2013).

Évaluation Manuelle de la Force Musculaire (EMFM) du genou atteint :

L'Évaluation Manuelle de la Force Musculaire (EMFM) s'effectuait en extension du genou pour évaluer la force musculaire du quadriceps fémoral puis en flexion du genou pour évaluer la force musculaire des ischio-jambiers. Ce test qualitatif et subjectif était réalisé par les masseurs-kinésithérapeutes aux évaluations 2, 3, 4 et 5.

En fonction des capacités musculaires du sujet, l'évaluation du quadriceps pouvait être réalisée dans des positions différentes :

- test 1 : le sujet était assis en bord de table, le fémur en position horizontale. Il devait étendre le genou au maximum sans dépasser une amplitude de 0° (Hislop & Montgomery, 2011) ;
- test 2 : le sujet était positionné en décubitus latéral avec le membre inférieur à tester sur le dessus. Le membre en contact avec la table pouvait être fléchi pour assurer la stabilité. Le côté à tester était soutenu par l'examineur à 90° de flexion du genou avec la hanche en extension complète. Le patient tentait d'étendre le genou au maximum (Hislop & Montgomery, 2011) ;
- test 3 : le sujet était allongé sur le dos et tentait d'étendre le genou (Hislop & Montgomery, 2011).

Une cotation allant de 0 (absence de contraction) à 5 (contraction normale) était attribuée en fonction de la force musculaire développée (Tableau III).

Tableau III : Évaluation de la force musculaire du quadriceps.

Tests	Valeurs	Capacités du sujet
Test 1	Valeur 5 (normal)	La position finale est maintenue contre résistance maximale.
	Valeur 4 (bon)	La position finale est maintenue contre une résistance forte à modérée.
	Valeur 3 (passable)	L'amplitude du mouvement est complète et le maintien de la position est possible sans résistance.
Test 2	Valeur 2 (faible)	L'amplitude du mouvement est complète en décubitus latéral.
Test 3	Valeur 1 (trace)	Une contraction peut se palper par l'intermédiaire du tendon rotulien.
	Valeur 0 (zéro)	Il n'y a aucune contraction palpable.

De même, en fonction des capacités musculaires du sujet, l'évaluation de la force musculaire des ischio-jambiers pouvait être réalisée dans différentes positions :

- test 1 : l'évaluation était réalisée en décubitus ventral et les ischio-jambiers pouvaient être considérés dans leur ensemble ou séparément avec une évaluation des ischio-jambiers internes (semi-tendineux et semi-membraneux) ou externes (biceps fémoral). Pour évaluer les ischio-jambiers dans leur ensemble, le sujet devait fléchir le genou au maximum tout en maintenant une rotation neutre. Pour évaluer les ischio-jambiers internes, le sujet devait fléchir le genou en maintenant le segment jambier en rotation médiale (orteils pointés vers le centre). Pour évaluer les ischio-jambiers externes, le sujet devait fléchir le genou en maintenant le segment jambier en rotation latérale (orteils orientés vers le dehors) (Hislop & Montgomery, 2011) ;
- test 2 : le sujet était positionné en décubitus latéral avec le membre inférieur à tester soutenu par l'examineur. Le membre en contact avec la table était fléchi pour assurer la stabilité. Le patient devait fléchir le genou testé au maximum (Hislop & Montgomery, 2011) ;
- test 3 : le sujet était positionné en décubitus ventral, membres inférieurs étendus avec les pieds dépassant de la table. Le genou testé était en partie fléchi et soutenu au niveau de la cheville par l'examineur. Le sujet tentait de fléchir le genou au maximum (Hislop & Montgomery, 2011).

Suite à l'examen, une valeur allant de 0 (absence de contraction) à 5 (contraction normale) était attribuée au sujet (Tableau IV).

Tableau IV : Évaluation de la force musculaire des ischio-jambiers.

Tests	Valeurs	Capacités du sujet
Test 1	Valeur 5 (normal)	La résistance est maximale et le genou, en flexion à 90°, ne cède pas.
	Valeur 4 (bon)	La position finale en fin de course est maintenue contre une résistance allant de forte à modérée.
	Valeur 3 (passable)	La position est maintenue en fin de course mais ne tolère pas de résistance.
Test 2	Valeur 2 (faible)	L'amplitude du mouvement est complète en décubitus latéral.
Test 3	Valeur 1 (trace)	Le sujet tente de fléchir le genou.
	Valeur 0 (zéro)	Il n'y a aucune contraction palpable et les tendons ne font pas saillie.

Performance de marche :

Le « six minutes walk test » consistait à mesurer la plus grande distance possible que pouvait parcourir, en marchant et à son rythme, un sujet en six minutes. Le test était réalisé dans un couloir de 40 mètres, couvert, plat, rectiligne, bien délimité, non fréquenté et marqué tous les 3 mètres (Figure 12). A chaque extrémité du couloir se trouvait un cône marquant l'endroit des demi-tours. Le sujet ne devait pas avoir effectué d'effort dans l'heure qui précédait le test. Afin que le test soit réalisé dans les meilleures conditions, un certain nombre d'instructions étaient données au sujet (Abdel Kafi & Deboeck, 2005) (Annexe 8).

Ce test était réalisé aux évaluations 3 et 5.



Figure 12 : Test de performance de marche.

Test d'isocinétisme :

Un test d'isocinétisme permettant d'évaluer la fonction musculaire était réalisé six mois après l'intervention chirurgicale. Le patient était installé sur une chaise avec un bras de résistance placé au niveau de la partie distale du membre inférieur. L'axe mécanique du bras de résistance était aligné sur l'épicondyle latéral du fémur. Des sangles étaient utilisées pour améliorer la stabilisation des autres parties du corps et ainsi isoler la partie à tester (Davies, 1992 ; Törpel *et al.*, 2017) (Figure 13).

Après une courte période de familiarisation avec l'appareil, le sujet devait alternativement tendre puis fléchir le membre inférieur. La vitesse du mouvement était constante et la résistance exercée par la machine isocinétique était auto-adaptée à la force musculaire développée par le patient (Brasileiro *et al.*, 2011). Cette méthode permettait d'obtenir, grâce à la résistance auto-adaptée, une contraction musculaire maximale sur l'amplitude totale d'un mouvement articulaire. L'évaluation était effectuée dans un premier temps sur le membre contralatéral puis ensuite sur le membre ipsilatéral à la lésion afin d'établir une comparaison de la force musculaire et mettre en évidence une éventuelle différence asymétrique entre les deux membres (Davies, 1992) à des vitesses de $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ puis $180^{\circ} \cdot s^{-1}$. Cette mesure objective donnait des informations sur la force musculaire maximale, le

déficit musculaire entre le membre ispatéral et contralatéral à la lésion, ou encore le ratio ischio-jambiers/quadriceps (Davies, 1992).

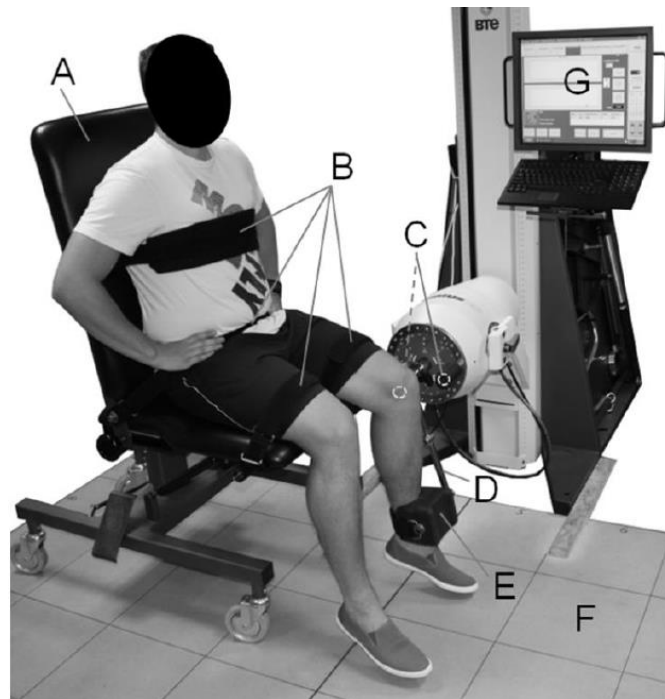


Figure 13 : Evaluation de la force musculaire par isocinétisme. A : chaise de positionnement ; B : sangles ; C : dynamomètre ; D : bras de levier ; E : sanglage tibial ; F : plateau de coordination ; G : système informatique (Figure adaptée de Törpel *et al.*, 2017).

III.3.3.3. Questionnaires

Score fonctionnel de Lysholm-Tegner :

Le score fonctionnel de Lysholm-Tegner était calculé à partir d'un questionnaire à réponses fermées, complété par chacun des sujets et permettant l'appréciation de huit items : l'instabilité (25 points), la douleur (25 points), le gonflement (10 points), les blocages (15 points), la capacité des sujets à descendre et monter les escaliers (10 points), l'accroupissement (5 points), la boiterie (5 points) ou encore l'utilisation ou non de cannes (5 points). Le score final était exprimé nominalement et pouvait varier entre 0 et 100, 100 étant la note maximale. Un score supérieur à 83 était considéré comme bon et très bon, un score compris entre 65 et 83 était considéré comme moyen et un score inférieur à 65 était considéré

comme mauvais (Chatrenet, 2013 ; Tegner & Lysholm, 1985) (Annexe 9). Ce score était calculé aux évaluations 1 et 5.

Score fonctionnel IKDC :

Le score fonctionnel IKDC (International Knee Documentation Committee) était calculé à partir d'une évaluation subjective basée sur un questionnaire rempli par chacun des sujets. Les questions étaient relatives au niveau d'activité, à la douleur, à la raideur, au gonflement, au blocage du genou, au dérobement, aux activités sportives, aux capacités à monter ou descendre les escaliers, à s'accroupir, s'asseoir, se lever d'une chaise ou courir en ligne droite, sauter et se réceptionner sur la jambe faible, s'arrêter et repartir brusquement. L'ensemble des questions admettait pour réponse : pas difficile, légèrement difficile, difficile, très difficile ou impossible. Un score était calculé, 100 signifiant qu'il n'y avait aucune limite aux activités quotidiennes et sportives et que les symptômes étaient nuls (Chatrenet, 2013 ; Hefti *et al.*, 1993). Une dernière question demandait aux patients de juger la fonction du genou avant l'accident ou la blessure et au moment de la passation du questionnaire, sur une échelle allant de 0 à 10, 10 étant la performance optimale (Annexe 10). Le questionnaire était complété aux évaluations 1 et 5.

Score de qualité de vie :

Le score de qualité de vie KOOS (Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score) était calculé à partir d'un questionnaire rempli par les patients et dont les questions portaient sur la fonction du genou au cours de la vie quotidienne et sur les activités sportives ou de loisirs. Pour chaque catégorie de questions (symptômes, douleur, fonction et vie quotidienne, sport et loisirs, qualité de vie) un pourcentage était calculé, 100 % étant le meilleur résultat pouvant être obtenu (Roos *et al.*, 1998) (Annexe 11). La passation de ce questionnaire se faisait aux évaluations 1 et 5.

Auto-questionnaire sur la pratique des activités sportives :

L'auto-questionnaire sur la pratique des activités sportives visait à connaître les activités sportives pratiquées par les patients au moment de la passation du questionnaire et dans le passé (Annexe 12). Ce questionnaire était complété à l'évaluation 1.

Auto-questionnaire sur les paramètres socio-professionnels :

L'auto-questionnaire sur les paramètres sociaux et professionnels comprenait des questions relatives à la reprise des activités sociales, sportives et professionnelles (Annexe 13). Ce questionnaire était complété par les patients aux évaluations 3, 4 et 5.

III.3.4. Méthode

III.3.4.1. Randomisation

La randomisation est un procédé selon lequel l'attribution d'un traitement à un patient se fait de manière aléatoire par tirage au sort. Cette méthode vise à réduire les biais dans la réalisation d'une étude en obtenant deux groupes homogènes comparables dès le début de l'essai. La randomisation associe au patient un traitement selon le fruit du hasard et supprime les biais de sélection (Kunz & Oxman, 1998).

Les patients n'étant pas autorisés à choisir le protocole de rééducation, un tirage au sort était réalisé. La randomisation centralisée et indépendante par programme informatique permettait d'obtenir deux groupes qui correspondaient aux deux programmes de rééducation. Le programme de rééducation était ainsi dévoilé au patient le jour de la visite d'inclusion, à l'évaluation 1, après signature du consentement.

III.3.4.2. Analyse statistique

Les données qualitatives ont été exprimées en nombre (n) et pourcentage (%). Les données quantitatives ont été exprimées en moyenne et écart-type (ET).

Une analyse transversale visait à comparer les deux groupes de rééducation à chacune des évaluations. Les comparaisons de fréquences en séries indépendantes ont été effectuées avec le test du Khi2. Les comparaisons des moyennes entre les deux groupes de rééducation ont été effectuées par le test de Student en séries indépendantes. L'analyse de variance ANOVA a été utilisée pour étudier les relations entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes explicatives. Même si la loi n'est pas Gaussienne, le test de Student et l'analyse de variance peuvent être utilisés à partir de 30 sujets par groupe, grâce aux théorèmes de convergence vers la loi normale. En raison de la faiblesse numérique des populations testées sur le test d'isocinétisme et l'analyse cinématique, le test non

paramétrique de Mann & Whitney a été utilisé pour effectuer les comparaisons entre les deux groupes. Un niveau de probabilité $p \leq 0,05$ était considéré comme significatif.

Une analyse longitudinale visait à apprécier la progression des patients dans un groupe donné entre deux évaluations. Les comparaisons de moyennes entre les différentes évaluations dans un même groupe ont été effectuées par le test de Student en séries appariées. L'analyse de variance ANOVA a été utilisée pour étudier les relations entre une variable dépendante et une variable indépendante explicative. En raison de la faiblesse numérique des populations testées sur l'analyse cinématique, le test non paramétrique de Wilcoxon a été utilisé pour effectuer les comparaisons intergroupes. Un niveau de probabilité $p \leq 0,05$ était considéré comme significatif mis à part pour les résultats du test de posturographie. Pour ce dernier, afin de tenir compte des comparaisons multiples, la procédure de Bonferroni a été appliquée aux comparaisons par paires avec un ajustement à un niveau significatif $p < 0,05/5 = 0,01$ en raison des cinq évaluations.

Le logiciel SPSS Statistics (IBM, Armonk, New York, USA) version 23.0 a été utilisé pour l'ensemble des analyses.

III.4. RÉSULTATS

III.4.1. Caractéristiques de la cohorte

Soixante-seize patients ont été inclus dans cette étude et parmi ces 76 patients, 69 ont terminé l'étude. Les raisons des perdus de vue étaient les suivantes : rupture seulement partielle du ligament constatée lors de l'intervention chirurgicale (1), non satisfaction vis-à-vis du groupe de rééducation tiré au sort (1), souhait d'arrêter l'étude pour raison personnelle (2), raisons inconnues (personnes non joignables par téléphone) (3). Parmi ces 69 patients, une lésion méniscale était survenue lors de la période de suivi (2).

Trente-cinq patients ont été affectés dans le protocole de rééducation conventionnel (groupe 1) et 32 patients dans le protocole de rééducation innovant (groupe 2) (Figure 14). Sur les 67 patients retenus pour l'analyse, 56 se sont présentés au test d'isocinétisme.

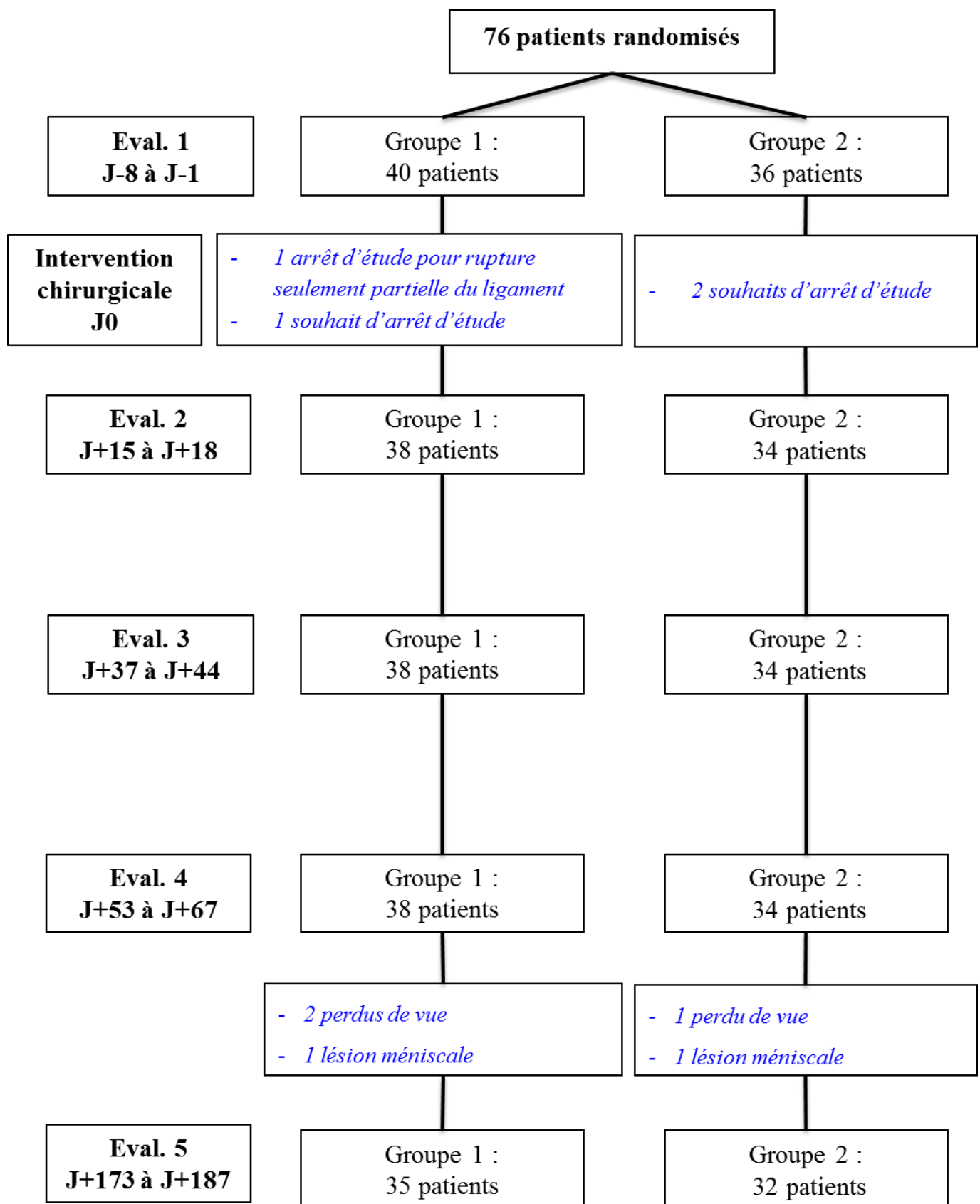


Figure 14 : Organigramme de participation à l'étude. Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant.

III.4.1.1. Données anthropométriques

Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes de rééducation pour l'âge, la taille, le poids, l'IMC et le sexe (Tableau V).

Tableau V : Moyenne et écart-type de l'âge, de la taille, du poids et de l'indice de masse corporelle observés chez les patients du protocole de rééducation conventionnel et du protocole de rééducation innovant.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	p-value
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	Test de Student
Âge (années)	29,91 ± 7,70	28,22 ± 7,38	0,364
Taille (m)	1,72 ± 0,08	1,76 ± 0,10	0,064
Poids (kg)	69,59 ± 11,55	73,34 ± 13,54	0,225
IMC (kg.m ⁻²)	23,46 ± 2,70	23,44 ± 2,57	0,971
	n (%)	n (%)	Test du Khi2
Sexe, hommes	21 (60,00)	26 (80,25)	0,058

ET : Ecart-type

IMC : Indice de Masse Corporelle

III.4.1.2. Pratique d'activités physiques et origine lésionnelle

La majorité des sujets recrutés avait déclaré pratiquer une ou plusieurs activités physiques et sportives de manière régulière, comme le football, le handball, la natation ou encore la course à pied (Tableau VI).

Tableau VI : Pratique d'activités physiques et sportives.

Questions posées	Réponses positives n (%)
Actuellement, pratiquez-vous des activités sportives ?	50 (74,63)
Dans le passé, avez-vous pratiqué d'autres activités sportives ?	46 (68,66)

Parmi les patients retenus pour l'analyse statistique, 86,57 % se sont blessés en pratiquant une activité physique et sportive (88,57 % dans le groupe 1 et 84,38 % dans le groupe 2) (Figure 11). Parmi les traumatismes en lien avec une activité physique et sportive, 68,97 % ont eu lieu au cours d'un sport de pivot avec contact (sport collectif ou sport de combat), 27,59 % ont eu lieu au cours d'un sport de pivot sans contact (sport de glisse ou sport de raquettes) et 3,45 % ont eu lieu au cours d'un sport sans pivot (Figure 12).

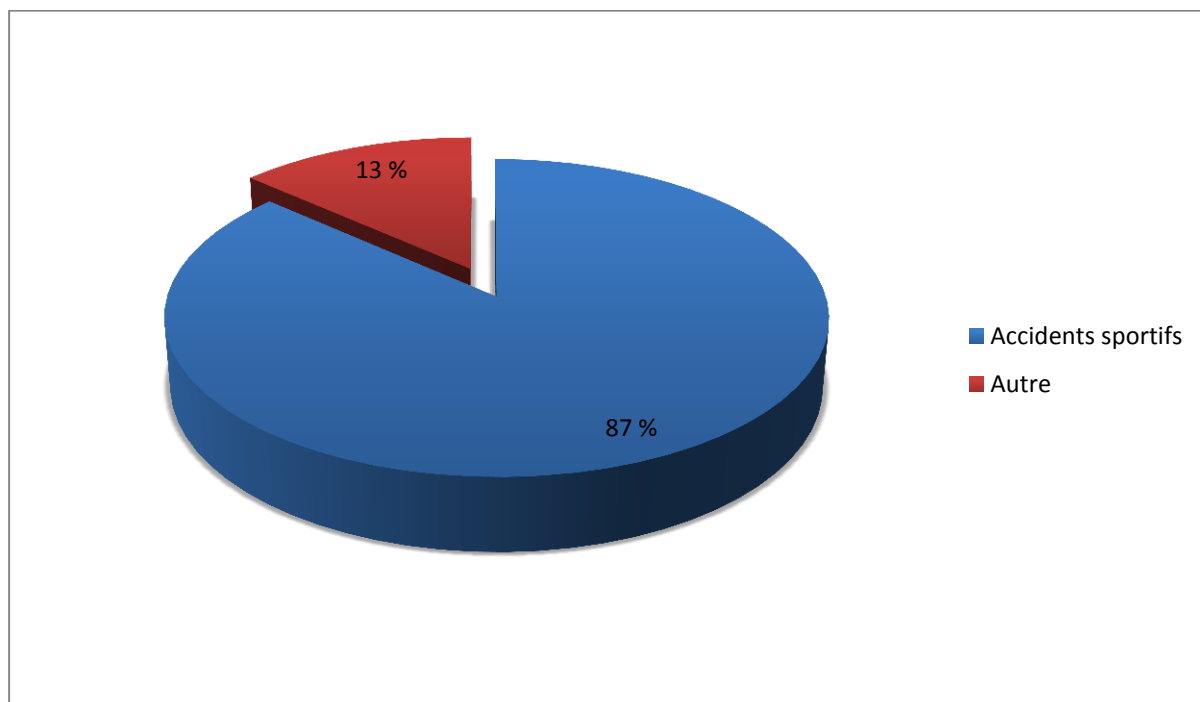


Figure 15 : Cause lésionnelle des ruptures du ligament croisé antérieur.

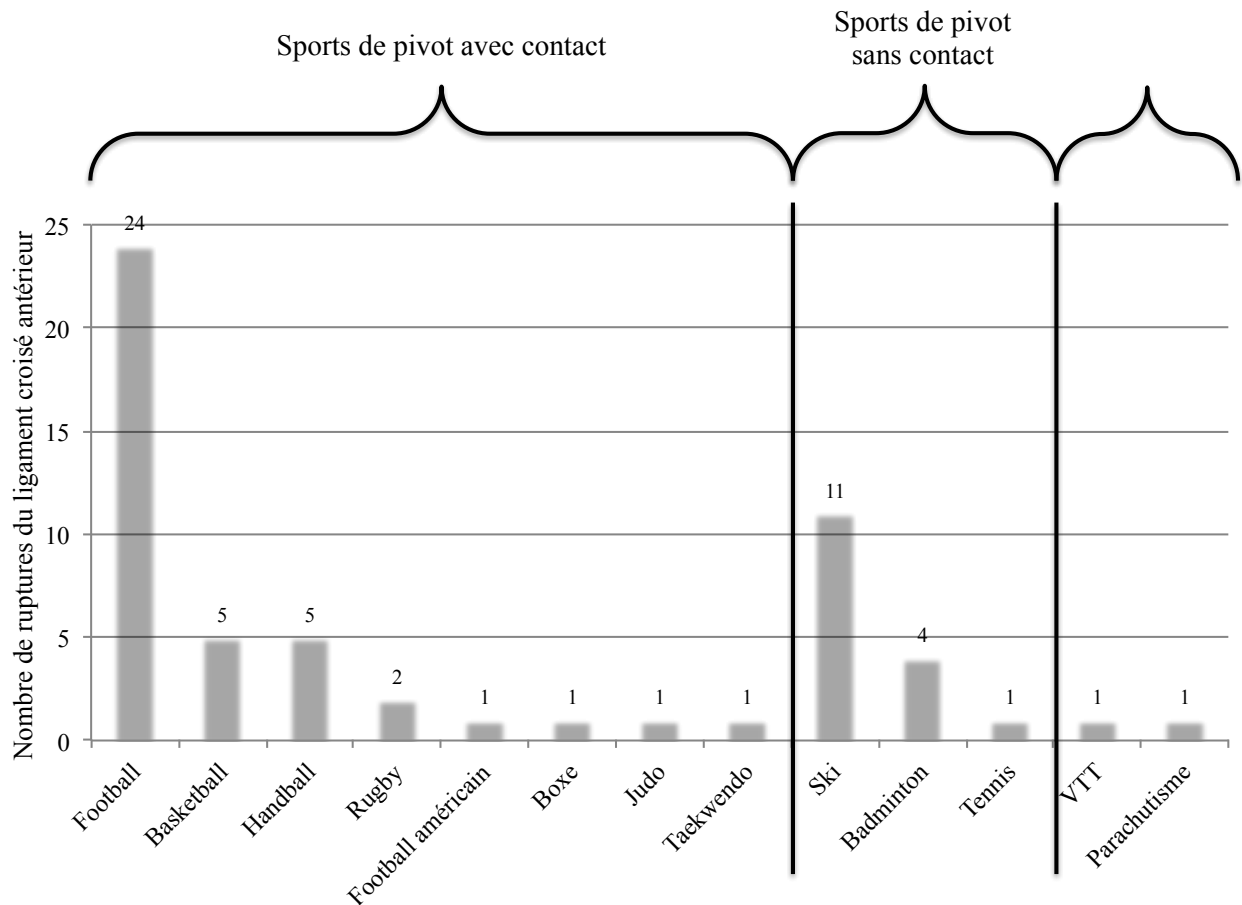


Figure 16 : Nombre de ruptures de ligament croisé antérieur dans les différentes activités physiques et sportives pratiquées par les patients participant à l'étude.

III.4.1.3. Technique chirurgicale

Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes de rééducation concernant les techniques chirurgicales utilisées ($p = 0,427$). Dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel, 23 patients (65,71 %) ont été opérés avec les techniques TLS et DIDT contre 18 patients (56,25 %) dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

III.4.2. Analyse transversale

III.4.2.1. Tests d'équilibre

La surface couverte par le centre de pression des pieds était significativement plus faible à la condition 1 de l'évaluation 5 chez les patients ayant bénéficié des soins de rééducation conventionnels par rapport aux patients ayant bénéficié du protocole de

rééducation innovant ($p = 0,034$). Néanmoins, pour chacune des cinq évaluations, aucune différence significative du SGE en surface (Tableau VII) et en longueur (Tableau VIII) n'a été observée entre les deux groupes de rééducation.

Tableau VII : Comparaison de la surface couverte (en mm²) par le centre de pression des pieds dans les deux groupes de rééducation, à chaque évaluation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1			
C1	152,35 ± 83,40 145,40 (91,95 ; 201,20)	149,71 ± 124,24 121,40 (95,18 ; 161,45)	0,919
C2	198,25 ± 109,46 189,80 (118,05 ; 242,35)	211,19 ± 133,80 177,30 (103,50 ; 254,78)	0,665
C3	184,82 ± 110,52 147,20 (106,15 ; 282,75)	216,41 ± 178,04 157,50 (108,00 ; 269,68)	0,382
C4	451,40 ± 180,53 433,10 (346,90 ; 566,00)	487,93 ± 247,55 437,10 (312,18 ; 558,13)	0,490
C5	1545,24 ± 623,36 1504,60 (1114,05 ; 1972,15)	2039,09 ± 1306,57 1580,50 (1377,23 ; 1974,70)	0,058
C6	1270,61 ± 612,59 1167,20 (909,20 ; 1516,70)	1501,48 ± 1118,03 1241,45 (973,53 ; 1667,70)	0,293
SGE	633,78 ± 229,36 595,50 (474,33 ; 774,43)	767,64 ± 459,74 641,95 (530,08 ; 851,93)	0,131
Evaluation 2			
C1	257,95 ± 159,86 334,74 (269,60 ; 395,57)	229,64 ± 129,11 322,10 (267,15 ; 413,02)	0,431
C2	308,85 ± 168,03 260,70 (212,75 ; 386,05)	362,25 ± 306,28 244,95 (172,18 ; 444,15)	0,374
C3	292,42 ± 160,16 252,60 (181,55 ; 360,46)	380,42 ± 264,22 311,70 (230,85 ; 470,58)	0,109
C4	501,52 ± 241,62	458,37 ± 167,69	0,404

	455,70 (350,80 ; 612,45)	422,95 (325,73 ; 606,98)	
C5	1497,67 ± 673,59	1568,46 ± 867,91	0,709
	1329,20 (1084,23 ; 1716,57)	1360,35 (944,15 ; 1906,73)	
C6	1318,40 ± 606,08	1446,29 ± 748,08	0,443
	1165,80 (845,75 ; 1763,25)	1302,20 (887,48 ; 1740,78)	
SGE	696,13 ± 251,07	740,90 ± 348,25	0,546
	635,45 (509,33 ; 862,35)	642,17 (537,73 ; 862,35)	
Evaluation 3			
C1	189,95 ± 97,93	237,45 ± 196,92	0,210
	171,70 (132,35 ; 236,80)	171,00 (131,03 ; 277,95)	
C2	246,07 ± 148,41	306,62 ± 188,66	0,152
	195,80 (143,45 ; 358,20)	301,15 (132,43 ; 462,10)	
C3	271,57 ± 201,67	317,03 ± 212,55	0,372
	224,60 (143,90 ; 334,50)	270,55 (179,93 ; 371,75)	
C4	438,06 ± 153,00	460,32 ± 172,68	0,578
	403,60 (360,15 ; 536,25)	416,75 (340,55 ; 557,33)	
C5	1352,72 ± 640,71	1379,92 ± 584,16	0,857
	1345,40 (958,25 ; 1498,75)	1292,55 (907,53 ; 1669,50)	
C6	1164,83 ± 543,67	1235,91 ± 428,66	0,557
	1105,60 (893,85 ; 1448,05)	1273,90 (909,28 ; 1646,10)	
SGE	610,53 ± 205,35	656,21 ± 213,38	0,375
	589,70 (468,88 ; 725,79)	596,12 (509,15 ; 885,65)	
Evaluation 4			
C1	166,23 ± 89,65	198,60 ± 158,01	0,259
	158,20 (100,95 ; 218,55)	150,95 (115,93 ; 246,28)	
C2	215,45 ± 119,78	217,85 ± 90,34	0,520
	202,30 (130,70 ; 260,50)	207,70 (153,05 ; 269,58)	
C3	348,09 ± 126,46	325,31 ± 144,17	0,902
	203,20 (115,20 ; 291,35)	170,35 (111,63 ; 257,45)	
C4	456,85 ± 172,52	470,08 ± 204,82	0,678
	461,50 (333,05 ; 564,25)	419,90 (345,45 ; 517,45)	
C5	1109,48 ± 443,80	1247,98 ± 561,77	0,175
	1008,20 (827,35 ; 1330,65)	1113,60 (918,55 ; 1513,20)	

C6	1168,35 ± 456,34 1041,30 (872,20 ; 1387,30)	1214,65 ± 488,05 1094,65 (820,35 ; 1534,00)	0,572
SGE	542,29 ± 205,35 545,03 (441,85 ; 624,33)	595,04 ± 205,83 552,80 (467,11 ; 691,38)	0,243
Evaluation 5			
C1	141,29 ± 68,39 140,40 (86,15 ; 176,65)	223,83 ± 202,29 181,60 (113,13 ; 235,45)	0,034
C2	203,39 ± 103,90 169,20 (127,40 ; 260,35)	209,09 ± 123,08 202,10 (109,70 ; 261,70)	0,838
C3	209,90 ± 112,76 203,10 (165,85 ; 234,55)	243,29 ± 136,46 222,35 (138,33 ; 328,23)	0,277
C4	469,76 ± 189,81 446,30 (314,20 ; 597,10)	444,27 ± 145,42 429,95 (311,98 ; 565,13)	0,542
C5	1309,13 ± 649,65 1155,20 (847,85 ; 1550,20)	1413,42 ± 874,51 1149,45 (866,50 ; 1670,58)	0,579
C6	1168,85 ± 468,42 1076,00 (808,80 ; 1332,45)	1304,00 ± 777,89 1152,40 (944,18 ; 1394,80)	0,387
SGE	583,72 ± 158,59 533,18 (446,43 ; 668,53)	639,65 ± 286,87 595,36 (482,53 ; 740,76)	0,352

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; C : résultats du test d'équilibre dans les six conditions ; SGE : Score Global de l'Equilibre ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Tableau VIII : Comparaison de la longueur parcourue (en mm) par le centre de pression des pieds dans les deux groupes de rééducation, à chaque évaluation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1			
C1	254,13 ± 74,72 234,87 (204,28 ; 288,75)	253,17 ± 72,28 247,53 (192,35 ; 310,10)	0,957

C2	376,67 ± 138,91 344,00 (284,40 ; 476,51)	391,79 ± 193,17 362,06 (252,58 ; 483,99)	0,712
C3	311,04 ± 98,05 316,23 (224,48 ; 358,10)	316,02 ± 117,06 281,78 (217,83 ; 401,40)	0,850
C4	547,13 ± 141,72 543,40 (430,34 ; 633,03)	546,54 ± 140,80 509,20 (441,84 ; 615,30)	0,986
C5	1305,93 ± 411,85 1245,48 (996,06 ; 1473,16)	1352,49 ± 638,31 1189,60 (1035,51 ; 1520,10)	0,722
C6	1168,28 ± 643,63 1040,76 (846,55 ; 1273,11)	1039,00 ± 395,61 983,82 (808,55 ; 1170,39)	0,331
SGE	660,53 ± 215,01 623,22 (520,74 ; 745,97)	649,83 ± 235,13 625,19 (504,08 ; 714,14)	0,846
Evaluation 2			
C1	359,09 ± 120,08 334,74 (269,60 ; 395,57)	343,08 ± 116,68 322,10 (267,15 ; 413,02)	0,583
C2	527,93 ± 225,35 490,02 (342,61 ; 631,87)	529,44 ± 265,81 471,91 (375,35 ; 645,58)	0,980
C3	419,44 ± 165,22 385,19 (305,67 ; 488,30)	426,96 ± 144,36 415,24 (313,88 ; 530,01)	0,844
C4	609,47 ± 115,93 595,52 (540,46 ; 687,18)	597,96 ± 138,29 579,32 (517,15 ; 700,98)	0,712
C5	1294,87 ± 421,68 1268,60 (1092,19 ; 1504,00)	1372,99 ± 587,34 1245,22 (1042,53 ; 1525,19)	0,531
C6	1166,68 ± 396,08 1151,29 (868,82 ; 1283,82)	1122,79 ± 379,17 1070,23 (886,88 ; 1283,82)	0,645
SGE	729,58 ± 187,42 691,08 (600,26 ; 838,69)	732,20 ± 231,81 721,64 (587,14 ; 879,82)	0,959
Evaluation 3			
C1	324,56 ± 78,22 321,06 (271,71 ; 369,89)	305,36 ± 84,97 294,71 (258,77 ; 353,30)	0,339
C2	454,63 ± 165,84 439,28 (336,24 ; 523,43)	443,58 ± 189,71 410,26 (320,02 ; 534,38)	0,800
C3	399,70 ± 137,06	351,23 ± 117,84	0,127

	375,23 (304,00 ; 510,89)	353,24 (250,97 ; 439,70)	
C4	590,04 ± 133,28	550,67 ± 121,30	0,212
	551,07 (503,61 ; 683,97)	561,56 (475,84 ; 613,15)	
C5	1260,70 ± 403,50	1195,17 ± 429,86	0,522
	1241,15 (1019,04 ; 1393,87)	1132,83 (883,82 ; 1459,42)	
C6	1027,48 ± 360,13	944,82 ± 319,28	0,326
	1013,59 (746,04 ; 1169,24)	944,61 (743,01 ; 1048,72)	
SGE	676,18 ± 183,81	732,20 ± 231,81	0,331
	653,69 (583,63 ; 734,08)	721,64 (587,14 ; 879,82)	
Evaluation 4			
C1	284,66 ± 83,81	279,33 ± 89,52	0,804
	277,57 (251,45 ; 319,48)	247,96 (216,30 ; 355,58)	
C2	403,95 ± 127,66	384,63 ± 176,73	0,615
	393,10 (311,22 ; 449,34)	314,04 (259,84 ; 525,71)	
C3	336,37 ± 107,33	325,31 ± 144,17	0,724
	341,08 (258,43 ; 408,28)	293,74 (222,96 ; 398,48)	
C4	547,19 ± 136,08	549,54 ± 129,64	0,950
	498,04 (457,17 ; 632,04)	526,75 (460,53 ; 611,96)	
C5	1118,22 ± 407,92	1075,28 ± 348,14	0,648
	1063,35 (872,01 ; 1316,34)	1059,04 (817,95 ; 1223,63)	
C6	981,20 ± 328,11	925,79 ± 283,66	0,467
	947,73 (754,84 ; 1057,73)	959,73 (754,84 ; 1057,73)	
SGE	612,30 ± 165,85	589,98 ± 176,82	0,590
	575,97 (493,95 ; 688,63)	575,21 (459,03 ; 643,98)	
Evaluation 5			
C1	281,00 ± 82,65	289,75 ± 95,31	0,689
	278,22 (221,03 ; 329,22)	268,97 (219,18 ; 337,83)	
C2	419,02 ± 163,98	386,28 ± 164,08	0,417
	393,53 (297,92 ; 517,73)	315,60 (284,94 ; 494,23)	
C3	350,32 ± 124,78	333,27 ± 107,72	0,553
	345,10 (265,41 ; 421,81)	331,17 (259,84 ; 391,96)	
C4	551,18 ± 141,00	525,98 ± 130,22	0,415
	522,72 (471,11 ; 595,36)	494,76 (446,33 ; 596,34)	

C5	1161,27 ± 541,36 1039,04 (907,42 ; 1348,30)	1132,29 ± 491,65 947,54 (830,74 ; 1320,31)	0,820
C6	1011,82 ± 418,81 919,38 (797,03 ; 1141,61)	954,47 ± 323,64 853,97 (784,02 ; 1050,84)	0,535
SGE	629,10 ± 220,00 607,18 (523,65 ; 670,61)	603,67 ± 198,25 530,73 (491,63 ; 676,67)	0,622

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; C : résultats du test d'équilibre dans les six conditions ; SGE : Score Global de l'Equilibre ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Le ratio somesthésique était significativement plus faible à l'évaluation 5 chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant par rapport aux patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel ($p = 0,008$) traduisant une plus grande utilisation de la somesthésie dans le maintien de l'équilibre (Tableau IX).

Tableau IX : Comparaison des ratios somesthésique, visuel et vestibulaire entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1			
Rsom	1,46 ± 0,80 1,38 (0,78 ; 1,82)	1,60 ± 0,98 1,47 (0,91 ; 1,98)	0,506
Rvis	3,69 ± 2,42 2,91 (2,19 ; 4,06)	3,81 ± 1,59 3,98 (2,51 ; 4,89)	0,812
Rvest	12,11 ± 5,73 10,52 (8,53 ; 14,57)	16,10 ± 11,36 12,62 (10,46 ; 14,65)	0,081
Evaluation 2			
Rsom	1,35 ± 0,54 1,26 (0,99 ; 1,68)	1,63 ± 1,06 1,38 (0,95 ; 1,81)	0,176
Rvis	2,44 ± 1,32	2,51 ± 1,26	0,825

	2,14 (1,46 ; 3,07)	2,26 (1,77 ; 3,06)	
Rvest	7,88 ± 5,08	8,22 ± 4,95	0,784
	6,61 (4,21 ; 10,87)	6,38 (4,96 ; 10,20)	
Evaluation 3			
Rsom	1,46 ± 1,02	1,54 ± 1,15	0,746
	1,07 (0,80 ; 1,80)	1,09 (0,80 ; 1,76)	
Rvis	2,83 ± 1,86	2,59 ± 1,42	0,548
	2,30 (1,83 ; 3,13)	2,37 (1,49 ; 3,12)	
Rvest	8,17 ± 3,81	7,52 ± 3,51	0,478
	8,27 (4,98 ; 10,17)	7,23 (5,02 ; 9,93)	
Evaluation 4			
Rsom	1,45 ± 0,67	1,31 ± 0,61	0,356
	1,33 (0,93 ; 1,93)	1,27 (0,90 ; 1,47)	
Rvis	3,27 ± 1,63	2,96 ± 1,44	0,404
	2,92 (2,25 ; 4,30)	2,70 (1,83 ; 3,87)	
Rvest	8,07 ± 3,88	7,92 ± 4,14	0,880
	7,65 (5,51 ; 10,31)	7,26 (5,02 ; 10,52)	
Evaluation 5			
Rsom	1,62 ± 0,87	1,13 ± 0,50	0,008
	1,45 (1,19 ; 1,87)	1,26 (0,70 ; 1,62)	
Rvis	4,32 ± 3,25	3,09 ± 2,27	0,080
	3,18 (2,23 ; 5,34)	2,55 (1,76 ; 3,75)	
Rvest	11,51 ± 7,26	9,57 ± 7,86	0,297
	9,32 (6,60 ; 16,41)	7,39 (4,58 ; 9,74)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Rsom : score somesthésique (C2/C1) ; Rvis : score visuel (C4/C1) ; Rvest : score vestibulaire (C5/C1) ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Dans les deux groupes, les patients compensaient leur équilibre sur le membre contralatéral à la lésion aux évaluations 1 ($p = 0,002$), 2 ($p < 0,001$) et 3 ($p = 0,001$). Les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant ne montraient pas de latéralisation nette lorsque le membre gauche était atteint aux évaluations 1 ($p = 0,037$) et 3 ($p = 0,039$). Ainsi, même si des différences significatives étaient observées aux évaluations 1 et 3 entre les deux groupes de rééducation, ce constat de départ ne permettait pas d'avancer que le groupe de rééducation conventionnel compensait moins son équilibre sur le membre contralatéral à la lésion (Tableau X).

Tableau X : Comparaison de la latéralisation (en mm) entre les deux groupes de rééducation et en fonction du côté pathologique.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET
Evaluation 1		
Xmoyen avec côté droit pathologique	- 4,62 ± 7,93	- 2,09 ± 4,09
Xmoyen avec côté gauche pathologique	+ 5,17 ± 7,40	- 0,08 ± 8,81
Latéralisation moyenne (valeur absolue)	+ 7,08 ± 5,54	+ 5,66 ± 3,85
Evaluation 2		
Xmoyen avec côté droit pathologique	- 20,32 ± 18,92	- 18,22 ± 13,77
Xmoyen avec côté gauche pathologique	+ 14,88 ± 13,07	+ 10,55 ± 14,33
Latéralisation moyenne (valeur absolue)	+ 18,93 ± 16,25	+ 15,69 ± 12,87
Evaluation 3		
Xmoyen avec côté droit pathologique	- 7,57 ± 14,66	- 3,95 ± 6,96
Xmoyen avec côté gauche pathologique	+ 7,05 ± 9,39	- 0,64 ± 8,42
Latéralisation moyenne (valeur absolue)	+ 10,79 ± 10,01	+ 6,67 ± 4,48
Evaluation 4		
Xmoyen avec côté droit pathologique	- 3,39 ± 8,30	- 0,90 ± 6,55
Xmoyen avec côté gauche pathologique	+ 2,84 ± 6,29	- 1,27 ± 8,15
Latéralisation moyenne (valeur absolue)	+ 6,51 ± 4,84	+ 5,67 ± 4,61
Evaluation 5		
Xmoyen avec côté droit pathologique	- 1,79 ± 6,66	+ 0,53 ± 8,29
Xmoyen avec côté gauche pathologique	+ 0,87 ± 8,12	- 2,99 ± 6,52
Latéralisation moyenne (valeur absolue)	+ 5,61 ± 4,54	+ 6,15 ± 4,42
ANOVA	F	p-value
Evaluation 1		
Groupe de rééducation	0,56	0,458
Côté pathologique	10,44	0,002
Groupe de rééducation*côté pathologique	4,54	0,037
Evaluation 2		
Groupe de rééducation	0,83	0,775
Côté pathologique	67,29	< 0,001
Groupe de rééducation*côté pathologique	0,68	0,413

Evaluation 3		
Groupe de rééducation	0,57	0,453
Côté pathologique	11,12	0,001
Groupe de rééducation*côté pathologique	4,43	0,039
Evaluation 4		
Groupe de rééducation	0,19	0,666
Côté pathologique	2,47	0,121
Groupe de rééducation*côté pathologique	3,11	0,083
Evaluation 5		
Groupe de rééducation	0,18	0,674
Côté pathologique	0,06	0,814
Groupe de rééducation*côté pathologique	2,87	0,095

ET : Ecart-Type ; F : distribution F qui représente le rapport entre deux indices de variabilité ;
 Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant ; + : latéralisation du côté droit ; - : latéralisation du côté gauche

III.4.2.2. Evaluation cinématique

La stratégie d'équilibre utilisée par les patients (Tableau XI) et la sollicitation du genou blessé (Tableau XII) dans le maintien du contrôle postural étaient similaires dans les deux groupes de rééducation.

Tableau XI : Comparaison des stratégies d'équilibre utilisées dans les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 30)	Groupe 2 (n = 26)	Test du Khi2
	n (%)	n (%)	p-value
Evaluation 1			
Stratégie de cheville	21 (70,00)	15 (57,7)	<i>0,408</i>
Stratégie de hanche	9 (30,00)	11 (42,31)	
Evaluation 4			
Stratégie de cheville	22 (73,33)	14 (53,85)	<i>0,167</i>
Stratégie de hanche	8 (26,67)	12 (46,15)	

Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Tableau XII : Comparaison des amplitudes articulaires (en degrés) du genou lésé entre les deux groupes de rééducation lors du maintien de l'équilibre sur un plateau de Freeman.

	Groupe 1 (n = 30)	Groupe 2 (n = 26)	Test de Mann-Whitney
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1	2306,26 ± 2470,32 1362,61 (844,36 ; 2191,79)	1582,15 ± 1631,26 1187,19 (552,29 ; 2155,23)	<i>0,384</i>
Evaluation 4	2166,47 ± 2586,81 1451,05 (699,44 ; 2491,50)	1720,62 ± 1684,61 1187,19 (568,18 ; 2291,46)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.3. Évaluation de la douleur

Aucune différence significative de la douleur n'a été observée entre les deux groupes de rééducation (Tableau XIII).

Tableau XIII : Comparaison de la douleur entre les deux groupes de rééducation à chaque évaluation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1	1,47 ± 1,63 1,00 (0,00 ; 2,53)	1,68 ± 2,04 0,88 (0,00 ; 2,75)	0,645
Evaluation 2	2,01 ± 1,82 2,00 (0,95 ; 3,00)	2,59 ± 2,01 2,00 (1,00 ; 5,00)	0,220
Evaluation 3	1,07 ± 1,23 1,00 (0,09 ; 1,43)	1,40 ± 1,74 1,00 (0,00 ; 2,00)	0,363
Evaluation 4	1,06 ± 0,94 1,00 (0,06 ; 2,00)	1,40 ± 1,64 0,80 (0,00 ; 2,00)	0,308
Evaluation 5	0,80 ± 1,10 0,50 (0,00 ; 1,00)	0,94 ± 1,16 0,58 (0,00 ; 1,63)	0,612

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.4. Évaluation proprioceptive

Aucune différence significative des performances proprioceptives n'a été observée entre les deux groupes de rééducation, que ce soit en flexion ou en extension au niveau du membre sain et du membre opéré (Tableau XIV).

Tableau XIV : Test de proprioception permettant d'apprécier la différence d'amplitude angulaire (en degrés) entre une position initiale du genou et une position de remplacement entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1			
Membre sain en flexion	3,07 ± 3,35	3,94 ± 5,94	0,466
	2,25 (0,00 ; 5,00)	2,00 (0,00 ; 5,00)	
Membre sain en extension	2,88 ± 2,90	2,97 ± 2,74	0,902
	2,50 (0,00 ; 5,00)	3,50 (0,00 ; 5,00)	
Membre opéré en flexion	5,00 ± 3,41	4,83 ± 3,79	0,847
	5,00 (4,00 ; 5,75)	5,00 (1,88 ; 5,50)	
Membre opéré en extension	4,40 ± 3,06	3,34 ± 3,82	0,152
	5,00 (2,00 ; 5,00)	5,00 (0,00 ; 5,00)	
Evaluation 4			
Membre sain en flexion	2,94 ± 3,24	3,53 ± 3,42	0,474
	2,00 (0,00 ; 5,00)	5,00 (0,00 ; 5,00)	
Membre sain en extension	2,35 ± 2,76	2,53 ± 2,48	0,784
	5,00 (0,25 ; 5,00)	0,50 (0,00 ; 5,00)	
Membre opéré en flexion	3,62 ± 3,68	2,22 ± 2,49	0,077
	0,00 (0,00 ; 5,00)	2,50 (0,00 ; 5,00)	
Membre opéré en extension	3,62 ± 3,69	2,48 ± 2,85	0,169
	4,00 (0,00 ; 5,00)	2,00 (0,00 ; 5,00)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.5. Amplitudes articulaires

Aucune différence significative des amplitudes articulaires du membre opéré en flexion active ou passive et en extension active ou passive n'a été observée entre les deux groupes de rééducation (Tableau XV).

Tableau XV : Comparaison des amplitudes articulaires en flexion et en extension (en degrés) entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 2			
Flexion active	87,25 ± 20,00 90,00 (80,00 ; 100,00)	84,03 ± 20,88 87,50 (70,00 ; 95,00)	0,521
Flexion passive	93,89 ± 19,97 95,00 (86,00 ; 105,00)	91,28 ± 20,72 95,00 (80,00 ; 100,00)	0,602
Extension active	- 9,43 ± 7,84 - 10,00 (-15,00 ; -5,00)	- 12,03 ± 7,28 - 10,00 (-16,25 ; -5,00)	0,165
Extension passive	- 5,80 ± 6,09 - 5,00 (-10,00 ; 0,00)	- 7,25 ± 6,06 - 6,00 (-10,00 ; -2,25)	0,333
Evaluation 3			
Flexion active	109,40 ± 16,38 110,00 (95,00 ; 122,50)	113,44 ± 18,13 115,00 (103,75 ; 125,00)	0,342
Flexion passive	116,49 ± 15,43 120,00 (102,50 ; 127,50)	120,69 ± 17,62 125,00 (113,75 ; 131,25)	0,302
Extension active	- 6,51 ± 9,31 - 5,00 (-10,00 ; 0,00)	- 6,88 ± 8,59 - 5,00 (-10,00 ; 0,00)	0,870
Extension passive	- 3,03 ± 6,27 0,00 (-5,00 ; 0,00)	- 3,59 ± 7,10 0,00 (-5,00 ; 0,00)	0,730
Evaluation 4			
Flexion active	125,03 ± 14,20 125,00 (115,00 ; 134,00)	128,31 ± 20,12 130,00 (115,00 ; 142,50)	0,457
Flexion passive	131,77 ± 13,31 132,00 (125,00 ; 140,00)	133,59 ± 20,12 135,00 (120,00 ; 148,50)	0,667
Extension active	- 3,97 ± 4,79 - 2,00 (-5,00 ; 0,00)	- 4,28 ± 6,77 0,00 (-10,00 ; 0,00)	0,831
Extension passive	0,11 ± 3,98 0,00 (0,00 ; 0,00)	- 1,62 ± 5,78 0,00 (-5,00 ; 0,50)	0,161

Evaluation 5

Flexion active	140,29 ± 11,29 140,00 (130,00 ; 150,00)	140,34 ± 13,56 140,00 (130,00 ; 150,25)	0,985
Flexion passive	145,69 ± 10,13 145,00 (139,00 ; 155,00)	145,50 ± 12,53 148,00 (135,00 ; 155,25)	0,947
Extension active	0,20 ± 3,86 0,00 (0,00 ; 0,00)	0,21 ± 5,90 0,00 (0,00 ; 0,00)	0,988
Extension passive	1,49 ± 4,36 0,00 (0,00 ; 2,50)	1,84 ± 5,63 0,00 (0,00 ; 5,00)	0,771

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.6. Trophicité

Aucune différence significative de la trophicité n'a été observée entre les deux groupes de rééducation (Tableau XVI).

Tableau XVI : Évaluation de la trophicité par le test du godet entre les deux groupes de rééducation, au niveau du membre opéré.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test du Khi2
	n (%)	n (%)	p-value
Evaluation 2			
Présence d'un godet	31 (88,57)	27 (84,38)	0.615
Evaluation 3			
Présence d'un godet	23 (65,71)	17 (53,13)	0.294
Evaluation 4			
Présence d'un godet	19 (55,88)	17 (53,13)	0.822
Evaluation 5			
Présence d'un godet	7 (20,00)	8 (25,00)	0.624

Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.7. Évaluation manuelle de la force musculaire

Des différences significatives de la force musculaire du quadriceps ont été observées aux évaluations 3 ($p = 0,040$), 4 ($p = 0,004$) et 5 ($p = 0,033$) entre les deux groupes de rééducation. Les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant présentaient une force musculaire du muscle quadriceps égale à $4,00 \pm 0,57$ à l'évaluation 3 ; $4,40 \pm 0,56$ à l'évaluation 4 et $4,75 \pm 0,44$ à l'évaluation 5 contre $3,66 \pm 0,76$ à l'évaluation 3 ; $4,01 \pm 0,52$ à l'évaluation 4 et $4,50 \pm 0,50$ à l'évaluation 5 pour le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel. De même, les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant présentaient une force musculaire de l'ischio-jambier externe plus importante que les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel à l'évaluation 5 ($4,66 \pm 0,54$ versus $4,30 \pm 0,57$; $p = 0,011$) (Tableau XVII).

Tableau XVII : Comparaison de la force musculaire des muscles quadriceps et ischio-jambiers entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET	Moyenne $\pm$ ET	p-value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	
Evaluation 2			
Quadriceps	$3,14 \pm 0,91$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	$3,09 \pm 0,69$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	<i>0,806</i>
Ischio-jambiers	$3,26 \pm 0,66$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	$3,22 \pm 0,83$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	<i>0,834</i>
Ischio-jambier interne	$3,14 \pm 0,69$ 3,00 (3,00 ; 3,00)	$2,94 \pm 1,37$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	<i>0,448</i>
Ischio-jambier externe	$3,23 \pm 0,77$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	$2,84 \pm 1,32$ 3,00 (3,00 ; 4,00)	<i>0,157</i>
Evaluation 3			
Quadriceps	$3,66 \pm 0,76$ 4,00 (3,00 ; 4,00)	$4,00 \pm 0,57$ 4,00 (4,00 ; 4,00)	<i>0,040</i>
Ischio-jambiers	$3,80 \pm 0,58$ 4,00 (3,00 ; 4,00)	$3,97 \pm 0,59$ 4,00 (4,00 ; 4,00)	<i>0,246</i>

Ischio-jambier interne	3,69 ± 0,58 4,00 (3,00 ; 4,00)	3,88 ± 0,55 4,00 (4,00 ; 4,00)	0,178
Ischio-jambier externe	3,77 ± 0,65 4,00 (3,00 ; 4,00)	3,84 ± 0,63 4,00 (3,00 ; 4,00)	0,644

Evaluation 4

Quadriceps	4,01 ± 0,52 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,40 ± 0,56 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,004
Ischio-jambiers	3,97 ± 0,57 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,16 ± 0,63 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,210
Ischio-jambier interne	3,86 ± 0,88 4,00 (4,00 ; 4,00)	3,86 ± 0,66 4,00 (3,00 ; 4,00)	0,991
Ischio-jambier externe	3,83 ± 0,92 4,00 (3,50 ; 4,00)	4,02 ± 0,60 4,00 (4,00 ; 4,00)	0,334

Evaluation 5

Quadriceps	4,50 ± 0,50 4,50 (4,00 ; 5,00)	4,75 ± 0,44 5,00 (4,75 ; 5,00)	0,033
Ischio-jambiers	4,44 ± 0,50 4,00 (4,00 ; 5,00)	4,59 ± 0,56 5,00 (4,00 ; 5,00)	0,247
Ischio-jambier interne	4,41 ± 0,55 4,00 (4,00 ; 5,00)	4,41 ± 0,61 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,955
Ischio-jambier externe	4,30 ± 0,57 4,00 (4,00 ; 5,00)	4,66 ± 0,55 5,00 (4,00 ; 5,00)	0,011

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.8. Performance de marche

Des différences significatives de la performance de marche ont été mises en évidence lors du test des six minutes marche entre les deux groupes de rééducation à l'évaluation 3 ($p = 0,025$). Le groupe ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel a parcouru en moyenne $425,27 \pm 158,45$ mètres et le groupe ayant suivi le protocole de rééducation innovant $506,59 \pm 127,70$ mètres (Tableau XVIII).

Tableau XVIII : Performance de marche (en mètres) lors du test des six minutes marche dans les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 3	425,27 ± 158,45 432,00 (360,00 ; 529,50)	506,59 ± 127,70 507,50 (425,00 ; 602,69)	0,025
Evaluation 5	625,25 ± 78,47 640,00 (562,88 ; 676,70)	647,50 ± 86,61 650,00 (586,50 ; 704,25)	0,274

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

III.4.2.9. Test d'isocinétisme

A l'évaluation 5, la force musculaire du quadriceps développée en isocinétisme était significativement plus importante chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant que ce soit à la vitesse de 60°.s⁻¹ ($p = 0,027$) ou 180°.s⁻¹ ($p = 0,047$). Par ailleurs, le déficit musculaire du quadriceps du membre ipsilatéral par rapport au membre contralatéral était moindre chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant ($p = 0,020$) (Tableau XIX).

Tableau XIX : Comparaison de la force musculaire et du déficit musculaire par isocinétisme entre les deux groupes de rééducation six mois après l'intervention chirurgicale.

	Groupe 1 (n = 32)	Groupe 2 (n = 24)	Test de Mann-Whitney
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Force maximale du quadriceps			
(60°.s⁻¹) (en Nm)			
Membre ipsilatéral	88,59 ± 31,41 93,55 (70,70 ; 105,98)	110,26 ± 38,94 114,55 (82,30 ; 139,15)	0,027
Membre contralatéral	132,40 ± 36,40	152,51 ± 46,61	0,063

	140,9 (113,25 ; 151,50)	164,75 (114,05 ; 181,03)	
--	-------------------------	--------------------------	--

Force maximale du quadriceps

(180°.s⁻¹) (en Nm)

Membre ipsilatéral	76,00 ± 30,65	93,87 ± 33,57	0,047
	75,50 (55,28 ; 93,28)	100,85 (67,88 ; 116,48)	
Membre contralatéral	120,62 ± 42,76	136,57 ± 38,49	0,208

Force maximale des ischio-jambiers (60°.s⁻¹) (en Nm)

Membre ipsilatéral	69,49 ± 25,61	80,02 ± 28,19	0,162
	67,6 (50,88 ; 84,68)	81,3 (54,73 ; 105,3)	
Membre contralatéral	73,62 ± 22,88	84,82 ± 27,03	0,126
	68,9 (59,68 ; 92,83)	88,45 (66,10 ; 703,75)	

Force maximale des ischio-jambiers (180°.s⁻¹) (en Nm)

Membre ipsilatéral	56,32 ± 34,63	65,92 ± 24,45	0,253
	58,35 (40,23 ; 72,93)	71,40 (45,33 ; 80,90)	
Membre contralatéral	67,31 ± 21,30	77,86 ± 25,85	0,150
	67,30 (49,68 ; 85,38)	79,95 (57,23 ; 96,33)	

Déficit du quadriceps

(60°.s ⁻¹) (en %)	33,25 ± 16,82	26,56 ± 18,47	0,240
-------------------------------	---------------	---------------	-------

Déficit du quadriceps

(180°.s ⁻¹) (en %)	45,22 ± 34,37	30,65 ± 16,34	0,020
--------------------------------	---------------	---------------	--------------

Déficit des ischio-jambiers

(60°.s ⁻¹) (en %)	5,43 ± 19,08	4,92 ± 19,05	0,974
-------------------------------	--------------	--------------	-------

Déficit des ischio-jambiers

(180°.s ⁻¹) (en %)	21,37 ± 56,21	14,31 ± 21,64	0,643
--------------------------------	---------------	---------------	-------

Rapport F/E (180°.s⁻¹)

Membre ipsilatéral	- 0,79 ± 0,68	- 0,75 ± 0,34	0,466
	- 0,75 (- 0,91 ; - 0,64)	- 0,71 (- 0,85 ; - 0,59)	
Membre contralatéral	- 0,49 ± 0,29	- 0,57 ± 0,10	0,305
	- 0,53 (- 0,59 ; - 0,48)	- 0,57 (- 0,62 ; - 0,50)	

**Couple max. moy. F/E (180°.s⁻¹)
(en %)**

Membre ipsilatéral	86,54 ± 44,07	74,66 ± 35,88	0,282
	74,45 (64,75 ; 94,65)	68,70 (57,65 ; 87,58)	
Membre contralatéral	57,67 ± 9,82	58,64 ± 12,04	0,817
	56,85 (51,05 ; 62,13)	58,30 (47,03 ; 67,65)	

Fatigue du quadriceps

Membre ipsilatéral	7,50 ± 14,31	10,58 ± 11,46	0,431
	8,00 (0,00 ; 16,75)	12,00 (3,00 ; 19,00)	
Membre contralatéral	18,88 ± 9,75	15,13 ± 12,32	0,226
	21,00 (12,75 ; 26,00)	19,00 (11,00 ; 23,00)	

Fatigue des ischio-jambiers

Membre ipsilatéral	7,64 ± 11,76	10,04 ± 14,50	0,296
	10,00 (1,78 ; 16,00)	13,00 (4,75 ; 17,75)	
Membre contralatéral	13,94 ± 10,58	13,19 ± 11,13	0,836
	14,00 (9,50 ; 20,25)	14,00 (8,75 ; 19,25)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; F/E : rapport entre flexion et extension ;
Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation
innovant ; Nm : Newton-mètre

III.4.2.10. Questionnaires

Score fonctionnel de Lysholm-Tegner :

Le questionnaire fonctionnel de Lysholm-Tegner n'a révélé aucune différence significative entre les deux groupes de rééducation (Tableau XX).

Tableau XX : Comparaison du score fonctionnel de Lysholm-Tegner entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1	64,09 ± 19,65	70,32 ± 17,73	0,186

	64,5 (53,50 ; 79,00)	75,00 (59,50 ; 81,00)	
Evaluation 5	84,67 ± 12,84	82,83 ± 12,97	0,586
	89,00 (76,00 ; 94,00)	85,00 (77,00 ; 94,00)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Score fonctionnel IKDC :

Le score fonctionnel IKDC n'a révélé aucune différence significative entre les deux groupes de rééducation (Tableau XXI).

Tableau XXI : Comparaison du score fonctionnel IKDC entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1			
Score fonctionnel	41,34 ± 12,21	41,92 ± 10,40	0,838
	40,00 (32,00 ; 49,00)	40,00 (36,50 ; 47,00)	
Fonction avant blessure	9,09 ± 1,73	9,10 ± 1,58	0,978
	10,00 (9,00 ; 10,00)	10,00 (9,00 ; 10,00)	
Fonction après blessure	4,25 ± 1,91	4,43 ± 1,81	0,696
	4,00 (3,00 ; 6,00)	4,00 (3,00 ; 5,75)	
Evaluation 5			
Score fonctionnel	56,93 ± 10,24	55,59 ± 11,12	0,630
	58,00 (51,13 ; 61,75)	56,00 (45,00 ; 64,00)	
Fonction avant blessure	8,77 ± 2,06	8,31 ± 2,74	0,472
	10,00 (8,25 ; 10,00)	10,00 (8,00 ; 10,00)	
Fonction après blessure	6,70 ± 1,51	6,72 ± 1,33	0,948
	7,00 (5,00 ; 8,00)	7,00 (6,00 ; 8,00)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Score de qualité de vie :

Le questionnaire de qualité de vie KOOS n'a révélé aucune différence significative entre les deux groupes de rééducation (Tableau XXII).

Tableau XXII : Comparaison des scores de qualité de vie entre les deux groupes de rééducation.

	Groupe 1 (n = 35)	Groupe 2 (n = 32)	Test de Student
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	p-value
	Médiane (Q₁ ; Q₃)	Médiane (Q₁ ; Q₃)	
Evaluation 1			
Symptômes	70,61 ± 16,53	73,10 ± 16,80	0,543
	71,43 (62,50 ; 82,14)	76,79 (63,39 ; 85,71)	
Douleur	73,65 ± 12,86	74,13 ± 16,02	0,892
	77,78 (63,89 ; 83,33)	77,78 (71,53 ; 80,56)	
Fonction et vie quotidienne	81,13 ± 14,92	80,79 ± 16,57	0,929
	85,29 (69,85 ; 94,12)	86,76 (71,69 ; 90,44)	
Sports et loisirs	46,57 ± 27,14	43,44 ± 24,51	0,623
	45,00 (25,00 ; 67,50)	42,50 (25,00 ; 56,25)	
Qualité de vie	34,64 ± 21,08	29,69 ± 18,38	0,311
	37,50 (18,75 ; 43,75)	28,13 (18,75 ; 43,75)	
Evaluation 5			
Symptômes	75,61 ± 11,60	74,44 ± 13,43	0,703
	75,00 (67,86 ; 82,14)	78,57 (64,29 ; 85,71)	
Douleur	82,78 ± 11,63	81,34 ± 14,45	0,653
	83,33 (73,61 ; 93,06)	84,72 (73,61 ; 91,67)	
Fonction et vie quotidienne	92,06 ± 9,45	90,85 ± 10,88	0,630
	95,59 (86,03 ; 98,53)	95,59 (87,50 ; 98,90)	
Sports et loisirs	64,29 ± 20,33	66,09 ± 17,35	0,698
	65,00 (50,00 ; 77,50)	67,50 (53,75 ; 81,25)	
Qualité de vie	54,46 ± 20,59	58,20 ± 19,98	0,454
	62,50 (40,63 ; 68,75)	56,25 (42,19 ; 70,31)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant

Auto-questionnaire sur les paramètres socio-professionnels :

Dans cette partie, sont présentées la répartition des patients ayant repris ou non une activité sociale et la répartition des patients ayant repris ou non une activité professionnelle en fonction du groupe de rééducation au cours des six mois de suivi.

Un mois après l'intervention chirurgicale 94,29 % des patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel et 93,75 % des patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant avaient repris leurs activités sociales. Au cours du suivi le pourcentage de patients ayant repris leurs activités sociales était de 97,06 % à l'évaluation 4 et 100 % à l'évaluation 5 pour ceux ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel et 96,87 % à l'évaluation 4 et 100 % à l'évaluation 5 pour ceux ayant suivi le protocole de rééducation innovant (Figure 13).

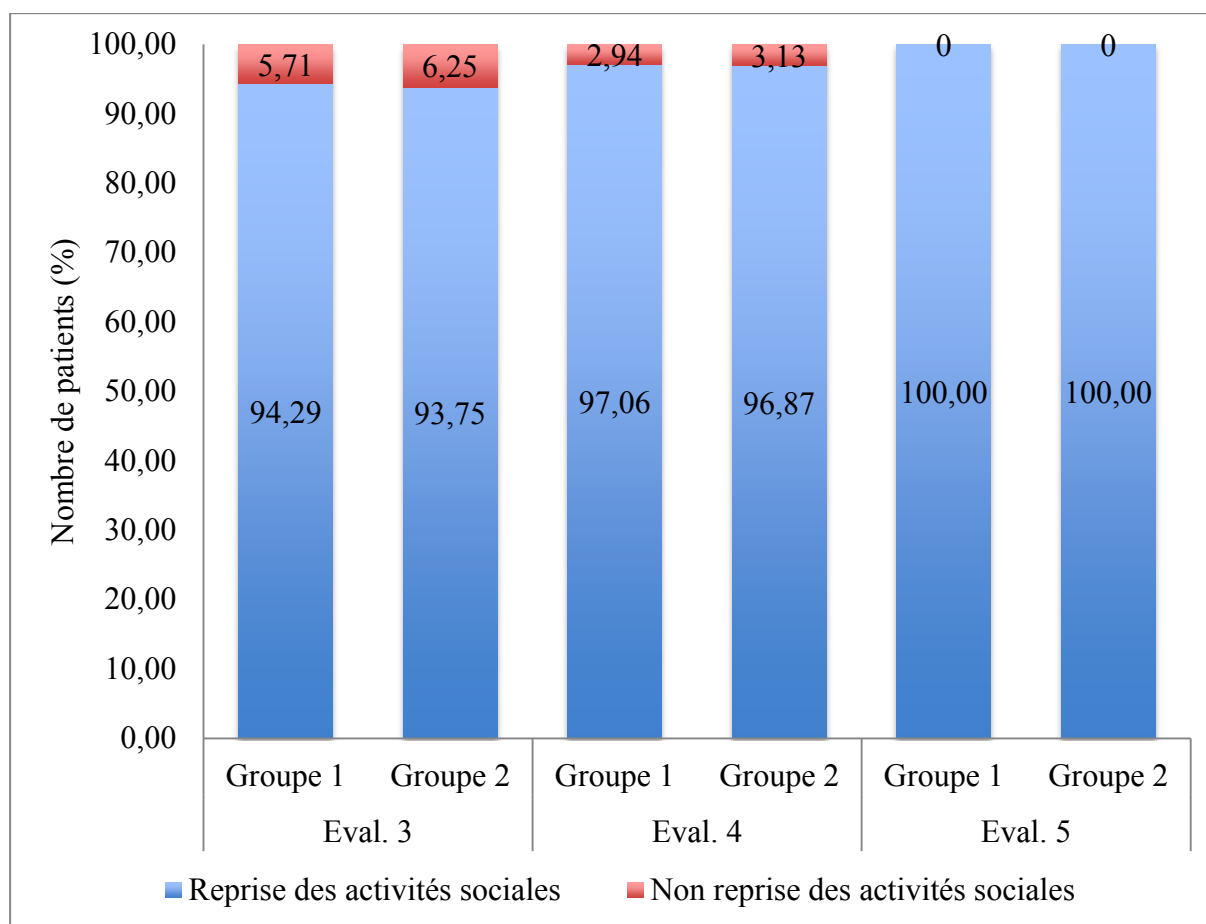


Figure 17 : Comparaison de la répartition, en pourcentage, des patients ayant repris ou non une activité sociale en fonction du groupe de rééducation. Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant.

Un mois après l'intervention chirurgicale, 34,29 % des patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel et 25,00 % des patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant avaient repris leurs activités professionnelles. Au cours du suivi le pourcentage de patients ayant repris une activité professionnelle était de 65,72 % à l'évaluation 4 et 94,29 % à l'évaluation 5 pour ceux ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel et 56,25 % à l'évaluation 4 et 87,50 % à l'évaluation 5 pour ceux ayant suivi le protocole de rééducation innovant (Figure 14).

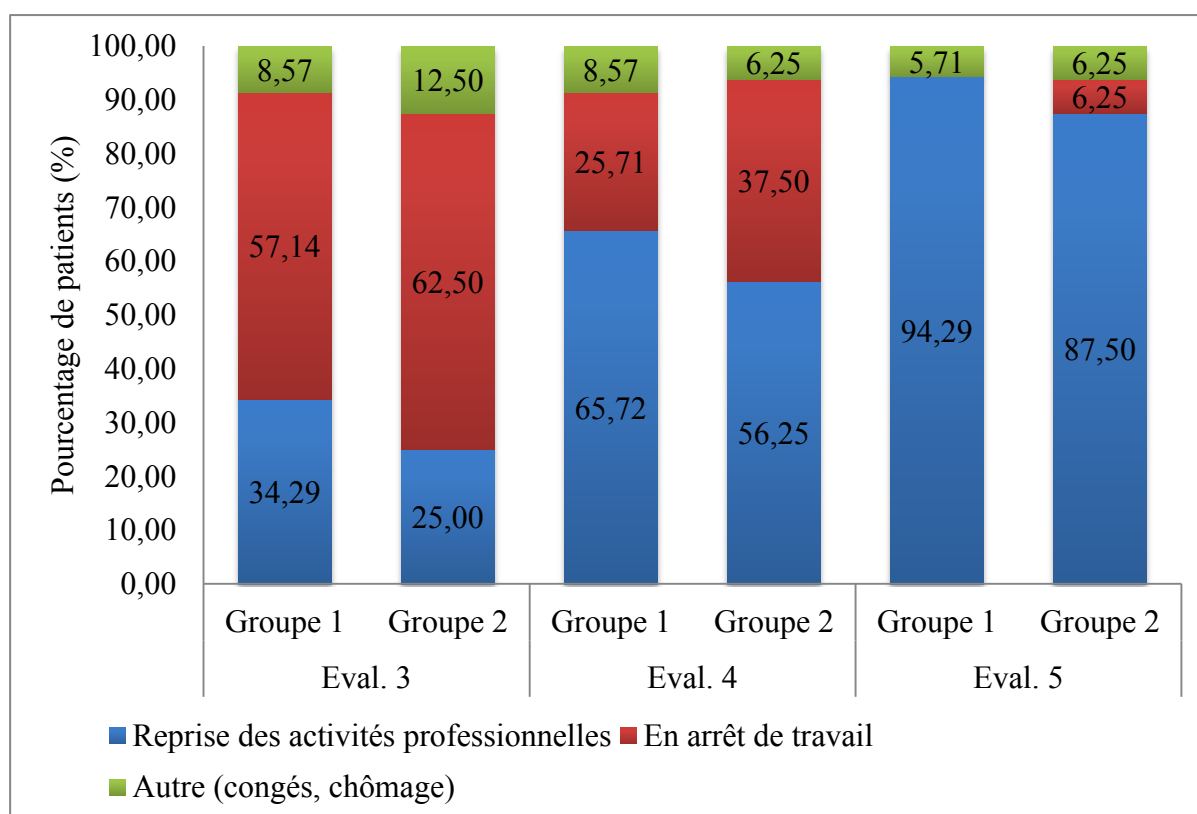


Figure 18 : Comparaison de la répartition, en pourcentage, des patients ayant repris ou non une activité professionnelle en fonction du groupe de rééducation. Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; Groupe 1 : protocole de rééducation conventionnel ; Groupe 2 : protocole de rééducation innovant.

III.4.3. Analyse longitudinale

III.4.3.1. Tests d'équilibre

Des différences significatives du contrôle de l'équilibre entre les évaluations étaient observées chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel. En effet, une diminution des ratios visuel ($p = 0,004$) et vestibulaire ($p < 0,001$) entre les évaluations 1 et 2 traduisait une augmentation de l'utilisation de ces deux afférences à l'évaluation 2 dans le maintien de l'équilibre. A l'évaluation 3, c'est-à-dire après la période de rééducation spécifique à l'étude, la surface couverte par le CPP diminuait ($p = 0,004$). De même, entre les évaluations 3 et 4, la longueur parcourue ($p = 0,001$) et de la surface couverte ($p = 0,001$) par le CPP diminuaient (Tableau XXIII). Par ailleurs, entre les évaluations 1 et 2, une compensation de l'équilibre sur le membre contralatéral à la lésion était observée ($p < 0,001$) alors que cette compensation diminuait entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$) et 1 et 5 ($p = 0,010$) (Tableau XXIV).

Tableau XXIII : Suivi longitudinal du contrôle postural dans le groupe ayant bénéficié de la rééducation conventionnelle.

	Posturographie		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 2	Eval. 1	Eval. 2	
SGE surface (en mm ²)	633,78 $\pm$ 229,36 595,50 (474,33 ; 774,43)	696,13 $\pm$ 251,07 635,45 (509,33 ; 862,35)	0,113
SGE longueur (en mm)	660,53 $\pm$ 215,01 623,22 (520,74 ; 745,97)	729,58 $\pm$ 187,42 691,08 (600,26 ; 838,69)	0,033
Rsom	1,46 $\pm$ 0,80 1,38 (0,78 ; 1,82)	1,35 $\pm$ 0,54 1,26 (0,99 ; 1,68)	0,509
Rvis	3,69 $\pm$ 2,42 2,91 (2,19 ; 4,06)	2,44 $\pm$ 1,32 2,14 (1,46 ; 3,07)	0,004
Rvest	12,11 $\pm$ 5,73 10,52 (8,53 ; 14,57)	7,88 $\pm$ 5,08 6,61 (4,21 ; 10,87)	< 0,001
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	

SGE surface (en mm ²)	696,13 ± 251,07	610,53 ± 205,35	0,004
	635,45 (509,33 ; 862,35)	589,70 (468,88 ; 725,79)	
SGE longueur (en mm)	729,58 ± 187,42	676,18 ± 183,81	0,012
	691,08 (600,26 ; 838,69)	653,69 (583,63 ; 734,08)	
Rsom	1,35 ± 0,54	1,46 ± 1,02	0,555
	1,26 (0,99 ; 1,68)	1,07 (0,80 ; 1,80)	
Rvis	2,44 ± 1,32	2,83 ± 1,86	0,267
	2,14 (1,46 ; 3,07)	2,30 (1,83 ; 3,13)	
Rvest	7,88 ± 5,08	8,17 ± 3,81	0,762
	6,61 (4,21 ; 10,87)	8,27 (4,98 ; 10,17)	
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
SGE surface (en mm ²)	610,53 ± 205,35	542,29 ± 205,35	0,001
	589,70 (468,88 ; 725,79)	545,03 (441,85 ; 624,33)	
SGE longueur (en mm)	676,18 ± 183,81	612,30 ± 165,85	0,001
	653,69 (583,63 ; 734,08)	575,97 (493,95 ; 688,63)	
Rsom	1,46 ± 1,02	1,45 ± 0,67	0,975
	1,07 (0,80 ; 1,80)	1,33 (0,93 ; 1,93)	
Rvis	2,83 ± 1,86	3,27 ± 1,63	0,244
	2,30 (1,83 ; 3,13)	2,92 (2,25 ; 4,30)	
Rvest	8,17 ± 3,81	8,07 ± 3,88	0,918
	8,27 (4,98 ; 10,17)	7,65 (5,51 ; 10,31)	
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
SGE surface (en mm ²)	542,29 ± 205,35	583,72 ± 158,59	0,111
	545,03 (441,85 ; 624,33)	533,18 (446,43 ; 668,53)	
SGE longueur (en mm)	612,30 ± 165,85	629,10 ± 220,00	0,456
	575,97 (493,95 ; 688,63)	607,18 (523,65 ; 670,61)	
Rsom	1,45 ± 0,67	1,62 ± 0,87	0,359
	1,33 (0,93 ; 1,93)	1,45 (1,19 ; 1,87)	
Rvis	3,27 ± 1,63	4,32 ± 3,25	0,040
	2,92 (2,25 ; 4,30)	3,18 (2,23 ; 5,34)	
Rvest	8,07 ± 3,88	11,51 ± 7,26	0,017
	7,65 (5,51 ; 10,31)	9,32 (6,60 ; 16,41)	
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	

SGE surface (en mm ²)	633,78 ± 229,36 595,50 (474,33 ; 774,43)	583,72 ± 158,59 533,18 (446,43 ; 668,53)	0,176
SGE longueur (en mm)	660,53 ± 215,01 623,22 (520,74 ; 745,97)	629,10 ± 220,00 607,18 (523,65 ; 670,61)	0,252
Rsom	1,46 ± 0,80 1,38 (0,78 ; 1,82)	1,62 ± 0,87 1,45 (1,19 ; 1,87)	0,395
Rvis	3,69 ± 2,42 2,91 (2,19 ; 4,06)	4,32 ± 3,25 3,18 (2,23 ; 5,34)	0,238
Rvest	12,11 ± 5,73 10,52 (8,53 ; 14,57)	11,51 ± 7,26 9,32 (6,60 ; 16,41)	0,679

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; SGE : Score Global de l'Equilibre ; Rsom : score somesthésique (C2/C1) ; Rvis : score visuel (C4/C1) ; Rvest : score vestibulaire (C5/C1) ; longY : longueur en Y ; longX : longueur en X

Tableau XXIV : Latéralisation (en mm) en fonction du côté pathologique chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel.

	Côté droit pathologique	Côté gauche pathologique	Xmoyen (valeurs absolues)	ANOVA	
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	F	p-value
Eval. 2 – Eval. 1	- 15,70 ± 15,50	+ 9,71 ± 9,80	14,17 ± 13,08	28,10	< 0,001
Eval. 3 – Eval. 2	+ 12,74 ± 9,75	- 7,83 ± 10,95	12,01 ± 9,01	33,22	< 0,001
Eval. 4 – Eval. 3	+ 3,94 ± 12,00	- 4,21 ± 6,26	7,56 ± 7,80	5,12	0,030
Eval. 5 – Eval. 4	+ 1,84 ± 9,13	- 1,97 ± 7,19	6,69 ± 5,24	1,66	0,207
Eval. 5 – Eval. 1	+ 2,83 ± 8,70	- 4,65 ± 4,65	6,48 ± 4,83	7,43	0,010
Eval. 3 – Eval. 1	- 2,96 ± 10,67	+ 1,88 ± 4,59	6,51 ± 6,42	2,38	0,132

ET : Ecart-Type ; F : distribution F qui représente le rapport entre deux indices de variabilité ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; + : latéralisation du côté droit ; - : latéralisation du côté gauche

Des différences significatives du contrôle de l'équilibre entre les évaluations étaient observées chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant. En effet, une

diminution des ratios visuel ($p = 0,001$) et vestibulaire ($p < 0,001$) entre les évaluations 1 et 2 traduisait une augmentation de l'utilisation de ces deux afférences à l'évaluation 2 dans le maintien de l'équilibre. De même, le ratio vestibulaire diminuait entre les évaluations 1 et 5 ($p = 0,006$) et le ratio somesthésique avait tendance à diminuer entre ces deux mêmes évaluations ($p = 0,013$). La longueur parcourue par le CPP augmentait à l'évaluation 2 ($p = 0,003$). A l'évaluation 3, c'est-à-dire après la période de rééducation spécifique à l'étude, la longueur parcourue par le CPP diminuait ($p = 0,001$) (Tableau XXV). Par ailleurs, entre les évaluations 1 et 2, une compensation de l'équilibre sur le membre contralatéral à la lésion était observée ($p < 0,001$) alors que cette compensation diminuait entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$) (Tableau XXVI).

Tableau XXV : Suivi longitudinal du contrôle postural dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Posturographie		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 2	Eval. 1	Eval. 2	
SGE surface (en mm ²)	767,64 $\pm$ 459,74	740,90 $\pm$ 348,25	0,724
	641,95 (530,08 ; 851,93)	642,17 (537,73 ; 862,35)	
SGE longueur (en mm)	649,83 $\pm$ 235,13	732,20 $\pm$ 231,81	0,003
	625,19 (504,08 ; 714,14)	721,64 (587,14 ; 879,82)	
R _{som}	1,60 $\pm$ 0,98	1,63 $\pm$ 1,06	0,898
	1,47 (0,91 ; 1,98)	1,38 (0,95 ; 1,81)	
R _{vis}	3,81 $\pm$ 1,59	2,51 $\pm$ 1,26	0,001
	3,98 (2,51 ; 4,89)	2,26 (1,77 ; 3,06)	
R _{vest}	16,10 $\pm$ 11,36	8,22 $\pm$ 4,95	< 0,001
	12,62 (10,46 ; 14,65)	6,38 (4,96 ; 10,20)	
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
SGE surface (en mm ²)	740,90 $\pm$ 348,25	656,21 $\pm$ 213,38	0,045
	642,17 (537,73 ; 862,35)	596,12 (509,15 ; 885,65)	
SGE longueur (en mm)	732,20 $\pm$ 231,81	631,81 $\pm$ 187,17	< 0,001
	721,64 (587,14 ; 879,82)	622,77 (493,41 ; 736,63)	
R _{som}	1,63 $\pm$ 1,06	1,54 $\pm$ 1,15	0,737

	1,38 (0,95 ; 1,81)	1,09 (0,80 ; 1,76)	
Rvis	2,51 ± 1,26	2,59 ± 1,42	0,752
	2,26 (1,77 ; 3,06)	2,37 (1,49 ; 3,12)	
Rvest	8,22 ± 4,95	7,52 ± 3,51	0,396
	6,38 (4,96 ; 10,20)	7,23 (5,02 ; 9,93)	
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
SGE surface (en mm ²)	656,21 ± 213,38	595,04 ± 205,83	0,024
	596,12 (509,15 ; 885,65)	552,80 (467,11 ; 691,38)	
SGE longueur (en mm)	631,81 ± 187,17	589,98 ± 176,82	0,012
	622,77 (493,41 ; 736,63)	575,21 (459,03 ; 643,98)	
Rsom	1,54 ± 1,15	1,31 ± 0,61	0,234
	1,09 (0,80 ; 1,76)	1,27 (0,90 ; 1,47)	
Rvis	2,59 ± 1,42	2,96 ± 1,44	0,116
	2,37 (1,49 ; 3,12)	2,70 (1,83 ; 3,87)	
Rvest	7,52 ± 3,51	7,92 ± 4,14	0,593
	7,23 (5,02 ; 9,93)	7,26 (5,02 ; 10,52)	
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
SGE surface (en mm ²)	595,04 ± 205,83	639,65 ± 286,87	0,287
	552,80 (467,11 ; 691,38)	595,36 (482,53 ; 740,76)	
SGE longueur (en mm)	589,98 ± 176,82	603,67 ± 198,25	0,575
	575,21 (459,03 ; 643,98)	530,73 (491,63 ; 676,67)	
Rsom	1,31 ± 0,61	1,13 ± 0,50	0,170
	1,27 (0,90 ; 1,47)	1,26 (0,70 ; 1,62)	
Rvis	2,96 ± 1,44	3,09 ± 2,27	0,757
	2,70 (1,83 ; 3,87)	2,55 (1,76 ; 3,75)	
Rvest	7,92 ± 4,14	9,57 ± 7,86	0,219
	7,26 (5,02 ; 10,52)	7,39 (4,58 ; 9,74)	
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
SGE surface (en mm ²)	767,64 ± 459,74	639,65 ± 286,87	0,096
	641,95 (530,08 ; 851,93)	595,36 (482,53 ; 740,76)	
SGE longueur (en mm)	649,83 ± 235,13	603,67 ± 198,25	0,155
	625,19 (504,08 ; 714,14)	530,73 (491,63 ; 676,67)	
Rsom	1,60 ± 0,98	1,13 ± 0,50	0,013

	1,47 (0,91 ; 1,98)	1,26 (0,70 ; 1,62)	
Rvis	3,81 ± 1,59	3,09 ± 2,27	0,055
	3,98 (2,51 ; 4,89)	2,55 (1,76 ; 3,75)	
Rvest	16,10 ± 11,36	9,57 ± 7,86	0,006
	12,62 (10,46 ; 14,65)	7,39 (4,58 ; 9,74)	

ET : écart-type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; SGE : Score Global de l'Equilibre ; Rsom : score somesthésique (C2/C1) ; Rvis : score visuel (C4/C1) ; Rvest : score vestibulaire (C5/C1) ; longY : longueur en Y ; longX : longueur en X

Tableau XXVI : Latéralisation (en mm) en fonction du côté pathologique chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant.

	Côté droit pathologique	Côté gauche pathologique	Xmoyen (valeurs absolues)	ANOVA	
	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	Moyenne ± ET	F	p-value
Eval. 2 – Eval. 1	- 16,13 ± 14,56	+ 10,63 ± 11,37	14,47 ± 11,90	33,56	< 0,001
Eval. 3 – Eval. 2	+ 14,27 ± 11,56	- 11,18 ± 12,34	14,11 ± 10,12	36,27	< 0,001
Eval. 4 – Eval. 3	+ 3,04 ± 6,14	- 0,63 ± 8,18	5,60 ± 4,82	2,06	0,161
Eval. 5 – Eval. 4	+ 1,44 ± 10,02	- 1,72 ± 8,73	7,41 ± 5,60	0,91	0,349
Eval. 5 – Eval. 1	+ 2,62 ± 8,47	- 2,91 ± 8,20	6,24 ± 5,91	3,53	0,070
Eval. 3 – Eval. 1	- 1,85 ± 7,37	- 0,56 ± 8,49	6,51 ± 4,40	0,21	0,647

ET : Ecart-Type ; F : distribution F qui représente le rapport entre deux indices de variabilité ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187 ; + : latéralisation du côté droit ; - : latéralisation du côté gauche

III.4.3.2. Évaluation cinématique

Aucune différence significative concernant les stratégies d'équilibre utilisées par les patients des deux groupes n'a été observée entre les évaluations 1 et 4 (Tableaux XXVII et XXIX). De même, les amplitudes articulaires du genou lors du maintien de l'équilibre sur le plateau de Freeman ne différaient pas significativement entre les évaluations 1 et 4, que ce

soit chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel (Tableau XXVIII) ou chez ceux ayant suivi le protocole de rééducation innovant (Tableau XXX).

Tableau XXVII : Suivi longitudinal des stratégies d'équilibre employées par les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel.

	Évaluation cinématique		Test du Khi2
	<i>n</i> (%)	<i>n</i> (%)	<i>p</i> -value
Eval. 1 vs Eval. 4	Eval. 1	Eval. 4	<i>0,374</i>
Stratégie de cheville	21 (70,00)	22 (73,33)	
Stratégie de hanche	9 (30,00)	8 (26,67)	

Tableau XXVIII : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires du genou lésé (en degrés) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel lors du maintien de l'équilibre sur un plateau de Freeman.

	Évaluation cinématique		Test de Wilcoxon
	Moyenne ± ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 4	Eval. 1	Eval. 4	<i>0,829</i>
Amplitude articulaire	2306,26 ± 2470,32	2166,47 ± 2586,81	
	1362,61 (844,36 ; 2191,79)	1451,05 (699,44 ; 2491,50)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile

Tableau XXIX : Suivi longitudinal des stratégies d'équilibre employées par les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant.

	Évaluation cinématique		Test du Khi2
	<i>n</i> (%)	<i>n</i> (%)	<i>p</i> -value
Eval. 1 vs Eval. 4	Eval. 1	Eval. 4	<i>1,000</i>
Stratégie de cheville	15 (57,69)	14 (53,85)	
Stratégie de hanche	11 (42,31)	12 (46,15)	

Tableau XXX : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires du genou lésé (en degrés) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant lors du maintien de l'équilibre sur un plateau de Freeman.

	Évaluation cinématique		Test de Wilcoxon
	Moyenne ± ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 4	Eval. 1	Eval. 4	
Amplitude articulaire	1582,15 ± 1631,26	1720,62 ± 1684,61	0,829
	1187,19 (552,29 ; 2155,23)	1187,19 (568,18 ; 2291,46)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile

III.4.3.3. Évaluation de la douleur

La douleur diminuait entre les évaluations 2 et 3 ($p = 0,007$) ainsi que 1 et 5 ($p = 0,039$) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel (Tableau XXXI).

La douleur augmentait entre les évaluations 1 et 2 ($p = 0,027$), puis diminuait entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$), 4 et 5 ($p = 0,030$) et 1 et 5 ($p = 0,012$) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant (Tableau XXXII).

Tableau XXXI : Suivi longitudinal de la douleur dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Évaluation de la douleur		Test de Student
	Moyenne ± ET		p-value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 2	Eval. 1	Eval. 2	
Douleur	1,47 ± 1,63	2,01 ± 1,82	0,100
	1,00 (0,00 ; 2,53)	2,00 (0,95 ; 3,00)	
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Douleur	2,01 ± 1,82	1,07 ± 1,23	0,007
	2,00 (0,95 ; 3,00)	1,00 (0,09 ; 1,43)	
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Douleur	1,07 ± 1,23	1,09 ± 0,95	0,905

	1,00 (0,09 ; 1,43)	1,00 (0,06 ; 2,00)	
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Douleur	1,09 ± 0,95	0,80 ± 1,10	<i>0,203</i>
	1,00 (0,06 ; 2,00)	0,50 (0,00 ; 1,00)	
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Douleur	1,47 ± 1,63	0,80 ± 1,10	<i>0,039</i>
	1,00 (0,00 ; 2,53)	0,50 (0,00 ; 1,00)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Tableau XXXII : Suivi longitudinal de la douleur dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Évaluation de la douleur		Test de Student
	Moyenne ± ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 2	Eval. 1	Eval. 2	
Douleur	1,68 ± 2,04	2,59 ± 2,01	<i>0,027</i>
	0,88 (0,00 ; 2,53)	2,00 (1,00 ; 5,00)	
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Douleur	2,59 ± 2,01	1,41 ± 1,74	<i>< 0,001</i>
	2,00 (1,00 ; 5,00)	1,00 (0,00 ; 2,00)	
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Douleur	1,41 ± 1,74	1,40 ± 1,64	<i>0,962</i>
	1,00 (0,00 ; 2,00)	0,80 (0,00 ; 2,00)	
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Douleur	1,40 ± 1,64	0,94 ± 1,16	<i>0,030</i>
	0,80 (0,00 ; 2,00)	0,58 (0,00 ; 1,63)	
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Douleur	1,68 ± 2,04	0,94 ± 1,16	<i>0,012</i>
	0,88 (0,00 ; 2,53)	0,58 (0,00 ; 1,63)	

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

III.4.3.4. Évaluation proprioceptive

Aucune différence significative n'a été montrée concernant le déficit proprioceptif entre les évaluations 1 et 4 dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel que ce soit pour le membre sain ou le membre opéré, en flexion et en extension (Tableau XXXIII).

A l'inverse, la proprioception du genou opéré, en flexion, s'améliorait à l'évaluation 4 chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant ($p = 0,002$) (Tableau XXXIV).

Tableau XXXIII : Suivi longitudinal du déficit proprioceptif (en degrés) dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Déficit proprioceptif		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 4	Eval. 1	Eval. 4	
Flexion du membre sain	2,86 $\pm$ 3,17	2,97 $\pm$ 2,28	0,904
	2,25 (0,00 ; 5,00)	2,00 (0,00 ; 5,00)	
Flexion du membre opéré	5,03 $\pm$ 3,46	3,61 $\pm$ 3,73	0,128
	5,00 (4,00 ; 5,75)	5,00 (0,25 ; 5,00)	
Extension du membre sain	2,91 $\pm$ 2,94	2,27 $\pm$ 2,76	0,383
	2,50 (0,00 ; 5,00)	0,00 (0,00 ; 5,00)	
Extension du membre opéré	4,47 $\pm$ 3,08	3,58 $\pm$ 3,74	0,364
	5,00 (2,00 ; 5,00)	4,00 (0,00 ; 5,00)	

ET : écart-type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 4 : J+53 à J+67

Tableau XXXIV : Suivi longitudinal du déficit proprioceptif (en degrés) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Déficit proprioceptif		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 4	Eval. 1	Eval. 4	
Flexion du membre sain	3,94 $\pm$ 5,94	3,53 $\pm$ 3,42	0,735
	2,00 (0,00 ; 5,00)	5,00 (0,00 ; 5,00)	
Flexion du membre opéré	4,82 $\pm$ 3,79	2,22 $\pm$ 2,49	0,002
	5,00 (1,88 ; 5,50)	0,50 (0,00 ; 5,00)	
Extension du membre sain	2,97 $\pm$ 2,74	2,53 $\pm$ 2,48	0,478
	3,50 (0,00 ; 5,00)	2,50 (0,00 ; 5,00)	
Extension du membre opéré	3,34 $\pm$ 2,82	2,48 $\pm$ 2,85	0,277
	5,00 (0,00 ; 5,00)	2,00 (0,00 ; 5,00)	

ET : écart-type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 4 : J+53 à J+67.

III.4.3.5. Amplitudes articulaires

Une amélioration des flexions active et passive était observée dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$), 3 et 4 ($p < 0,001$), 4 et 5 ($p < 0,001$). Une amélioration de l'extension passive était observée entre les évaluations 2 et 3 ($p = 0,015$) et 3 et 4 ($p = 0,006$) et une amélioration de l'extension active était observée entre les évaluations 4 et 5 ($p < 0,001$) (Tableau XXXV).

Une amélioration des flexions active et passive était observée dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation innovant entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$), 3 et 4 ($p < 0,001$), 4 et 5 ($p < 0,001$). Une amélioration de l'extension active était observée entre les évaluations 2 et 3 ($p = 0,008$), 3 et 4 ($p = 0,038$) et 4 et 5 ($p = 0,002$). Une amélioration de l'extension passive était observée entre les évaluations 2 et 3 ($p = 0,021$) et 4 et 5 ($p = 0,006$) (Tableau XXXVI).

Tableau XXXV : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires (en degrés) dans le groupe ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Amplitudes articulaires		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Flexion active	87,26 $\pm$ 20,00 90,00 (80,00 ; 100,00)	109,40 $\pm$ 16,38 110,00 (95,00 ; 122,50)	< 0,001
Flexion passive	93,89 $\pm$ 19,97 95,00 (86,00 ; 105,00)	116,49 $\pm$ 15,43 120,00 (102,50 ; 127,50)	< 0,001
Extension active	- 9,43 $\pm$ 7,84 -10,00 (-15,00 ; -5,00)	- 6,51 $\pm$ 9,31 -5,00 (-10,00 ; 0,00)	0,126
Extension passive	- 5,80 $\pm$ 6,09 -5,00 (-10,00 ; 0,00)	- 3,03 $\pm$ 6,27 0,00 (-5,00 ; 0,00)	0,015
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Flexion active	109,40 $\pm$ 16,38 110,00 (95,00 ; 122,50)	125,03 $\pm$ 14,20 125,00 (115,00 ; 134,00)	< 0,001
Flexion passive	116,49 $\pm$ 15,43 120,00 (102,50 ; 127,50)	131,77 $\pm$ 13,31 132,00 (125,00 ; 140,00)	< 0,001
Extension active	- 6,51 $\pm$ 9,31 -5,00 (-10,00 ; 0,00)	- 3,97 $\pm$ 4,79 -2,00 (-5,00 ; 0,00)	0,101
Extension passive	- 3,03 $\pm$ 6,27 0,00 (-5,00 ; 0,00)	0,11 $\pm$ 3,98 0,00 (0,00 ; 0,00)	0,006
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Flexion active	125,03 $\pm$ 14,20 125,00 (115,00 ; 134,00)	140,29 $\pm$ 11,29 140,00 (130,00 ; 150,00)	< 0,001
Flexion passive	131,77 $\pm$ 13,31 132,00 (125,00 ; 140,00)	145,69 $\pm$ 10,13 145,00 (139,00 ; 155,00)	< 0,001
Extension active	- 3,97 $\pm$ 4,79 -2,00 (-5,00 ; 0,00)	0,20 $\pm$ 3,86 0,00 (0,00 ; 0,00)	< 0,001
Extension passive	0,11 $\pm$ 3,98 0,00 (0,00 ; 0,00)	1,49 $\pm$ 4,36 0,00 (0,00 ; 2,50)	0,061

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Tableau XXXVI : Suivi longitudinal des amplitudes articulaires (en degrés) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Amplitudes articulaires		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Flexion active	84,03 $\pm$ 20,88 87,50 (70,00 ; 95,00)	113,44 $\pm$ 18,13 115,00 (103,75 ; 125,00)	< 0,001
Flexion passive	91,28 $\pm$ 20,72 95,00 (80,00 ; 100,00)	120,69 $\pm$ 17,62 125,00 (113,75 ; 131,25)	< 0,001
Extension active	- 12,03 $\pm$ 7,28 - 10,00 (-16,25 ; -5,00)	- 6,88 $\pm$ 8,59 - 5,00 (-10,00 ; 0,00)	0,008
Extension passive	- 7,25 $\pm$ 6,06 - 6,00 (-10,00 ; -2,25)	- 3,59 $\pm$ 7,10 0,00 (-5,00 ; 0,00)	0,021
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Flexion active	113,44 $\pm$ 18,13 115,00 (103,75 ; 125,00)	128,31 $\pm$ 20,72 130,00 (115,00 ; 142,50)	< 0,001
Flexion passive	120,69 $\pm$ 17,62 125,00 (113,75 ; 131,25)	133,59 $\pm$ 20,12 135,00 (120,00 ; 148,50)	< 0,001
Extension active	- 6,88 $\pm$ 8,59 - 5,00 (-10,00 ; 0,00)	- 4,28 $\pm$ 6,77 0,00 (-10,00 ; 0,00)	0,038
Extension passive	- 3,59 $\pm$ 7,10 0,00 (-5,00 ; 0,00)	- 1,63 $\pm$ 5,78 0,00 (-5,00 ; 0,50)	0,116
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Flexion active	128,31 $\pm$ 20,72 130,00 (115,00 ; 142,50)	140,34 $\pm$ 13,56 140,00 (130,00 ; 150,25)	< 0,001
Flexion passive	133,59 $\pm$ 20,12 135,00 (120,00 ; 148,50)	145,50 $\pm$ 12,53 148,00 (135,00 ; 155,25)	< 0,001
Extension active	- 4,28 $\pm$ 6,77 0,00 (-10,00 ; 0,00)	0,22 $\pm$ 5,90 0,00 (0,00 ; 0,00)	0,002
Extension passive	- 1,63 $\pm$ 5,78 0,00 (-5,00 ; 0,50)	1,84 $\pm$ 5,63 0,00 (0,00 ; 5,00)	0,006

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

III.4.3.6. Trophicité

La trophicité s'améliorait dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel entre les évaluations 2 et 3 ($p = 0,039$) et 4 et 5 ($p = 0,004$) (Tableau XXXVII).

La trophicité s'améliorait dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation innovant entre les évaluations 2 et 3 ($p = 0,006$) et 4 et 5 ($p = 0,035$) (Tableau XXXVIII).

Tableau XXXVII : Suivi longitudinal de la trophicité du genou opéré chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Trophicité		Test du Khi2
	<i>n</i> (%)		<i>p</i> -value
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Présence d'un godet	31 (88,57)	23 (65,71)	0,039
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Présence d'un godet	23 (65,71)	19 (54,29)	0,424
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Présence d'un godet	19 (54,29)	7 (20,00)	0,004
Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187			

Tableau XXXVIII : Suivi longitudinal de la trophicité du genou opéré chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Trophicité		Test du Khi2
	n (%)		p-value
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Présence d'un godet	27 (84,38)	17 (53,13)	0,006
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Présence d'un godet	17 (53,13)	17 (53,13)	1,000
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Présence d'un godet	17 (53,13)	8 (25,00)	0,035

Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

III.4.3.7. Évaluation manuelle de la force musculaire

L'analyse statistique a mis en évidence une augmentation de la force musculaire du quadriceps entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$), 3 et 4 ($p = 0,001$) et 4 et 5 ($p < 0,001$) chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel. La force musculaire des ischio-jambiers a également augmenté entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$) et 4 et 5 ($p < 0,001$). Plus distinctement, une augmentation de la force musculaire de l'ischio-jambier interne a été observée entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$) et 4 et 5 ($p = 0,001$) et une augmentation de la force musculaire de l'ischio-jambier externe a été observée entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$) et 4 et 5 ($p = 0,007$) (Tableau XXXIX).

Une augmentation de la force musculaire du quadriceps était observée entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$), 3 et 4 ($p = 0,002$) et 4 et 5 ($p = 0,003$) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant. La force musculaire des ischio-jambiers a augmenté entre les évaluations 2 et 3 ($p < 0,001$) et 4 et 5 ($p = 0,001$) que ce soit au niveau de l'ischio-jambier interne ($p < 0,001$) ou externe ($p < 0,001$) (Tableau XL).

Tableau XXXIX : Suivi longitudinal de la force musculaire chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Force musculaire		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Quadriceps	3,14 $\pm$ 0,91 3,00 (3,00 ; 4,00)	3,66 $\pm$ 0,76 4,00 (3,00 ; 4,00)	< 0,001
Ischio-jambiers	3,26 $\pm$ 0,66 3,00 (3,00 ; 4,00)	3,80 $\pm$ 0,58 4,00 (3,00 ; 4,00)	< 0,001
Ischio-jambier interne	3,14 $\pm$ 0,69 3,00 (3,00 ; 3,00)	3,69 $\pm$ 0,58 4,00 (3,00 ; 4,00)	< 0,001
Ischio-jambier externe	3,23 $\pm$ 0,77 3,00 (3,00 ; 4,00)	3,77 $\pm$ 0,65 4,00 (3,00 ; 4,00)	< 0,001
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Quadriceps	3,66 $\pm$ 0,76 4,00 (3,00 ; 4,00)	4,01 $\pm$ 0,52 4,00 (4,00 ; 4,00)	0,001
Ischio-jambiers	3,80 $\pm$ 0,58 4,00 (3,00 ; 4,00)	3,97 $\pm$ 0,57 4,00 (4,00 ; 4,00)	0,083
Ischio-jambier interne	3,69 $\pm$ 0,58 4,00 (3,00 ; 4,00)	3,86 $\pm$ 0,88 4,00 (4,00 ; 4,00)	0,226
Ischio-jambier externe	3,77 $\pm$ 0,65 4,00 (3,00 ; 4,00)	3,83 $\pm$ 0,92 4,00 (3,50 ; 4,00)	0,711
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Quadriceps	4,01 $\pm$ 0,52 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,50 $\pm$ 0,50 4,00 (4,00 ; 5,00)	< 0,001
Ischio-jambiers	3,97 $\pm$ 0,57 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,44 $\pm$ 0,50 4,00 (4,00 ; 5,00)	< 0,001
Ischio-jambier interne	3,86 $\pm$ 0,88 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,41 $\pm$ 0,55 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,001
Ischio-jambier externe	3,83 $\pm$ 0,92 4,00 (3,50 ; 4,00)	4,30 $\pm$ 0,57 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,007

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Tableau XL : Suivi longitudinal de la force musculaire chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Force musculaire		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 2 vs Eval. 3	Eval. 2	Eval. 3	
Quadriceps	3,09 $\pm$ 0,69 3,00 (3,00 ; 4,00)	4,00 $\pm$ 0,57 4,00 (4,00 ; 4,00)	< 0,001
Ischio-jambiers	3,22 $\pm$ 0,83 3,00 (3,00 ; 4,00)	3,97 $\pm$ 0,59 4,00 (4,00 ; 4,00)	< 0,001
Ischio-jambier interne	2,94 $\pm$ 1,37 3,00 (3,00 ; 4,00)	3,88 $\pm$ 0,55 4,00 (3,00 ; 4,00)	< 0,001
Ischio-jambier externe	2,84 $\pm$ 1,32 3,00 (3,00 ; 4,00)	3,84 $\pm$ 0,63 4,00 (4,00 ; 4,00)	< 0,001
Eval. 3 vs Eval. 4	Eval. 3	Eval. 4	
Quadriceps	4,00 $\pm$ 0,57 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,40 $\pm$ 0,56 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,002
Ischio-jambiers	3,97 $\pm$ 0,59 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,16 $\pm$ 0,63 4,00 (4,00 ; 5,00)	0,083
Ischio-jambier interne	3,88 $\pm$ 0,55 4,00 (3,00 ; 4,00)	3,86 $\pm$ 0,66 4,00 (3,00 ; 4,00)	0,889
Ischio-jambier externe	3,84 $\pm$ 0,63 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,01 $\pm$ 0,60 4,00 (4,00 ; 4,00)	0,176
Eval. 4 vs Eval. 5	Eval. 4	Eval. 5	
Quadriceps	4,41 $\pm$ 0,56 4,00 (4,00 ; 5,00)	4,75 $\pm$ 0,44 5,00 (4,75 ; 5,00)	0,003
Ischio-jambiers	4,16 $\pm$ 0,63 4,00 (4,00 ; 5,00)	4,59 $\pm$ 0,56 5,00 (4,00 ; 5,00)	0,001
Ischio-jambier interne	3,86 $\pm$ 0,66 4,00 (3,00 ; 4,00)	4,41 $\pm$ 0,61 4,00 (4,00 ; 5,00)	< 0,001
Ischio-jambier externe	4,01 $\pm$ 0,60 4,00 (4,00 ; 4,00)	4,66 $\pm$ 0,55 5,00 (4,00 ; 5,00)	< 0,001

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 2 : entre J+15 et J+18 ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 4 : J+53 à J+67 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

III.4.3.8. Performance de marche

La performance de marche sur six minutes augmentait de manière significative à l'évaluation 5 par rapport à l'évaluation 3 dans les deux groupes de rééducation ($p < 0,001$) (Tableaux XLI et XLII).

Tableau XLI : Suivi longitudinal de la performance de marche sur six minutes (en mètres) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Test des 6 minutes marche		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 3 vs Eval. 5	Eval. 3	Eval. 5	
Distance parcourue (m)	425,27 $\pm$ 158,45	625,25 $\pm$ 78,47	< 0,001
	432,00 (360,00 ; 529,50)	640,00 (562,88 ; 676,70)	
ET : Ecart-Type ; Q ₁ : 1 ^{er} quartile ; Q ₃ : 3 ^{ème} quartile ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 5 : J+173 et J+187			

Tableau XLII : Suivi longitudinal de la performance de marche sur six minutes (en mètres) chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Test des 6 minutes marche		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 3 vs Eval. 5	Eval. 3	Eval. 5	
Distance parcourue (m)	506,59 $\pm$ 127,70	647,50 $\pm$ 86,61	< 0,001
	507,50 (425,00 ; 602,69)	650,00 (586,50 ; 704,25)	
ET : Ecart-Type ; Q ₁ : 1 ^{er} quartile ; Q ₃ : 3 ^{ème} quartile ; Eval. 3 : entre J+37 et J+44 ; Eval. 5 : J+173 et J+187			

III.4.3.9. Questionnaires

Score fonctionnel de Lysholm-Tegner :

Une amélioration du score fonctionnel de Lysholm-Tegner était observée entre les évaluations 1 et 5 chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel ($p < 0,001$) (Tableau XLIII) et chez ceux ayant suivi le protocole de rééducation innovant ($p = 0,004$) (Tableau XLIV).

Tableau XLIII : Suivi longitudinal du score fonctionnel de Lysholm-Tegner pour les patients ayant bénéficié du protocole rééducation conventionnel.

	Questionnaire de Lysholm-Tegner		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Score de Lysholm	64,43 $\pm$ 20,13	84,67 $\pm$ 12,84	< 0,001
	64,50 (53,50 ; 79,00)	89,00 (76,00 ; 94,00)	

ET : écart-type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Tableau XLIV : Suivi longitudinal du score fonctionnel de Lysholm-Tegner chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Questionnaire de Lysholm-Tegner		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		p -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Score de Lysholm	72,31 $\pm$ 16,49	82,83 $\pm$ 12,97	0,004
	75,00 (59,50 ; 81,00)	85,00 (77,00 ; 94,00)	

ET : écart-type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Score fonctionnel IKDC :

L'analyse statistique a mis en évidence une amélioration du score fonctionnel IKDC à la fois chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel ($p < 0,001$) (Tableau XLV) et chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant ($p < 0,001$) (Tableau XLVI). Par ailleurs, une amélioration significative de la fonction du genou après blessure était observée dans les deux groupes ($p < 0,001$).

Tableau XLV : Suivi longitudinal du score fonctionnel IKDC chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Score fonctionnel IKDC		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Score fonctionnel	41,48 $\pm$ 11,93 40,00 (32,00 ; 49,00)	56,93 $\pm$ 10,24 58,00 (51,13 ; 61,75)	< 0,001
Fonction avant blessure	9,13 $\pm$ 1,78 10,00 (9,00 ; 10,00)	8,77 $\pm$ 2,06 10,00 (8,25 ; 10,00)	0,482
Fonction après blessure	4,10 $\pm$ 1,73 4,00 (3,00 ; 6,00)	6,70 $\pm$ 1,51 7,00 (5,00 ; 8,00)	< 0,001

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 5 : J+173 et J+18

Tableau XLVI : Suivi longitudinal du score fonctionnel IKDC chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Score fonctionnel IKDC		Test de student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Score fonctionnel	42,98 $\pm$ 9,87 40,00 (36,50 ; 47,00)	55,59 $\pm$ 11,12 56,00 (45,00 ; 64,00)	< 0,001
Fonction avant blessure	9,36 $\pm$ 1,22 10,00 (9,00 ; 10,00)	8,39 $\pm$ 2,75 10,00 (8,00 ; 10,00)	0,127
Fonction après blessure	4,46 $\pm$ 1,88 4,00 (3,00 ; 5,75)	6,68 $\pm$ 1,33 7,00 (6,00 ; 8,00)	< 0,001

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Score de qualité de vie :

Dans les deux groupes de rééducation, le questionnaire de KOOS révélait une diminution de la douleur (Groupe 1, $p = 0,001$; Groupe 2, $p = 0,016$), une amélioration de la vie quotidienne (Groupe 1, $p < 0,001$; Groupe 2, $p < 0,001$) et de la qualité de vie (Groupe 1, $p < 0,001$; Groupe 2, $p < 0,001$) et une augmentation des activités sportives et des loisirs (Groupe 1, $p < 0,001$; Groupe 2, $p < 0,001$) (Tableaux XLVII et XLVIII).

Tableau XLVII : Suivi longitudinal du score de qualité de vie chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation conventionnel.

	Score de qualité de vie		Test de Student
	Moyenne $\pm$ ET		<i>p</i> -value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Symptômes	70,61 $\pm$ 16,53 71,43 (62,50 ; 82,14)	75,61 $\pm$ 11,60 75,00 (67,86 ; 82,14)	0,166
Douleur	73,65 $\pm$ 12,86 77,78 (63,89 ; 83,33)	82,78 $\pm$ 11,63 83,33 (73,61 ; 93,06)	0,001

Fonction et vie quotidienne	81,13 ± 14,92 85,29 (69,85 ; 94,12)	92,06 ± 9,45 95,59 (86,03 ; 98,53)	< 0,001
Sports et loisirs	46,57 ± 27,14 45,00 (25,00 ; 67,50)	64,29 ± 20,33 65,00 (50,00 ; 77,50)	< 0,001
Qualité de vie	34,64 ± 21,08 37,50 (18,75 ; 43,75)	54,46 ± 20,59 62,50 (40,63 ; 68,75)	< 0,001

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

Tableau XLVIII : Suivi longitudinal du score de qualité de vie chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant.

	Score de qualité de vie		Test de student
	Moyenne ± ET		p-value
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)		
Eval. 1 vs Eval. 5	Eval. 1	Eval. 5	
Symptômes	73,10 ± 16,80 76,79 (63,39 ; 85,71)	74,44 ± 13,43 78,57 (64,29 ; 85,71)	0,672
Douleur	74,13 ± 16,02 77,78 (71,53 ; 80,56)	81,34 ± 14,45 84,72 (73,61 ; 91,67)	0,016
Fonction et vie quotidienne	80,79 ± 16,57 86,76 (71,69 ; 90,44)	90,85 ± 10,89 95,59 (87,50 ; 98,90)	< 0,001
Sports et loisirs	43,44 ± 24,51 42,50 (25,00 ; 56,25)	66,09 ± 17,35 67,50 (53,75 ; 81,25)	< 0,001
Qualité de vie	29,69 ± 18,38 28,13 (18,75 ; 43,75)	58,20 ± 19,98 56,25 (42,19 ; 70,31)	< 0,001

ET : Ecart-Type ; Q₁ : 1^{er} quartile ; Q₃ : 3^{ème} quartile ; Eval. 1 : entre J-8 et J-1 ; Eval. 5 : J+173 et J+187

III.5. DISCUSSION

Cette étude visait à comparer un protocole de rééducation innovant et un protocole de rééducation conventionnel en termes de cinétique de récupération, de développement des compétences proprioceptives et d'amélioration fonctionnelle chez les sportifs opérés d'une ligamentoplastie du genou.

Les principaux résultats de cette étude ont montré que pour une même qualité du contrôle postural, les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant utilisaient plus la somesthésie six mois après l'intervention chirurgicale. Concernant les caractéristiques cliniques, les deux groupes de rééducation présentaient des améliorations des amplitudes articulaires et de la trophicité, une diminution de la douleur au cours des six mois de suivi et une augmentation des scores obtenus aux questionnaires de Lysholm, IKDC et KOOS. Nos résultats ont montré que, bien que la force musculaire augmentait dans les deux groupes de rééducation au cours des six mois de suivi, les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant présentaient une force musculaire de l'ischio-jambier externe plus importante six mois après l'intervention chirurgicale et une force musculaire du quadriceps plus importante un mois, deux mois et six mois après l'intervention. Cette différence de force musculaire du quadriceps six mois après l'intervention était également observée au test d'isocinétisme. En effet, ce test révélait une différence de force musculaire entre les deux groupes aussi bien à la vitesse de $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ qu'à la vitesse de $180^{\circ} \cdot s^{-1}$ et un déficit moindre du quadriceps chez les patients ayant bénéficié du protocole de rééducation innovant. Par ailleurs, bien que la distance parcourue lors d'une marche de six minutes augmentait dans les deux groupes entre le premier et le sixième mois post-opératoire, les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant parcouraient une plus grande distance de marche un mois après l'intervention chirurgicale. Enfin, même si les deux groupes de rééducation présentaient des performances proprioceptives semblables avant l'intervention chirurgicale et deux mois après, les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant présentaient une amélioration de la proprioception en flexion au niveau du membre ipsilatéral à la lésion deux mois après l'intervention chirurgicale par rapport aux résultats obtenus avant l'intervention.

Pour une même qualité du contrôle postural six mois après l'intervention chirurgicale, les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant utilisaient plus la somesthésie que les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel, évoquant un développement des capacités proprioceptives plus important au cours de la rééducation. Par ailleurs, 15 jours après l'intervention chirurgicale, les patients des deux groupes de

rééducation s'appuyaient davantage sur le membre contralatéral à l'intervention lors du test de posturographie. Cette compensation diminuait dans les deux groupes un mois après l'intervention chirurgicale.

Dans cette étude, les mesures des amplitudes articulaires, l'évaluation de la trophicité et de la douleur et les questionnaires de Lysholm-Tegner, IKDC et KOOS n'ont pas montré de différence significative entre les deux groupes. Néanmoins, l'évolution de ces paramètres au cours des six mois de suivi présentait des similitudes dans les deux groupes. Premièrement, une augmentation des amplitudes articulaires du genou opéré était observée en flexion et en extension dans les deux groupes de rééducation entre le 15^{ème} jour et le 1^{er} mois post-opératoire, entre le 1^{er} mois et le 2^{ème} mois post-opératoire et entre le 2^{ème} mois et le 6^{ème} mois post-opératoire. En rééducation, le gain d'amplitude articulaire est obtenu dans un premier temps par des techniques douces de récupération de la mobilité à savoir une mobilisation multidirectionnelle de la rotule et du cul de sac sous quadricipital avec massage des tissus péri-articulaires. Ensuite, des massages de tous les plans de glissement péri-articulaire avec des pétrissages, des frictions, des massages transverses profonds permettent d'éviter les rétractions. La mobilisation passive et active permet un gain de flexion par l'utilisation d'appuis sus-rotuliens, le contracter-relâcher et la recherche de glissements postérieurs par appui manuel ou contraction des ischio-jambiers. Deuxièmement, dans les deux groupes de rééducation une diminution de la douleur était observée entre le 15^{ème} jour et le 1^{er} mois post-opératoire ainsi qu'entre le 2^{ème} mois et le 6^{ème} mois post-opératoire dans le groupe ayant suivi le protocole de rééducation innovant. Les moyens antalgiques utilisés en rééducation comme les massages à visée circulatoire, la cryothérapie ou les massages de la cicatrice afin d'éviter la formation d'adhérences participent à cette réduction de la douleur. Ceci est d'autant plus vrai que la douleur six mois après l'intervention chirurgicale est significativement inférieure à la douleur ressentie avant l'intervention. Troisièmement, une amélioration de la trophicité était observée entre le 15^{ème} jour et le 1^{er} mois post-opératoire ainsi qu'entre le 2^{ème} mois et le 6^{ème} mois post-opératoire dans les deux groupes. Les massages permettent un drainage lymphatique et une diminution de l'œdème. Enfin, les questionnaires de Lysholm-Tegner, IKDC et KOOS ont montré une augmentation des scores entre l'évaluation pré-opératoire et l'évaluation six mois après l'intervention chirurgicale dans les deux groupes de rééducation. Ainsi, les patients jugent la fonctionnalité de leur genou meilleure six mois après l'intervention chirurgicale qu'avant l'intervention. De même, ils ont moins de douleur, améliorent leur vie quotidienne et leur qualité de vie et reprennent des activités de loisirs et des activités sportives. Ces résultats sont en adéquation avec l'étude de

Dragicevic-Cyjetkovic *et al.*, (2014) qui avait montré que la rééducation avait un effet sur la récupération fonctionnelle du genou après reconstruction chirurgicale du LCA.

Les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant présentaient une force musculaire significativement plus importante que les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel, un mois, deux mois et six mois après l'intervention chirurgicale. Plusieurs propriétés du milieu aquatique peuvent expliquer cette différence. Premièrement, tout corps plongé dans l'eau est soumis à un effet de résistance appelé force de trainée et de turbulence (Kemoun et al., 2006). Cette résistance à l'avancement augmente avec le carré de la vitesse : plus le corps ou partie du corps se déplace rapidement, plus la force motrice est grande (Chevutski *et al.*, 2007). En milieu aquatique, lorsqu'un patient ressent une douleur il peut stopper son mouvement, la force tombe alors précipitamment car la viscosité de l'eau amortit le mouvement presque instantanément. Ce phénomène permet un meilleur contrôle des activités de renforcement (Kemoun et al., 2006). Deuxièmement, la poussée d'Archimède peut, quant à elle, favoriser la levée de sidération musculaire. En effet, après toute atteinte intra-articulaire du genou, une mise au repos du quadriceps est observée, pendant une durée très variable. La poussée d'Archimède permet une sollicitation du quadriceps en décharge et donc un renforcement en douceur. Troisièmement, l'abaissement du poids apparent du corps permet une mise en charge précoce et donc un renforcement musculaire progressif par abaissement du niveau d'immersion (Becker, 2009 ; Kemoun et al., 2006). Ensuite, la température de l'eau entraîne un échauffement musculaire qui peut favoriser la mobilisation du membre opéré et donc permettre indirectement un renforcement musculaire. Enfin, la pression hydrostatique joue également un rôle indirect sur le renforcement musculaire en favorisant le retour veineux et lymphatique. Par ce retour veineux et lymphatique, les contractures, c'est-à-dire le mécanisme de défense qui se met en place suite à un traumatisme pour bloquer la zone traumatisée, vont disparaître et permettre ainsi une mobilisation progressive et donc un effort musculaire de la zone initialement contracturée. Pourtant, en 1994, Tovin *et al.*, avaient déjà comparé des exercices de rééducation en milieu aquatique avec des exercices de rééducation réalisés à sec chez des patients opérés d'une ligamentoplastie du genou et avaient montré que les exercices en milieu aquatique n'étaient pas aussi efficaces que les exercices à sec pour le gain en force et la trophicité musculaire deux mois après l'intervention chirurgicale. Il semblerait donc que ce soit la complémentarité entre les exercices à sec et les exercices en milieu aquatique qui puisse expliquer cette différence de force musculaire en faveur des patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant. La poussée d'Archimède permet la réalisation d'exercices en station debout, c'est-à-

dire avec un schéma moteur habituel pour le patient qui est directement transférable à sec et qui permet un meilleur renforcement musculaire à sec que des exercices qui seraient réalisés en stations assise ou allongée. A plus long terme, ce meilleur renforcement musculaire chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant permettrait de limiter les risques d'apparition de l'arthrose. En effet, Grindem *et al.*, (2016) ont expliqué qu'une force asymétrique du quadriceps chez les patients présentant une rupture du LCA était un facteur de risque de développement de l'arthrose. Malgré cette différence de force musculaire entre les deux groupes de rééducation, une amélioration progressive était notable dans les deux groupes au cours des six mois de suivi. Notre étude est en accord avec d'autres études qui avaient montré une amélioration de la force musculaire et une réduction de la différence de force musculaire entre le membre opéré et le membre contralatéral après différents programmes de rééducation (Beard *et al.*, 1998 ; Carter *et al.*, 1997 ; Dragicevic-Cvjetkovic *et al.*, 2014 ; Shelbourne *et al.*, 1997 ; Timm, 1997). Cette amélioration progressive peut s'expliquer par un renforcement musculaire adapté au processus biologique de ligamentisation. Dans un premier temps la rééducation musculaire vise à lutter contre l'amyotrophie et la sidération musculaire. Dans un deuxième temps, le travail des muscles ischio-jambiers se doit d'insister sur le rôle freinateur dans les derniers degrés d'extension et sur le rôle stabilisateur lorsque le genou est fléchi en charge. En fin de rééducation le renforcement musculaire privilégie les exercices dérivés des gestes sportifs. Par ailleurs, Zhou *et al.*, (2008) ont montré qu'il y avait une corrélation positive entre la proprioception et la force musculaire du quadriceps. L'amélioration du signal proprioceptif pourrait augmenter l'activation musculaire. Liu-Ambrose *et al.*, (2003) ont constaté que le développement proprioceptif pouvait induire un gain de force en isocinétisme. Une autre étude a montré que le renforcement musculaire pouvait favoriser le développement des informations proprioceptives (Bouët & Gahéry, 2000). Bien que le test de proprioception ne révélait aucune différence significative entre les deux groupes de rééducation avant l'intervention chirurgicale et deux mois après l'intervention, cette étude a montré que les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant réduisaient de manière significative le déficit proprioceptif en flexion du membre ipsilatéral à la lésion deux mois après l'intervention chirurgicale. En effet, le milieu aquatique oblige le patient à maintenir son équilibre dans de nouvelles conditions. Ces conditions permettent la stimulation du circuit proprioceptif en créant des situations de déséquilibre que le patient doit progressivement contrôler. Par exemple, un patient en appui unipodal avec une planche placée sous le pied développe ses informations proprioceptives. La planche ayant tendance à remonter à la surface, le patient

doit faire preuve d'une bonne coordination pour la maintenir, renforce sa vigilance neuromusculaire et travaille en équilibre (Kemoun *et al.*, 2006). Par ailleurs, la pression hydrostatique associée à la viscosité du milieu est à l'origine de stimuli sensoriels extéroceptifs. Cet enveloppement de la partie immergée du corps serait à l'origine d'une meilleure perception de la position des membres. De même, la résistance au déplacement créée des aspirations tourbillonnaires qui valorisent les informations extéroceptives voire proprioceptives, et permettent ainsi une meilleure prise de conscience du schéma corporel (Kemoun *et al.*, 2006).

Cette étude a montré que les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant parcouraient une plus grande distance de marche en six minutes que les patients ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel, un mois après l'opération. Avec l'immersion en eau, les forces gravitationnelles peuvent être partiellement ou complètement compensées de sorte que seules les forces du couple agissent sur le site lésé. Par exemple, pour une immersion jusqu'aux épaules, le poids apparent du corps est de 15 à 20 kg et il suffit ainsi de quelques unités motrices actives pour que le mouvement soit possible. Grâce à la diminution apparente du poids du corps, la remise en charge progressive est rendue possible par abaissement du niveau d'immersion (Becker *et al.*, 2009 ; Kemoun *et al.*, 2006). L'immersion permet ainsi des mouvements actifs, une automatisation du schéma de marche transférable en milieu sec et donc un retour précoce à la marche sur terre. Par ailleurs, six mois après l'intervention chirurgicale, aucune différence significative entre les deux groupes de rééducation n'était observée, suggérant que les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant récupéraient plus rapidement que le groupe ayant suivi le protocole de rééducation conventionnel, ces derniers rattrapant leur retard à six mois. Ce test présente néanmoins une limite puisqu'il n'est pas réalisé à chacune des cinq évaluations. Les études futures devront tester les performances de marche avant intervention chirurgicale afin de juger de l'homogénéité des groupes en début d'étude.

Les propriétés chimiques de l'eau thermale nancéienne sont également à prendre en considération dans l'efficacité de la rééducation. Par exemple, les eaux chlorurées sodiques (NaCl) (Académie Nationale de Médecine) ont des propriétés proches de l'eau de mer, intéressantes en rééducation physique pour l'allègement du poids du corps et une mise en charge précoce.

En plus de ses propriétés physico-chimiques, le milieu aquatique a un effet euphorisant marqué. Il permet au patient d'échapper à son quotidien et génère ainsi une sensation de bien-être. Le patient peut bouger, marcher plus facilement et souffre moins. La

sensation d'être momentanément libéré de son handicap entraîne chez le patient un désir de mouvement, prélude à la récupération de la fonction (Kemoun *et al.*, 2006).

Ce travail présente néanmoins plusieurs limites. La première difficulté concerne le recueil des données cliniques. Cette étude nécessitait la contribution de 14 masseurs-kinésithérapeutes mais, afin d'éviter les variations inter-évaluateurs et d'assurer la répétabilité des mesures, une harmonisation des pratiques a été effectuée avant l'inclusion du premier patient dans l'étude. Une autre limite de cette étude concerne les questionnaires. Il existe toujours une part de subjectivité dans les réponses et il se pourrait que certains patients aient surestimé ou à l'inverse sous-estimé la capacité fonctionnelle de leur genou. D'autre part, la durée de prise en charge en rééducation spécifique à l'étude était très courte. Néanmoins, cette durée avait été retenue pour être en concordance avec le modèle des cures thermales en France dont la durée est en moyenne de trois semaines. Cette durée provient d'un choix empirique remontant à une longue tradition. La première semaine permet au patient de découvrir les techniques de soins. La deuxième semaine permet au patient de tirer profit de ces soins avec un effet profond de la prise en charge qui peut générer une certaine fatigue générale. La troisième semaine sert de récupération tout en continuant le même traitement, ceci permettant d'éviter le besoin de repos post-cure, difficilement concevable vis-à-vis de la sécurité sociale (Chevallier, 2004).

III.6. CONCLUSION

Cette étude montre que le protocole de rééducation innovant avec une partie en milieu aquatique et une partie à sec accélère la récupération de la force musculaire et de la marche et améliore la proprioception. Bien que la rééducation spécifique à l'étude n'ait duré que trois semaines et que ce délai puisse paraître court, il semble suffisant pour que le bénéfice puisse durer dans le temps. Par ailleurs, même si les patients qui suivent un protocole de rééducation conventionnel récupèrent le retard six mois après l'intervention chirurgicale sur certains paramètres, la récupération plus rapide de la fonctionnalité du genou suite à une rééducation innovante permettrait à court terme d'éviter une lésion du membre contralatéral à l'opération par surcompensation et à long terme de réduire les risques d'apparition de l'arthrose. L'efficacité d'une telle rééducation pourrait permettre également aux patients de reprendre plus tôt des activités sociales, des activités physiques et leur activité professionnelle. Une telle prise en charge présenterait donc un intérêt économique avec notamment une réduction des arrêts de travail. Cette diminution des arrêts de travail profiterait à la sécurité sociale avec une diminution des frais de santé mais aussi aux entreprises avec une diminution des coûts liés aux arrêts de production, à une perte de rentabilité ou au remplacement du salarié en arrêt de travail.

**IV. ÉTUDE 2 : INFLUENCE DES ÉLÉMENTS
MÉTÉOROLOGIQUES SUR LE CONTRÔLE
POSTURAL ET LA DOULEUR DES
PATIENTS PRÉSENTANT UNE ARTHROSE
DU GENOU**

IV.1. INTRODUCTION

IV.1.1. Arthrose du genou

L'arthrose est une dégénérescence chronique d'une articulation, qui se caractérise par une détérioration du cartilage articulaire (Wright, 1944). Le cartilage articulaire est la mince couche de tissu mou hydraté et déformable qui tapisse les extrémités osseuses des diarthroses et dont l'aspect translucide lui a fait donner le nom de « hyalin ». Il ne comporte aucun vaisseau artériel, veineux ou lymphatique et aucune fibre de terminaison nerveuse (Hamerman, 1989 ; Peyron, 1994). Il est constitué de chondrocytes situés au sein d'une matrice extracellulaire composée principalement d'eau (60 à 80 %) et de macromolécules (20 à 40 %), de fibres de collagènes représentent 50 % du poids sec, de glycoprotéines 15 à 20 % du poids sec et de protéoglycane, dont la concentration varie en fonction de la profondeur et des régions anatomiques, 30 à 35 % du poids sec (Buckwalter & Rosenberg, 1988). Ce tissu a une double fonction : assurer le glissement des extrémités osseuses et permettre l'amortissement et la transmission des charges.

L'OMS a défini l'arthrose comme la résultante de phénomènes mécaniques et biologiques qui déstabilisent l'équilibre entre la synthèse et la dégradation du cartilage et de l'os sous-chondral. Ce déséquilibre peut être provoqué par de multiples facteurs : génétiques, congénitaux, métaboliques ou traumatiques. L'arthrose touche tous les tissus de l'articulation diarthrodiale et se manifeste par des modifications morphologiques, biochimiques, moléculaires et biomécaniques de la matrice cartilagineuse conduisant à un ramollissement, une fissuration, une sclérose de l'os sous-chondrale associée à la formation d'ostéophytes et de géodes, une ulcération et une perte du cartilage articulaire (Ray, 1937 ; Wright, 1944). Quand elle devient symptomatique, l'arthrose entraîne des douleurs et des raideurs articulaires, un éventuel épanchement articulaire avec des degrés variables d'inflammation locale (Cooper *et al.*, 1994).

La prévalence de l'arthrose augmente avec l'avancée en âge, en particulier chez les personnes âgées de 50 ans et plus. Néanmoins, l'âge n'est pas le seul facteur favorisant l'arthrose. L'influence hormonale, particulièrement chez les femmes en périodes pré et post ménopausiques, l'activité physique avec la surexposition des articulations à des traumatismes répétés, le surpoids, la présence d'un varus ou d'un valgus sont autant de facteurs favorisant le développement de l'arthrose (Mazières, 2002 ; Vignos PJ, 1962).

L'arthrose est la plus commune des arthropathies. Elle est responsable d'une morbidité majeure, particulièrement dans les pays développés dont la population est vieillissante, et où elle constitue une cause majeure d'invalidité mais aussi de mortalité (Felson, 2004 ; Hochberg, 2008 ; Nuesch *et al.*, 2011 ; Sharma *et al.*, 2006). Selon Cicuttini & Spector (1995), 68 % des femmes et 58 % des hommes ayant 65 ans ou plus présentent des signes radiologiques de la maladie. La gonarthrose représente plus d'un tiers des arthroses et s'accompagne généralement de raideurs, d'une perte progressive des fonctions, d'une atrophie musculaire et d'une diminution de la force musculaire, d'un déconditionnement, de douleurs et d'une altération du contrôle postural (Gauchard *et al.*, 2010 ; Petersson & Jacobsson, 2002 ; Ray, 1937 ; Sherrington & Lord, 1998).

IV.1.2. Gonarthrose et contrôle postural

La stabilité posturale et les performances fonctionnelles chez les patients présentant une gonarthrose sont moindres par rapport à des sujets sains (Hassan *et al.*, 2001 ; Hurley *et al.*, 1997 ; Tjon *et al.*, 2000). Cette instabilité posturale peut résulter d'une atrophie musculaire liée à une restriction des activités en raison de la douleur (Hurley *et al.*, 1997 ; Tjon *et al.*, 2000). Pour Hurley *et al.*, (1997), ces faiblesses musculaires sont la cause d'une activation incomplète du quadriceps pendant une contraction volontaire. En effet, chez les patients présentant une gonarthrose, un dommage articulaire peut stimuler les mécanorécepteurs évoquant une information afférente anormale qui va diminuer l'information volontaire du quadriceps, induire une faiblesse musculaire et diminuer les acuités proprioceptives. Par conséquent, un endommagement des mécanorécepteurs articulaires peut nuire à la fois au contrôle moteur et à l'appréciation sensorielle chez les patients présentant une gonarthrose (Hurley *et al.*, 1997). Ainsi, Tjon *et al.*, (2000) expliquent que les patients présentant une gonarthrose ont besoin d'une activité de régulation plus importante pour conserver leur CG à l'intérieur du polygone de sustentation.

IV.1.3. Arthrose et paramètres météorologiques

La douleur liée à l'arthrose est typiquement épisodique et entre un et deux tiers des patients rapportent fréquemment que l'intensité de la douleur dépend des conditions météorologiques (von Mackensen *et al.*, 2005). Selon eux, une température basse, l'humidité de l'air et la pression atmosphérique sont les éléments déclencheurs les plus décrits dans

l'exacerbation de la douleur (Jamison *et al.*, 1995, Ng *et al.*, 2004). Cette certitude est très profondément enracinée dans de nombreuses cultures. Par exemple, dans la langue Chinoise, "rhumatismes" est traduit par "Fēngshī zhèng" (風濕症), "Feng" (風) signifie "vent" et "Shi" (濕) signifie "humide". Dans plusieurs pays à l'instar de l'Allemagne et du Japon, les bulletins météorologiques donnent des indications à la population sur la douleur qu'elle pourrait ressentir en fonction des changements climatiques.

En dépit de la fréquence avec laquelle le phénomène est décrit par les patients, la littérature scientifique étudiant les relations entre des données météorologiques objectives et la douleur articulaire est contradictoire (Figueiredo *et al.*, 2011 ; Harris, 1984 ; Quick, 1997). Ces différentes études qui prenaient notamment en compte la température (Aikman, 1997 ; Brennan *et al.*, 2012 ; Cay *et al.*, 2011 ; Dorleijn *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2016 ; Guedj & Weinberger 1990 ; McAlindon *et al.*, 2007 ; Sibley, 1985 ; Strusberg *et al.*, 2002 ; Timmermans *et al.*, 2015 ; Vergés *et al.*, 2004 ; Wilder *et al.*, 2003), les précipitations (Aikman, 1997 ; Brennan *et al.*, 2012 ; Cay *et al.*, 2011 ; Dorleijn *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2016 ; Guedj & Weinberger 1990 ; McAlindon *et al.*, 2007 ; Sibley, 1985 ; Timmermans *et al.*, 2015 ; Wilder *et al.*, 2003), la pression atmosphérique (Aikman, 1997 ; Brennan *et al.*, 2012 ; Cay *et al.*, 2011 ; Clarke & Nicholl, 1991 ; Dorleijn *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2016 ; Guedj & Weinberger, 1990 ; McAlindon *et al.*, 2007 ; Sibley, 1985 ; Strusberg *et al.*, 2002 ; Timmermans *et al.*, 2015 ; Vergés *et al.*, 2004 ; Wilder *et al.*, 2003), l'humidité (Aikman, 1997 ; Cay *et al.*, 2011 ; Clarke & Nicholl, 1991 ; Dorleijn *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2016 ; Guedj & Weinberger, 1990 ; McAlindon *et al.*, 2007 ; Sibley, 1985 ; Strusberg *et al.*, 2002 ; Timmermans *et al.*, 2015 ; Vergés *et al.*, 2004), la vitesse du vent (Aikman, 1997 ; Cay *et al.*, 2011 ; Dorleijn *et al.*, 2014 ; Sibley, 1985 ; Timmermans *et al.*, 2015) et l'ensoleillement (Cay *et al.*, 2011 ; Dorleijn *et al.*, 2014) ont montré des résultats contradictoires (Tableau XLIX). Le nombre de patients inclus variait de 10 à 222. Parmi les différents éléments météorologiques étudiés, la pression atmosphérique a été signalée comme ayant le plus d'influence sur la douleur arthrosique et les précipitations comme ayant le moins d'effet sur l'arthrose, le soleil et la vitesse du vent étant insuffisamment analysés. Pour certains, la douleur la plus sévère est associée à des situations anticycloniques (Lawrence & Molyneux, 1968), lorsque, pour d'autres, elle est associée à des situations de basse pression (Hollander & Yeostros, 1963). Selon Amor (1992), l'arthrose est plus douloureuse par temps froid et humide que par temps chaud et sec alors que pour Ferreira *et al.*, (2016) la douleur est exacerbée lors de températures élevées.

Plusieurs limites méthodologiques sont néanmoins à noter parmi le corps des données actuelles. Ces limites comprennent : la divulgation de l'hypothèse de l'étude aux participants faussant ainsi l'estimation de la douleur, les échantillons de petites tailles ou encore les durées variables des études qui peuvent aller de un à 24 mois.

Tableau XLIX : Arthrose et variables météorologiques : revue de la littérature sur PubMed/Medline au cours des trois dernières décennies. Les critères de recherche suivant ont été utilisés : "osteoarthritis"[All Fields] AND ("weather"[All Fields] OR "meteorology"[All Fields]).

Auteurs	Durée du suivi	Patients (n)	Variables météorologiques					
			T	P	E	V	HR	PA
Sibley (1985)	1 mois	35	-	-	NA	-	-	-
Guedj & Weinberger (1990)	1 mois	24	+	+	NA	NA	-	+
Clarke & Nicholl (1991)	2 mois	53	NA	NA	NA	NA	-	-
Aikman (1997)	1 mois par saison	25	+	-	NA	+	+	+
Strusberg <i>et al.</i> (2002)	12 mois	52	+	NA	NA	NA	+	-
Wilder <i>et al.</i> (2003)	23 mois	154	-	-	NA	NA	NA	+
Vergés <i>et al.</i> (2004)	1 mois	80	-	NA	NA	NA	-	+
McAlindon <i>et al.</i> (2007)	3 mois	200	+	-	NA	NA	-	+
Cay <i>et al.</i> (2011)	8 mois	10	+	-	-	-	-	-
Brennan <i>et al.</i> (2012)	1 mois	53	-	-	NA	NA	NA	+
Dorleijn <i>et al.</i> (2014)	24 mois	222	-	-	-	-	+	+
Timmermans <i>et al.</i> (2015)	18 mois	810	+	-	NA	-	+	-
Ferreira <i>et al.</i> (2016)	3 mois	345	+	-	NA	NA	-	-

T : température ; P : précipitations ; E : ensoleillement ; V : vitesse du vent ; HR : humidité relative ; PA : pression atmosphérique ; + : corrélation positive ; - : corrélation négative ; NA : non évalué.

IV.2. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Le tissu cartilagineux vit pour et par le mouvement. La membrane synoviale sécrète le liquide synovial qui nourrit le cartilage, qui lui-même protège l'os. Les ligaments orientent le mouvement, les muscles produisent le mouvement et le mouvement est nécessaire à la vie de l'os et de l'articulation. Ainsi une détérioration de l'une des structures de l'articulation peut entraîner la détérioration des autres structures et des mécanorécepteurs présents sur ces structures. La perte ou l'endommagement des mécanorécepteurs entraîne un déficit proprioceptif à l'origine d'une altération du contrôle postural.

La douleur engendrée par l'arthrose est épisodique et bien souvent les patients rapportent que les paramètres météorologiques peuvent déclencher une exacerbation de leurs symptômes (Ng *et al.*, 2004).

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était d'étudier l'effet des facteurs météorologiques sur le contrôle de l'équilibre et le ressenti de la douleur chez les patients présentant une arthrose du genou.

Cette étude transversale impliquait le service de rhumatologie (investigatrice principale : Pr. Isabelle Chary-Valckenaere), le Centre d'Epidémiologie Clinique (directeur : Pr. Francis Guillemin) et le Laboratoire d'Analyse de la Posture, de l'Equilibration et de la Motricité (LAPEM) du CHRU de Nancy.

IV.3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

IV.3.1. Participants

Cent treize adultes âgés de 45 à 87 ans ont participé à cette étude. Le recrutement des volontaires a été effectué par l'équipe de rhumatologie du CHRU de Nancy.

Les sujets présentaient une arthrose du genou unilatérale ou bilatérale avec lésion fémoro-tibiale selon les critères présentés par le Collège Américain de Rhumatologie (Altman *et al.*, 1986). Pour participer à cette étude, les volontaires ne devaient pas présenter d'arthrose fémoro-patellaire, ne pas subir d'intervention chirurgicale sur l'articulation ou les articulations concernées par l'arthrose, devaient être indemnes de toute autre pathologie musculo-squelettique, ne pas présenter de syndrome dépressif sévère, ne pas avoir eu recours aux massages, à la physiothérapie, à la rééducation ou à l'acupuncture au cours du mois précédant l'étude. Aucun sujet ne devait avoir subi de modification dans son traitement médicamenteux au cours des cinq derniers jours pour les anti-inflammatoires non stéroïdiens, dans les dernières 24 heures pour les analgésiques, au cours du dernier mois pour l'injection intra-articulaire de corticoïdes ou au cours des trois derniers mois pour l'acide hyaluronique. L'âge, le sexe, la taille et le poids ont été enregistrés, et l'IMC a été calculé.

Cette étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes de Lorraine et l'ensemble des sujets participant à l'étude avait donné son consentement éclairé pour y participer.

IV.3.2. Mesures

IV.3.2.1. Test posturographique

Une plateforme de posturographie statique (Win-Posturo, Medicapteurs, Balma, France) a été utilisée pour réaliser les évaluations posturographiques (§III.3.3.1. Test posturographique, pp. 27-29).

Un Score Global d'Equilibre (SGE) était calculé pour chaque patient en faisant la moyenne des résultats obtenus pour la surface couverte et la longueur parcourue par le CPP dans les six conditions du test d'équilibre. Ce calcul du SGE a été adapté du Sensory Organization Test (Herpin *et al.*, 2009 ; Peultier *et al.*, 2017 ; Shumway-Cook & Horak, 1986).

IV.3.2.2. Échelle Visuelle Analogique

L'Echelle Visuelle Analogique (EVA) a été utilisée pour évaluer la douleur ressentie par les patients (§III.3.3.2. Tests d'évaluation de la récupération, pp. 32).

IV.3.2.3. Paramètres météorologiques

Les données météorologiques ont été recueillies à partir d'un site de météorologie français : « Infoclimat » (www.infoclimat.fr/). La station de mesure est située à Essey-lès-Nancy dans l'Est de la France (48,69°N, 6,22°E) à une altitude de 212 mètres. Les données météorologiques fournies par le site étaient les suivantes : températures maximale et minimale (°C), total des précipitations (mm), hauteur de pluie en une heure (mm), durée totale d'ensoleillement (h), vitesse maximale du vent (km.h⁻¹), pourcentage d'humidité maximal et minimal, pourcentage d'humidité à 12 heures, humidité moyenne, pressions atmosphériques maximale et minimale ajustées au niveau de la mer et pression atmosphérique moyenne (hPa).

IV.3.3. Méthode

IV.3.3.1. Procédure

Cette étude a été réalisée durant neuf mois consécutifs entre les mois de mars et de novembre. Les évaluations posturographiques et de la douleur ont été réalisées entre 8 h et 12 h afin de limiter les variations diurnes du contrôle postural (Zhang *et al.*, 2015) et une seule évaluation par patient a été effectuée afin d'éviter l'effet fatigue et l'apprentissage.

Les données météorologiques ont été recueillies à la fois entre 8 h et 12 h afin d'en assurer la concordance avec la période d'enregistrement du contrôle postural mais aussi sur 24 h, entre 1 h du matin du jour des mesures et 2 h du matin du jour suivant. En effet, il était supposé que les paramètres météorologiques précédant et suivant l'analyse posturographique pouvaient avoir une influence sur cette dernière ainsi que sur le ressenti de la douleur.

Les moyennes des données relatives aux précipitations, à l'humidité, à la pression atmosphérique et à la durée d'ensoleillement ont été calculées. Par ailleurs, les valeurs maximales et/ou minimales de la vitesse du vent, du pourcentage d'humidité et de la pression atmosphérique ont été enregistrées (figure 19).

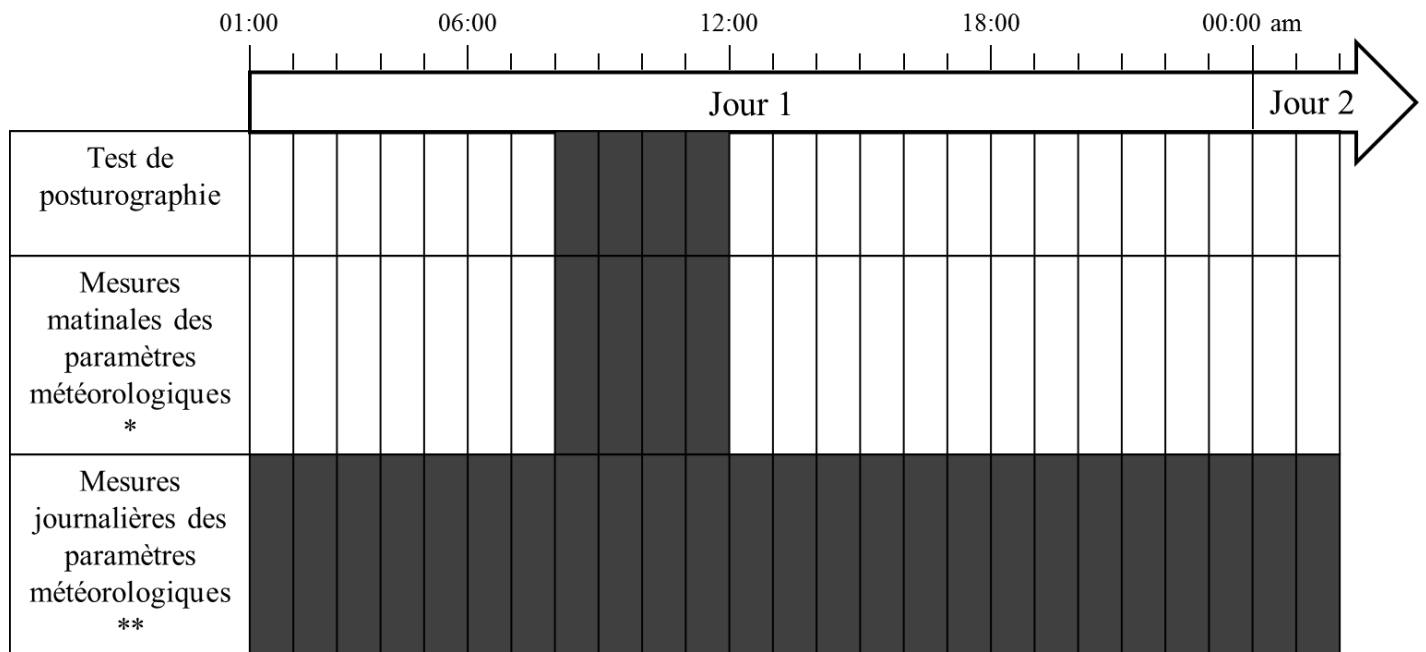


Figure 19 : Période d'enregistrement du contrôle postural et des paramètres météorologiques.

* : températures maximale et minimale, précipitations, hauteur de pluie en 1 h, vitesse du vent, humidité maximale et minimale, humidité à 12 h, pression atmosphérique ; ** : températures maximale et minimale, précipitations, ensoleillement, hauteur de pluie en 1 h, vitesse du vent, humidité maximale et humidité minimale, humidité à 12 h, pression atmosphérique.

IV.3.3.2. Analyse statistique

Plusieurs modèles ont été construits pour analyser les relations entre les données météorologiques et le contrôle postural et les données météorologiques et la douleur. Ces modèles ont été testés par des analyses de régressions multiples.

Un premier modèle (modèle 1) permettait d'évaluer la relation entre les variables principales, à savoir le SGE pour la surface couverte et la longueur parcourue par le CPP lors du test de posturographie et les variables indépendantes à l'instar des paramètres météorologiques entre 8 h et 12 h et des variables anthropométriques (âge, sexe, IMC et douleur).

Le modèle 2 était similaire au modèle 1, excepté pour les données météorologiques qui étaient enregistrées sur la journée entière.

Le modèle 3 permettait d'évaluer la relation entre la douleur et les variables indépendantes, à savoir, les paramètres météorologiques entre 8 h et 12 h et les variables anthropométriques (âge, sexe, IMC).

Enfin, le modèle 4 était similaire au modèle 3, excepté pour les paramètres météorologiques qui étaient enregistrés sur la journée entière.

Les variables ont été introduites dans les modèles selon une méthode de sélection ascendante avec $p < 0,05$. Un niveau de probabilité de $p \leq 0,05$ était considéré comme significatif. Le logiciel SPSS Statistics (IBM, Armonk, New York, USA) version 19.0 a été utilisé pour l'ensemble des analyses.

IV.4. RÉSULTATS

IV.4.1. Caractéristiques de la cohorte

La cohorte était constituée de 113 patients dont 78 femmes (69 %). L'âge médian était de 65,0 ans ($Q_1 = 59,0$; $Q_3 = 72,0$), l'IMC médian était de 29,0 ($Q_1 = 26,4$; $Q_3 = 33,0$) et le score médian de la douleur de 50,0 mm ($Q_1 = 42,0$; $Q_3 = 67,0$). Le SGE médian était de 297,83 mm² ($Q_1 = 213,4$; $Q_3 = 462,4$) pour la surface couverte par le CPP et de 439,33 mm ($Q_1 = 343,3$; $Q_3 = 615,3$) pour la longueur parcourue par le CPP. Les conditions atmosphériques mesurées au cours de la période d'étude sont présentées dans le tableau L.

Tableau L : Mesures des conditions atmosphériques sur la période de l'étude (9 mois).

	Temperature (°C)	Precipitations (mm)	Ensoleillement (h)	Hauteur de pluie en 1 h (mm)	Vitesse du vent (km.h ⁻¹)	Humidité (%)	Humidity à 12 h (%)	Pression atmosphérique (hPa)
<i><u>Matin</u></i>								
Minimum	- 0,30	0,00		0,00	13,00	39,00	39,00	1003,70
Maximum	30,00	8,50		5,70	48,20	99,00	96,00	1033,70
Moyenne ± ET	14,84 ± 7,17	0,20 ± 0,86		0,12 ± 0,56	28,20 ± 9,64	73,56 ± 6,95	62,31 ± 14,97	1019,11 ± 5,34
<i><u>Journée entière</u></i>								
Minimum	- 4,40	0,00	0,00	0,00	18,50	25,00	39,00	1002,90
Maximum	34,00	21,40	14,20	13,70	70,40	99,00	96,00	1033,70
Moyenne ± ET	15,7 ± 8,36	1,46 ± 3,27	7,16 ± 3,99	0,78 ± 1,8	40,92 ± 12,60	68,95 ± 25,81	62,31 ± 14,96	1018,47 ± 5,73

ET : écart-type

IV.4.2. Effet des paramètres météorologiques sur le contrôle postural

Plusieurs paramètres météorologiques avaient un impact sur le SGE du test de posturographie (Tableau LI). Parmi les mesures météorologiques enregistrées sur la matinée (Modèle 1), une diminution de la pression atmosphérique engendrait une augmentation du SGE pour la surface couverte ($p = 0,012$) et la longueur parcourue ($p = 0,017$) par le CPP. Une diminution de l'humidité maximale entraînait une augmentation du SGE pour la surface couverte par le CPP ($p = 0,014$). De plus, parmi les mesures enregistrées sur la journée entière (Modèle 2), une diminution de la pression atmosphérique était associée à une augmentation du SGE pour la longueur parcourue par le CPP ($p = 0,018$).

Tableau LI : Régressions linéaires multiples - paramètres météorologiques et anthropométriques relatifs aux données posturographiques (longueur parcourue et surface couverte par le centre de pression des pieds).

	Longueur parcourue par le CPP		Surface couverte par le CPP	
	B	<i>p-value</i>	B	<i>p-value</i>
Modèle 1				
Age	0,318	< 0,001	0,219	0,013
Sexe			- 0,229	0,011
Changement de pression	- 0,213	0,017	- 0,223	0,012
Humidité maximale			- 0,220	0,014
Modèle 2				
Age	0,284	0,003	0,212	0,026
Sexe			- 0,205	0,032
Changement de pression	- 0,221	0,018		

Modèle 1 : relation entre le contrôle postural, les données anthropométriques (âge, sexe, IMC et douleur) et les paramètres météorologiques enregistrés sur la matinée ; Modèle 2 : relation entre le contrôle postural, les données anthropométriques (âge, sexe, IMC et douleur) et les paramètres météorologiques enregistrés sur la journée entière ; CPP : centre de pression des pieds ; B : coefficient non standardisé

IV.4.3. Effet de l'âge et du sexe sur le contrôle postural

Une augmentation de la longueur parcourue et la surface couverte par le CPP était observée avec l'avancée en âge (Tableau VII). Dans le modèle 1, pour chaque année supplémentaire en âge, la longueur parcourue par le CPP augmentait de 10,2 mm ($p < 0,001$) et la surface couverte par le CPP de 5,9 mm² ($p = 0,013$). Dans le modèle 2, pour chaque année supplémentaire en âge, la longueur parcourue par le CPP augmentait de 9,3 mm ($p = 0,003$) et la surface couverte par le CPP augmentait de 5,9 mm² ($p = 0,026$).

Par ailleurs, l'analyse statistique a montré que la surface couverte par le CPP chez les hommes était supérieure à celle des femmes dans les modèles 1 ($p = 0,011$) et 2 ($p = 0,032$).

IV.4.4. Effet des paramètres météorologiques sur la douleur

L'intensité de la douleur différait en fonction des variations des paramètres météorologiques (Tableau LII). L'intensité de la douleur augmentait lorsque la température minimale enregistrée sur la matinée augmentait ($p = 0,027$) (Modèle 3). De même, l'intensité de la douleur augmentait lorsque l'humidité minimum ($p = 0,021$) et la température maximale ($p = 0,004$) enregistrées sur la journée entière augmentaient (Modèle 4).

Tableau LII : Régressions linéaires multiples – variables météorologiques et anthropométriques liées à la douleur.

	EVA de la douleur	
	B	<i>p-value</i>
Modèle 3		
Temperature minimale	0,208	0,027
Modèle 4		
Temperature maximale	0,298	0,004
Humidité minimale	0,238	0,021

Modèle 3 : relation entre la douleur, les variables anthropométriques (âge, sexe, IMC) et les paramètres météorologiques enregistrés le matin ; Modèle 4 : relation entre la douleur, les variables anthropométriques (âge, sexe et IMC) et les paramètres météorologiques enregistrés sur la journée entière ; EVA : Echelle Visuelle Analogique ; B : coefficient non standardisé

IV.5. DISCUSSION

Cette étude visait à évaluer l'effet des facteurs météorologiques sur le contrôle de l'équilibre et le ressenti de la douleur chez les patients présentant une arthrose du genou. Les principaux résultats de cette étude ont montré une dégradation du contrôle postural lorsque la pression atmosphérique diminuait durant la matinée correspondant à la période d'enregistrement du contrôle postural et la journée et lorsque l'humidité maximale diminuait durant la matinée correspondant à la période d'enregistrement du contrôle postural. Les autres paramètres météorologiques n'avaient pas d'influence sur le contrôle postural. Par ailleurs, indépendamment des paramètres météorologiques, le contrôle postural se dégradait avec l'avancée en âge et l'équilibre était moins bon chez les hommes comparativement aux femmes. Enfin, la douleur ressentie par les patients au niveau du genou était plus prononcée lorsque la température minimale augmentait durant la matinée correspondant à la période d'enregistrement du contrôle postural et lorsque l'humidité minimale et la température maximale augmentaient durant la journée.

Une diminution de la pression atmosphérique peut s'accompagner de raideurs au niveau de l'articulation concernée par l'arthrose et induire une augmentation de l'information nociceptive. Des changements de la pression atmosphérique peuvent aussi causer une dilatation ou une contraction transitoire des parties du corps, rendant les terminaisons nerveuses plus ou moins sensibles et pouvant générer ainsi davantage de douleur (Jamison *et al.*, 1995). En effet, en 1961, Hollander proposa un protocole en chambre expérimentale dans laquelle il pouvait contrôler la température et la pression afin de démontrer l'existence d'une météo-sensibilité. Ainsi, il montra qu'une baisse de la pression et une augmentation de l'humidité entraînaient une augmentation des sensations douloureuses. Néanmoins, ces essais ne furent réalisés que sur douze patients, sur des laps de temps très courts, durant lesquels les variations infligées semblaient suffisamment brutales pour être détectables par les sujets. D'où l'intérêt de recueillir des données objectives comme les mesures de posturographie qui réduisent les biais liés aux valeurs subjectives de la perception de la douleur. A notre connaissance, cette étude est la première à examiner la relation entre les mesures du contrôle postural et les paramètres météorologiques chez les personnes âgées souffrant d'arthrose du genou. Il a été démontré dans cette étude que l'humidité et la température ambiante engendraient une exacerbation de la douleur du genou. Cependant, la relation entre les douleurs articulaires et les facteurs climatiques est difficile à confirmer. En effet, de nombreuses études avaient déjà établi la relation de la perception de la douleur et des

changements climatiques à l'aide d'auto-questionnaires sur le ressenti de la douleur mais les valeurs ne sont pas objectives et les résultats sont contradictoires. Par exemple, Guedj & Weinberger (1990) semblent être les seuls à avoir montré les effets des précipitations sur la douleur. Pour de nombreux auteurs (Aikman 1997 ; Cay *et al.*, 2011 ; Guedj & Weinberger 1990 ; Mc Alindon *et al.*, 2007 ; Strusberg 2002) la température a un impact sur la douleur, tandis que pour d'autres (Brennan *et al.*, 2012 ; Dorleijn *et al.*, 2014 ; Sibley 1985 ; Whipple *et al.*, 1987 ; Wilder *et al.*, 2003) la température n'a pas d'effet sur la douleur. Mais il a été montré que lorsque la température diminue ou que le temps est humide, la densité de certaines parties du corps comme les os, les muscles ou les tendons peut varier, se dilater ou se contracter et augmenter ainsi la douleur (Jamison *et al.*, 1995).

La stabilité du contrôle postural diminue avec l'avancée en âge. L'avancée en âge joue un rôle important dans le développement de la gonarthrose et augmente simultanément le risque de chute. Il a été montré dans cette étude que la longueur parcourue par le CPP lors du test de posturographie augmentait avec l'avancée en âge. Cette augmentation de la longueur parcourue par le CPP peut s'expliquer par l'altération de multiples entrées sensorielles avec l'avancée en âge à l'instar du système musculo-squelettique et des capacités du système nerveux central à intégrer les informations sensorielles (Perrin *et al.*, 1997). Par ailleurs, il y a une dégradation de la proprioception du genou chez les patients âgés souffrant d'arthrose à ce niveau en comparaison à des sujets âgés appartenant à un groupe témoin et chez des participants âgés en bonne santé par rapport à des sujets plus jeunes (Altman, 1986). Les modifications structurelles dans l'articulation du genou causées par l'évolution de l'arthrose induisent des changements de la stabilité mécanique de l'articulation tibio-tarsienne (Hubbart *et al.*, 2010). En outre, la dégradation du contrôle postural avec l'avancée en âge est due à la fois à une diminution de la force musculaire des fléchisseurs de la cheville et à une diminution de la sensibilité tactile, du sens de positionnement de l'articulation et de la proprioception (Whipple *et al.*, 1987).

Des différences significatives du contrôle postural ont également été observées entre les sexes. La surface couverte par le CPP chez les hommes était plus élevée que chez les femmes signifiant que le contrôle postural était moins bon chez les hommes. En effet, d'autres études ont montré que les hommes avaient des performances posturales moins bonnes que les femmes, plus particulièrement chez les sujets âgés dans le cas de conflits visio-vestibulaires (Faraldo-Garcia *et al.*, 2011 ; Matheson *et al.*, 1999). Les études futures devraient analyser l'effet combiné du sexe, du poids et de la taille. En effet, Hue *et al.*, (2007) ont montré que la diminution de la stabilité posturale était fortement corrélée à une augmentation du poids

corporel alors que Olchowik *et al.*, (2014) ont montré que plus les sujets étaient de petite taille et l'IMC faible, moins l'équilibre était performant.

Plusieurs limites à cette étude doivent être notifiées. D'une part cette étude se déroule sur un seul site géographique limitant les variabilités géographiques et météorologiques. Cette étude a été menée dans une région où il y a majoritairement des plaines, dans laquelle les variations atmosphériques sont moindres en comparaison à une région montagneuse. Des différences significatives du contrôle postural ont toutefois pu être observées en fonction des variations de la pression atmosphérique alors que ces variations atmosphériques sont faibles donc moins perceptibles par le patient. D'autre part, cette étude ne tient pas compte de la pratique d'activités physiques et sportives du temps de repos et du temps d'exposition au milieu extérieur. En effet, les patients plus actifs physiquement sollicitent davantage leurs articulations ce qui peut favoriser la survenue de la douleur. De même, un maintien au domicile durant les fortes périodes de froid ou de chaleur limiterait les effets que pourraient engendrer de telles expositions, expliquant que la température est corrélée à la douleur (paramètre subjectif) mais pas aux valeurs posturographiques (paramètre objectif). Ainsi, durant ces températures extrêmes extérieures, l'effet pourrait se manifester uniquement chez les personnes qui s'aventurent en extérieur (Mc Alindon *et al.*, 2007).

IV.6. CONCLUSION

L'association entre le contrôle postural et les variations de la pression atmosphérique et de l'humidité suggère que les conditions météorologiques affectent le contrôle de l'équilibre des patients souffrant d'une arthrose du genou. De plus, les résultats ont montré que les variations de l'humidité et de la température avaient une influence sur le ressenti de la douleur. Il y aurait donc un effet notable des paramètres météorologiques à la fois sur le contrôle postural et la douleur chez les patients présentant une arthrose du genou. Une meilleure connaissance des relations existantes entre les paramètres météorologiques et les symptômes de l'arthrose pourrait aider les patients à mieux gérer leurs activités quotidiennes et les professionnels de santé à mieux comprendre les modifications du contrôle postural et de la douleur.

V. DISCUSSION GÉNÉRALE

Le but de ce travail était de déterminer les facteurs prédictifs de la qualité du contrôle postural et de sa compensation dans les pathologies traumatiques et dégénératives du genou. Les objectifs spécifiques de cette thèse étaient d'une part de montrer la supériorité d'un protocole de rééducation innovant combinant une rééducation conventionnelle réduite avec une rééducation en milieu aquatique par rapport à un protocole de rééducation conventionnel en terme de cinétique de récupération des capacités proprioceptives et des capacités fonctionnelles et en terme de diminution de la douleur chez des patients opérés d'une rupture du LCA et d'autre part de montrer l'influence des paramètres météorologiques sur le contrôle postural et la douleur chez les patients souffrant d'arthrose du genou.

Le maintien d'un contrôle postural efficace et adapté aux contraintes internes et externes est indispensable pour se déplacer, réaliser les tâches de la vie quotidienne, travailler, ou encore, pratiquer une activité physique et sportive. La faculté d'orientation, c'est-à-dire la capacité à diriger une activité en fonction de la disposition du monde extérieur, suppose l'existence de trois systèmes : un système « sensoriel » capable de détecter la direction et les variations locales d'un champ, un système « effecteur » capable de diriger l'activité ou le développement de l'organisme dans une direction donnée, et un système de contrôle régulant l'activité du système effecteur en fonction des messages fournis par le système sensoriel (Perrin & Lestienne, 1994). Bien que le système sensoriel soit composé de trois récepteurs différents, système visuel, système vestibulaire et système somesthésique, la mauvaise fonctionnalité de l'un d'entre eux suffit pour perturber le contrôle postural. Par exemple, dans le cas d'une rupture du LCA et donc d'une détérioration des afférences somesthésiques, le contrôle postural est altéré en comparaison au contrôle postural de sujets sains (Dauty *et al.*, 2010 ; Lysholm *et al.*, 1998 ; O'Connell *et al.*, 1998 ; Perrot *et al.*, 2000). Notre étude a montré qu'une rééducation combinant rééducation en milieu aquatique et rééducation à sec apportait de meilleurs résultats sur la récupération de la force musculaire, sur la performance de marche, sur l'utilisation de la somesthésie ou encore sur la récupération de la proprioception qu'une rééducation conventionnelle réalisée à sec. Par ailleurs, la combinaison de deux modes de rééducation semble plus efficace qu'une rééducation en milieu aquatique seule pour le regain de la force musculaire (Tovin *et al.*, 1994). Une meilleure prise en charge rééducative après ligamentoplastie du genou permettrait d'éviter une asymétrie musculaire, qui favorise le risque de récidence ou l'arthrose. En effet, il a été montré que la rupture du LCA est associée à un risque d'arthrose du genou malgré la reconstruction chirurgicale (Barenius *et al.*, 2014 ; Roos *et al.*, 1995). En effet, le développement de l'arthrose est 3,62 fois plus important après reconstruction du LCA que chez les sujets sains alors que ce risque est de

4,98 chez les patients souffrant d'une rupture du LCA non opérée (Ajuied *et al.*, 2014). Néanmoins, cette affirmation est soumise à controverse. Alors que plusieurs études ont montré que la reconstruction chirurgicale du LCA jouait un rôle préventif dans le développement de l'arthrose sans pour autant l'empêcher (Ajuied *et al.*, 2014 ; Lin *et al.*, 2017 ; Sanders *et al.*, 2016) d'autres ont affirmé que la reconstruction du LCA ne réduisait pas le risque de développement de l'arthrose (Simon *et al.*, 2015 ; Tsoukas *et al.*, 2016). La présence de lésions associées à la rupture du LCA représente un facteur clé dans le développement de l'arthrose du genou (Blalock *et al.*, 2015 ; Keays *et al.*, 2010 ; Li *et al.*, 2011 ; Meunier *et al.*, 2007) tout comme la faiblesse du quadriceps (Grindem *et al.*, 2016). En effet, 80 % des sujets opérés d'une rupture du LCA avec lésion méniscale ou chondrale développent une gonarthrose 10 à 15 ans après la lésion contre seulement 62 % des sujets avec rupture isolée et traités par reconstruction chirurgicale (Oiestad *et al.*, 2010).

A travers la deuxième étude qui visait à analyser l'influence des paramètres météorologiques sur le contrôle postural et la douleur des patients présentant une gonarthrose, nous avons montré que les facteurs intrinsèques n'étaient pas les seuls à perturber le contrôle postural et à augmenter la douleur chez les patients souffrant d'arthrose. Certains facteurs environnementaux comme la pression atmosphérique, l'humidité et la température influencent également le contrôle de l'équilibre et la douleur (Peultier *et al.*, 2017). Il semble donc important de prendre en compte tous les paramètres intrinsèques ou extrinsèques (Gauchard *et al.*, 2001a) qui peuvent influencer sur le contrôle de l'équilibre et de la douleur afin de mieux gérer les pics de douleur et de mieux contrôler cette pathologie dégénérative. En tenant compte de ces facteurs, il s'agirait de proposer des nouveaux moyens thérapeutiques peu onéreux quand on sait que le coût d'une arthroplastie s'élève à 11 600 euros. Retarder la chirurgie ou y entrer dans de meilleures conditions permettrait d'avoir de meilleurs résultats à long terme et réduire ainsi les coûts indirects de santé. Ceci est d'autant plus important que certains moyens thérapeutiques moins onéreux ne sont plus remboursés. C'est le cas, par exemple, des injections d'acide hyaluronique depuis le 1^{er} juin 2017 pour cause de service rendu insuffisant (www.vidal.fr/ ; www.legifrance.gouv.fr/). Ces déremboursements pourront être à l'origine d'insatisfactions, d'une réduction de la qualité de vie et donc, à plus long terme, de coûts médicamenteux.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un contrôle postural déficitaire est l'un des risques majeurs d'instabilité dans les pathologies traumatiques et dégénératives du genou. Les résultats recueillis au cours de ce projet ont permis de démontrer, i) qu'une rééducation innovante combinant rééducation conventionnelle réduite et rééducation en milieu aquatique avait un impact positif sur la récupération chez les sportifs opérés d'une rupture du ligament croisé antérieur et ii) que les paramètres météorologiques influençaient le contrôle postural et la douleur dans l'arthrose du genou. La mise en place d'une rééducation optimale dans la rupture du ligament croisé antérieur est indispensable pour en tirer les meilleurs bénéfices, en particulier, sur la fonction d'équilibration et sa compensation. Par ailleurs, la prise en compte des paramètres météorologiques permettra d'anticiper la survenue des troubles de l'équilibre et de la douleur dans l'arthrose du genou. Ainsi, l'environnement dans lequel évolue le sujet (ex : milieu aquatique, ambiance climatique) a donc une influence sur la performance du contrôle postural.

La prise en compte des capacités adaptatives du contrôle postural pourrait permettre une meilleure prise en charge des pathologies traumatiques et dégénératives du genou et ainsi réduire les répercussions humaines et financières. Par conséquent, les facteurs prédictifs de la qualité du contrôle postural et de son adaptation visant à améliorer la récupération des patients opérés d'une rupture ligament croisé antérieur et à réduire l'impact de la gonarthrose sur le contrôle de l'équilibre devraient être davantage considérés par les patients et les professionnels de santé.

La connaissance d'un tel programme de rééducation après rupture du ligament croisé antérieur devra être approfondie afin d'en connaître les répercussions à long terme sur la survenue de l'arthrose du genou et notamment un éventuel recul de l'apparition de l'arthrose.

VII.RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Abdel Kafi S, Deboeck G.** Le test de marche de six minutes en réhabilitation respiratoire. *Rev Mal Respi*, 2005; 22: pp. 5.
- **Académie Nationale de Médecine** - Rapport sur la demande d'avis relatifs à l'autorisation pour la communauté urbaine du Grand Nancy d'exploiter une eau minérale naturelle pour l'alimentation en eaux d'un centre thermal au titre de l'article L 1322-1 du code de la santé publique. Disponible sur : <http://www.academie-medecine.fr/wp-content/uploads/2014/06/Rapport-FINAL-NANCY-2014.pdf>
- **Adachi N, Ochi M, Uchio Y, Iwasa J, Ryoke K, Kuriwaka M.** Mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament contribute to the joint position sense. *Acta Orthop Scand*, 2002; 73(3):330-4. doi:10.1080/000164702320155356
- **Ageberg E.** Consequences of a ligament injury on neuromuscular function and relevance to rehabilitation – using the anterior cruciate ligament-injured knee as model. *J Electromyogr Kinesiol*, 2002; 12(3):205-212.
- **Aikman H.** The association between arthritis and the weather. *Int J Biometeorol*, 1997; 40(4):192–199.
- **Ajuied A, Wong F, Smith C, Norris M, Earnshaw P, Back D, Davies A.** Anterior cruciate ligament injury and radiologic progression of knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med*, 2014, 42(9):2242-52. doi: 10.1177/0363546513508376.
- **Alidrissi N, Elyaacoubi M, Berrada MS, Elbardouni A, Mahfoud M, Dahmani O, Eljamri M.** Ligamentoplastie du LCA aux ischiojambiers sous arthroscopie avec fixation de l'implant par le système TLS. Principes et résultats de 38 cas. *Journal de Traumatologie du Sport*, 2011; 28:159-164.
- **Altman R, Asch E, Bloch D, Bole G, Borenstein D, Brandt K, Christy W, Cooke TD, Greenwald R, Hochberg M, et al.** Development of criteria for the classification and reporting of osteoarthritis. Classification of osteoarthritis of the knee. Diagnosis and therapeutic criteria committee of the American rheumatism association. *Arthritis Rheum*, 1986; 29(8):1039–1049.
- **Amor B.** Les rhumatismes. *Hermann, Presses Universitaire de France, Paris*, 1992 ; pp. 128.
- **Arms SW, Pope MH, Johnson RJ, Fischer RA, Arvidsson I, Eriksson E.** The biomechanics of anterior cruciate ligament rehabilitation and reconstruction. *Am J Sports Med*, 1984; 12(1):8-18.

- **Baqué P, Maes B.** Manuel pratique d'anatomie. *Editions Ellipses*, 2008 ; pp. 583.
- **Barenius B, Ponzer S, Shalabi A, Bujak R, Norlén L, Eriksson K.** Increased risk of osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction. A 14-year follow-up study of a randomized controlled. *Am J Sports Med*, 2014;42(5):1049-1057. doi: 10.1177/0363546514526139
- **Barrack RL, Skinner HB, Buckley SL.** Proprioception in the anterior cruciate deficient knee. *Am J Sports Med*, 1989;17(1):1-6. doi:10.1177/036354658901700101
- **Beard DJ, Dodd CA.** Home or supervised rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *J Orthop Phys Ther*, 1998; 27(2):134-143. doi:10.2519/jospt.1998.27.2.134
- **Becker BE.** Aquatic Therapy: Scientific Foundations and Clinical Rehabilitation Applications. *PMR*, 2009; 1: 859-872. doi: 10.1016/j.pmrj.2009.05.017
- **Berger L, Martinie P, Livain T, Bergeau J, Rougier P.** Effets immédiats de séances de rééducation des membres inférieurs par balnéothérapie sur le contrôle de l'équilibre. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 2006; 49 : 37-43. doi : 10.1016/j.annrmp.2005.08.003
- **Berthoz A.** Le sens du mouvement. *Editions Odile Jacob*, 2008 ; pp. 345.
- **Bicer EK, Lustig S, Servien E, Selmi TAS, Neyret P.** Current knowledge in the anatomy of the human anterior cruciate ligament. *Knee Surg Traumatol Arthrosc*, 2010; 18:1075-1084. doi: 10.1007/s00167-009-0993-8.
- **Bijlsma JW, Berenbaum F, Lafeber FP.** Osteoarthritis: an update with relevance for clinical practice. *Lancet*, 2011; 377(9783):2115-2126. doi: 10.1016/S0140-6736(11)60243-2
- **Bioulac B, Burbaud P, Cazalets JR, Gross C.** Fonctions motrices. *EMC-Neurologie*, 2004; 1:277-329.
- **Blalock D, Miller A, Tilley M, Wang J.** Joint instability and osteoarthritis. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord*, 2015; 18(8):15-23. doi: 10.4137/CMAMD.S22147
- **Bonfim TR, Jansen Paccola CA, Barela JA.** Proprioceptive and Behavior Impairments in Individuals With Anterior Cruciate Ligament Reconstructed Knees. *Arch Phys Med Rehabil*, 2003; 84:1217-1223.
- **Borsa PA, Lephart SM, Irrgang JJ, Safran MR, Fu FH.** The effects of joint position and direction of joint motion on proprioceptive sensibility in anterior cruciate ligament

deficient athletes. *Am J Sports Med*, 1997; 25(2):336-340. doi:10.1177/036354659702500311

- **Bouët V, Gahéry Y.** Muscular exercise improves knee position sense in humans. *Neurosci Lett*, 2000; 289:143-146.
- **Boulangé M, Ruscade-Cholay S.** Nancy Thermal : passé, présent et future d'une station thermal urbaine. *Press Therm Climat*, 2012; 149; 67-75.
- **Boureau F, Luu M.** Les méthodes d'évaluation de la douleur Clinique. *Doul et Analg*, 1988; 1(2):65-73.
- **Brasileiro JS, Pinto OM, Avila MA, Salvini TF.** Functional and morphological changes in the quadriceps muscle induced by eccentric training after ACL reconstruction. *Rev Bras Fisioter*, 2011; 15(4):284-290.
- **Brennan SA, Harney T, Queally JM, McGoona JO, Gormley IC, Shannon FJ.** Influence of weather variables on pain severity in endstage osteoarthritis. *Int Orthop*, 2012; 36(3):643–646. doi: 10.1007/s00264-011-1304-9
- **Brewster CE, Moynes Schwab DR, Jobe FW.** Rehabilitation for anterior cruciate reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1983; 5(3):121-126.
- **Buckwalter JA, Rosenberg LC.** Electron microscopic studies of cartilage proteoglycans. *Electron Microsc Rev*, 1988; 1:87-112.
- **Cabuk H, Kuskü Cabuk F.** Mechanoreceptors of the ligaments and tendons around the knee. *Clin Anat*, 2016;29(6):789-795. doi: 10.1002/ca.22743
- **Carter ND, Jenkinson TR, Wilson D, Jones DW, Torode AS.** Joint position sense and rehabilitation in the anterior cruciate ligament deficient knee. *Br J Sports Med*, 1997; 31:209-212.
- **Cay HF, Sezer I, Firat MZ, Kaçar C.** Which is the dominant factor for perception of rheumatic pain: meteorology or psychology? *Rheumatol Int*, 2011; 31(3):377–385. doi: 10.1007/s00296-009-1279-7
- **Chatrenet Y.** Evaluations Clinique et fonctionnelle du genou. *EMC, Kinésithérapie, Médecine physique, Réadaptation*, 2013 ; 9(1):1-17.
- **Chevallier J.** La cure thermale à Aix-lès-Bains vue par un rhumatologue parisien. *La Presse thermale et climatique*, 2004 ; 141 : 91-97.
- **Chevutschi A, Dengremont B, Lensel G, Thevenon A.** La balnéothérapie au sein de la littérature : propriété de l'eau. *Kinesither Rev*, 2007; 70:14-20.

- **Chiarovano E, de Waele C, MacDougall HG, Rogers SJ, Burgess AM, Curthoys IS.** Maintening balance when looking at a virtual reality scene. *Front Neurol*, 2015;6:164. doi: 10.3389/fneur.2015.00164
- **Cicuttini FM, Spector TD.** Osteoarthritis in the aged. Epidemiological issues and optimal management. *Drugs Aging*, 1995;6:409-420.
- **Clarke AM, Nicholl J.** Does the weather affect the osteoarthritic patient? *Br J Rheumatol*, 1991; 30(6):477.
- **Collette M, Cassard X.** The Tape Locking Screw technique (TLS): A new ACL reconstruction method using a short hamstring graft. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2011; 97:555-559. doi: 10.1016/j.otsr.2011.03.016
- **Cooper C, McAlindon T, Snow S, Vines K, Young P, Kirwan J, Dieppe P.** Mechanical and constitutional risk factors for symptomatic knee osteoarthritis: differences between medial tibiofemoral and patellofemoral disease. *J Rheumatol*, 1994; 21:307-313.
- **Corrigan JP, Cashman WF, Brady MP.** Proprioception in the cruciate deficient knee. *J Bone Joint Surg*, 1992; 74-B:247-250.
- **Cowan DJ.** Reconstruction of the anterior cruciate ligament by the method of Kenneth Jones (1963). *Proc R Soc Med*, 1965; 58(5):336-338.
- **Dauty M, Collon S, Dubois C.** Change in posture control after recent knee anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2010; 30:187-191. doi: 10.1111/j.1475-097X.2010.00926.x
- **Davies GJ.** A compendium of isokinetics in clinical usage and rehabilitation techniques. *La Crosse*, 4th Edition, 1992; pp. 598.
- **De Peretti F, Berthe A, Lacroix R, Bourgeon A.** Anatomie fonctionnelle des ligaments et ménisques du compartiment latéral de l'articulation fémoro-tibiale dans les mouvements de rotation. *Ann Kinésithér*, 1983 ; 10(6) : 203-207.
- **Dhillon MS, Bali K, Prabhakar S.** Proprioception in anterior cruciate ligament deficient knees and its relevance in anterior cruciate ligament reconstruction. *Indian J Orthop*, 2011; 45(5):294-300. doi: 10.4103/0019-5413.80320
- **Dingenen B, Janssens L, Luycks T, Claes S, Bellemans J, Staes FF.** Postural stability during the transition from double-leg stance to single-leg stance in anterior cruciate ligament injured subjects. *Clin Biomech*, 2015 Mar;30(3):283-9. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2015.01.002

- **Domnick C, Rascke MJ, Herbort M.** Biomechanics of the anterior cruciate ligament: physiology, rupture and reconstruction techniques. *World J Orthop*, 2016;7(2):82-93. doi: 10.5312/wjo.v7.i2.82
- **Dorleijn DMJ, Luijsterburg PAJ, Burdorf A, Rozendaal RM, Verhaar JAN, Bos PK, Bierma-Zeinstra SM.** Associations between weather conditions and clinical symptoms in patients with hip osteoarthritis: a 2-year cohort study. *Pain*, 2014; 155(4):808–813. doi: 10.1016/j.pain.2014.01.018
- **Dragicevic-Cvjetkovic D, Jandric S, Bijeljic S, Palija S, Manojlovic S, Talic G.** The effects of rehabilitation protocol on functional recovery after anterior cruciate ligament reconstruction. *Med Arch*, 2014; 68(5):350-352. doi: 10.5455/medarh.2014.68.350-352
- **Dufour M, Pillu M.** Biomécanique fonctionnelle : Membres, Tête, Cou. *Masson*, 2007; pp. 568.
- **Dupui PH, Montoya R, Lacour M.** Approche physiologique des analyses posturographiques statique et dynamique. *Posture et équilibre, Solal éditeur*, 2003 ; 13-29.
- **Duthon VB, Barea C, Abrassart S, Fasel JH, Fritschy D, Ménétrey J.** Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006; 14:204-213. doi: 10.1007/s00167-005-0679-9
- **Era P, Heikkinen E.** Postural sway during standing and unexpected disturbance of balance in random samples of men of different ages. *J Gerontol*, 1985;40:287-295.
- **Ernst GP, Saliba E, Diduch DR, Hurwitz SR, Ball DW.** Lower extremity compensations following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther*, 2000; 80(3):251-260.
- **Fanelli GC, Beck JD, Edson CJ.** Current concepts review: The Posterior Cruciate Ligament. *J Knee Surg*, 2010; 23(2):61-72.
- **Faraldo-Garcia A, Santos-Pérez S, Labella-Caballero T, Soto-Varela A.** Influence of gender on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Acta Otorinolaringol*, 2011; 62(6): 333–338. doi: 10.1016/j.otorri.2011.03.003
- **Felson DT.** An update on the pathogenesis and epidemiology of osteoarthritis. *Radiol Clin North Am*, 2004; 42(1):1-9. doi: 10.1016/S0033-8389(03)00161-1
- **Fernandes TL, Felix EC, Bessa F, Luna NM, Sugimoto D, Greve JM, Hernandez AJ.** Evaluation of static and dynamic balance in athletes with anterior cruciate ligament

injury - A controlled study. *Clinics (Sao Paulo)*, 2016;71(8):425-9. doi: 10.6061/clinics/2016(08)03

- **Ferreira ML, Zhang Y, Metcalf B, Makovey J, Bennell KL, March L, Hunter DJ.** The influence of weather on the risk of pain exacerbation in patients with knee osteoarthritis – a case-crossover study. *Osteoarthritis and cartilage*, 2016; 24(12):2042-2047. doi: 10.1016/j.joca.2016.07.016
- **Figueiredo ECQ, Figueiredo GC, Dantas RT.** Influence of meteorological elements on osteoarthritis pain: a review of the literature. *Rev Bras Reumatol*, 2011; 51(6):616–628
- **Fischer-Rasmussen T, Jensen PE.** Proprioceptive sensitivity and performance in anterior cruciate ligament-deficient knee joints. *Scand J Med Sci Sports*, 2000; 10:85-89.
- **Fox AJ, Wanivenhaus F, Burge AJ, Warren RF, Rodeo SA.** The human meniscus: a review of anatomy, function, injury, and advances in treatment. *Clin Anat*, 2015; 28(2):269-87. doi: 10.1002/ca.22456
- **Friemert B, Bach C, Schwarz W, Gerngross H, Schmidt R.** Benefits of active motion for joint sense. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006; 14:564-570. doi: 10.1007/s00167-005-0004-7
- **Fromm B, Kummer W.** Nerve supply of anterior cruciate ligaments and of cryopreserved anterior cruciate ligament allografts: A new method for differentiation of the nervous tissues. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 1994; 2:118-122.
- **Gauchard GC, Chau N, Mur JM, Perrin P.** Falls and working individuals: role of extrinsic and intrinsic factors. *Ergonomics*, 2001a; 44:1330-1339. DOI: 10.1080/00140130110084791
- **Gauchard GC, Gangloff P, Jeandel C, Perrin P.** Influence of regular proprioceptive and bioenergetic physical activities on balance control in elderly women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2003;58:M 846-850.
- **Gauchard GC, Jeandel C, Perrin P.** Physical and sporting activities improve vestibular afferent usage and balance in elderly human subjects. *Gerontology*, 2001b; 47(5):263-270. doi: 52810
- **Gauchard GC, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin P.** On the role of knee joint in balance control and posture strategies: Effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait & Posture*, 2010; 32(2):155-160. doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.04.002

- **Godinho P, Nicoliche E, Cossich V, de Sousa EB, Velasques B, Salles JI.** Proprioceptive deficit in patients with complete tearing of the anterior cruciate ligament. *Rev Bras Ortop*, 2014; 49(6):613-618. doi: 10.1016/j.rboe.2014.10.007
- **Golland A.** Basic hydrotherapy. *Physiotherapy*, 1981;67(9):258-262.
- **Good L, Roos H, Gottfried DJ, Rentröm PA, Beynnon BD.** Joint position sense is not changed after acute disruption of the anterior cruciate ligament. *Acta Orthop Scand*, 1999; 70(2):194-198.
- **Grassi A, Smiley SP, Roberti di Sarsina T, Signorelli C, Marcheggiani Muccioli GM, Bondi A, Romagnoli M, Agostini A, Zaffagnini.** Mechanisms and situations of anterior cruciate ligament injuries in professional male soccer players: a YouTube-based video analysis. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2017. doi: 10.1007/s00590-017-1905-0.
- **Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA.** Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med*, 2016;50:804-808. doi:10.1136/bjsports-2016-096031
- **Guedj D, Weinberger A.** Effect of weather conditions on rheumatic patients. *Ann Rheum Dis*, 1990; 49(3):158–159.
- **Halata Z, Wagner C, Baumann KI.** Sensory nerve endings in the anterior cruciate ligament of sheep. *Anat Rec*, 1999; 254:13-21.
- **Halewood C, Amis AA.** Clinically relevant biomechanics of the knee capsule and ligaments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015; 23:2789-2796. doi: 10.1007/s00167-015-3594-8
- **Hamerman D.** The biology of osteoarthritis. *N Engl J Med*, 1989; 320:1322-1330. doi: 10.1056/NEJM198905183202006
- **Harris.** Seasonal variation in depression and osteoarthritis. *J R Coll Gen Pract*, 1984; 34(265):436-439.
- **Harrison EL, Duenkel N, Dunlop R, Russell G.** Evaluation of single-leg standing following anterior cruciate ligament surgery and rehabilitation. *Phys Ther*, 1994;74(3):245-252.
- **Haute Autorité de Santé (HAS).** Critères de suivi en rééducation et d'orientation en ambulatoire ou en SSR après ligamentoplastie du croisé antérieur du genou. *Service*

recommandations professionnelles, Service Evaluation médico-économique, 2008a; pp. 85.

- **Haute Autorité de Santé (HAS).** Prise en charge thérapeutique des lésions méniscales et des lésions isolées du ligament croisé antérieur du genou chez l'adulte. *Service des bonnes pratiques professionnelles, 2008b; pp. 105.*
- **Hassan B, Mockett S, Doherty M.** Static postural sway, proprioception, and maximal voluntary quadriceps contraction in patients with knee osteoarthritis and normal control subjects. *Ann Rheum Dis, 2011; 60(6):612–618.*
- **Hefti F, Müller W, Jakob RP, Stäubli HU.** Evaluation of knee ligament injuries with IKDC form. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 1993;1(3-4):226-234.*
- **Henriksson M, Ledin T, Good L.** Postural control after ACL reconstruction and functional rehabilitation. *Am J Sports Med, 2001; 29(3):359-366. doi: 10.1177/03635465010290031801*
- **Herpin G, Gargouri I, Gauchard GC, Nisse C, Khadhraoui M, Elleuch B, Zmirou-Navier D, Perrin P.** Effect of chronic and subchronic organic solvents exposure on balance control of workers in plant manufacturing adhesive materials. *Neurotox Res, 2009; 15:179-186. doi: 10.1007/s12640-009-9018-0*
- **Hislop H, Montgomery J.** Le bilan musculaire de Daniels & Worthingham, techniques de testing manuel. *Elsevier Masson, 2011; pp. 488.*
- **Hochberg MC.** Mortality in osteoarthritis. *Clin Exp Rheumatol, 2008; 26(5 Suppl 51):S120-124.*
- **Hollander JL.** The controlled-climate chamber for study of the effects of meteorological changes on human diseases. *Trans N Y Acad Sci, 1961; 24:167–172.*
- **Hollander JL, Yeostros SJ.** The effect of simultaneous variations of humidity and barometric pressure on arthritis. *Bull Am Met Soc, 1963; 44: 489–494.*
- **Horak FB, Nashner LM.** Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *J Neurophysiol, 1986; 55(6):1369-1381.*
- **Hubbard TJ, Hicks-Little C, Cordova M.** Changes in ankle mechanical stability in those with knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil, 2010; 91(1):73–77. doi: 10.1016/j.apmr.2009.09.015*
- **Hue O, Simoneau M, Marcotte J, Berrigan F, Doré J, Marceau P, Marceau S, Tremblay A, Teasdale N.** Body weight is a strong predictor of postural stability. *Gait Posture, 2007; 26(1):32-38.*

- **Hunter DJ, Felson DT.** Osteoarthritis. *BMJ*, 2006; 332(7542):639-642. doi: 10.1136/bmj.332.7542.639
- **Hurley MV, Scott DL, Rees J, Newham DJ.** Sensorimotor changes and functional performance in patients with knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*, 1997; 56(11):641-648.
- **Huskisson EC.** Measurement of pain. *Lancet*, 1974; 2(7889):1127-1131.
- **Infoclimat - La météo en temps réel.** Disponible sur : www.infoclimat.fr
- **Jamison RN, Anderson KO, Slater MA.** Weather changes and pain: perceived influence of local climate on pain complaint in chronic pain patients. *Pain*, 1995; 61(2):309-315
- **Järvinen M, Natri A, Laurila S, Kannus P.** Mechanisms of anterior cruciate ligament ruptures in skiing. *Knee Surg Sport Traumatol Arthroscopy*, 1994; 2:224-228.
- **Johansson H, Sjölander P, Sojka P.** Receptors in the knee joint ligaments and their role in the biomechanics of the joint. *Crit Rev Biomed Eng*, 1991;18(5):341-368.
- **Jones KG.** Reconstruction of the anterior cruciate ligament. A technique using the central one-third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am*, 1963;45:925-932.
- **Keays SL, Newcombe PA, Bullock-Saxton JE, Bullock MI, Keays AC.** Factors involved in the development of osteoarthritis after anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*, 2010; 38(3):455-463. doi: 10.1177/0363546509350914
- **Kemoun G, Watelain E, Carette P.** Hydrokinésithérapie. *EMC (Elsevier SAS, Paris), Kinésithérapie-Médecine physique-Réadaptation*, 2006 ; 26-140-A-10 : pp. 28.
- **Keshner EA, Allum JHJ, Pfaltz CR.** Postural coactivation and adaptation in the sway stabilizing responses of normals and patients with bilateral vestibular deficit. *Exp Brain Res*, 1987; 69:77-92.
- **Kim HJ, Lee JH, Lee DH.** Proprioception in patients with anterior cruciate ligament tears. *Am J Sports Med*, 2016a. doi: 10.1177/0363546516682231.
- **Kim HJ, Lee JH, Ahn SE, Park MJ, Lee DH.** Influence of Anterior Cruciate Ligament Tear on Thigh Muscle Strength and Hamstring-to-Quadriceps Ratio: A Meta-Analysis. *PLoS One*, 2016b;11(1):e0146234. doi: 10.1371/journal.pone.0146234
- **Kobayashi H, Kanamura T, Koshida S, Miyashita K, Okado T, Shimizu T, Yokoe K.** Mechanisms of the anterior cruciate ligament injury in sports activities: A twenty-year clinical research of 1,700 athletes. *J Sports Sci Med*, 2010; 9: 669-675.
- **Kunz R, Oxman AD.** The unpredictability paradox: review of empirical comparisons of randomized and non-randomized clinical trials. *BMJ*, 1998; 317:1185-1190.

- **Lane RE.** Physiotherapy in the treatment of balance problems. *Physiotherapy*, 1969;55(2):415-420.
- **Lawrence JS, Molyneux M.** Degenerative joint disease among populations in Wensleydale, England and Jamaica. *Int J Biometeor*, 1968, 12(2):163–175.
- **Lee HM, Cheng CK, Liao JJ.** Correlation between proprioception, muscle strength, knee laxity and dynamic standing balance in patients with chronic anterior cruciate ligament deficiency. *The knee*, 2009; 16:387-391. doi: 10.1016/j.knee.2009.01.006
- **Legifrance.** Arrêté du 24 mars 2017 portant radiation de produits au titre I de la liste des produits et prestations remboursables prévue à l'article L. 165-1 du code de la sécurité sociale. Disponible sur : www.legifrance.gouv.fr
- **Li RT, Lorenz S, Xu Y, Harner CD, Fu FH, Irrgang JJ.** Predictors of radiographic knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*. 2011;39(12):2595-2603. doi: 10.1177/0363546511424720
- **Lion A, Spada RS, Bosser G, Gauchard GC, Anello G, Bosco P, et al.** Biological determinants of postural disorders in elderly women. *Int J Neurosci*, 2013;123(1): 24–30; doi: 10.3109/00207454.2012.722570.
- **Lin SH, Wang TC, Lai CF, Tsai RY, Yang CP, Wong CS.** Association of anterior cruciate ligament injury with knee osteoarthritis and total knee replacement: A retrospective cohort study from the Taiwan National Health Insurance Database. *PLoS One*, 2017;12(5):e0178292. doi: 10.1371/journal.pone.0178292
- **Liu-Ambrose T, Taunton JE, MacIntyre D, McConkey P, Khan KM.** The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee: a randomized clinical trial. *Scand J Med Sci Sports* 2003; 13:115-123.
- **Lorentzen JS, Petersen MM, Brot C, Madsen OR.** Early changes in muscle strength after total knee arthroplasty: a 6-month follow-up of 30 knees. *Acta Orthop Scand*, 1999;70(2):176-179.
- **Lysholm M, Ledin T, Odkvist LM, Good L.** Postural control: a comparison between patients with chronic anterior cruciate ligament insufficiency and healthy individuals. *Scand J Med Sci Sports*, 1998; 8(6):432-438.
- **Matheson AJ, Darlingtona CL, Smith PF.** Further evidence for age-related deficits in human postural function. *J Vestib Res*, 1999; 9(4):261–264.
- **Mazières B.** Généralités sur l'arthrose. *Guide pratique de rhumatologie*, 2002; 229-331.

- **McAlindon T, Formica M, Schmid CH, Fletcher J.** Changes in barometric pressure and ambient temperature influence osteoarthritis pain. *Am J Med*, 2007; 120(5):429–434. doi: 10.1016/j.amjmed.2006.07.036
- **Medicapeurs** – Podologie, Posturologie, Rééducation. Disponible sur : www.medicapeurs.fr
- **Meunier A, Odensten M, Good L.** Long-term results after primary repair or non-surgical treatment of anterior cruciate ligament rupture: a randomized study with a 15-year follow-up. *Scand J Med Sci Sports*, 2007;17(3):230-237. doi: 10.1111/j.1600-0838.2006.00547.x
- **Missaoui B, Portero P, Bendaya S, Hanktie O, Thoumie P.** Posture and equilibrium in orthopedic and rheumatologic diseases. *Clinical Neurophysiology*, 2008; 38:447-457. doi: 10.1016/j.neucli.2008.09.004
- **Mow VC, Ratcliffe A, Poole AR.** Cartilage and diarthrodial joints as paradigms for hierarchical materials and structures. *Biomaterials*, 1992;13(2):67-97.
- **Nasermoaddeh A, Kagamimori S.** Balneotherapy in Medicine: a review. *Environ Health Prev Med*, 2005;10:171-179. doi: 10.1007/BF02897707
- **Nashner LM, McCollum G.** The organization of the human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behav Brain Sci*, 1985; 8:135-172.
- **Neiger H, Genot C.** Goniométrie articulaire, recherche des amplitudes articulaires et transcription des résultats. *Ann. Kinesither*, 1983; 10(6):215-219.
- **Ng J, Scott D, Taneja A, Gow P, Gosai A.** Weather changes and pain in rheumatology patients. *APLAR Journal of Rheumatology*, 2004;7:204-206.
- **Noé F, Garcia-Masso X, Pailard T.** Inter-joint coordination of posture on a seesaw device. *J Electromyogr Kinesiol*, 2017;34:72-79. doi: 10.1016/j.jelekin.2017.04.003
- **Nüesch E, Dieppe P, Reichenbach S, Williams S, Iff S, Jüni P.** All cause and disease specific mortality in patients with knee or hip osteoarthritis: population based cohort study. *BMJ*, 2011; 342:d1165. doi: 10.1136/bmj.d1165
- **Ochi M, Iwasa I, Uchio Y, Adachi N, Sumen Y.** The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br*, 1999;81-B(5):902-906.
- **O’Connell M, George K, Stock D.** Postural sway and balance testing: a comparison of normal and anterior cruciate ligament deficient knees. *Gait Posture*, 1998;8(2):136-142.

- **Oiestad BE, Holm I, Aune AK, Gunderson R, Myklebust G, Engebretsen L, Fosdahl MA, Risberg MA.** Knee function and prevalence of knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective study with 10 to 15 years of follow-up. *Am J Sports Med*, 2010; 38(11):2201-10. doi: 10.1177/0363546510373876.
- **Okuda K, Abe N, Katayama Y, Senda M, Kuroda T, Inoue H.** Effect of vision on postural sway in anterior cruciate ligament injured knee. *J Orthop Sci*, 2005;10(3):277-283.
- **Olchowil G, Tomaszewski M, Olejarsz P, Warchol J, Rozanska-Boczula M.** The effect of height and BMI on computer dynamic posturography parameters in women. *Acta Bioeng Biomech*, 2014; 16(4):53-58.
- **Papalia R, Franceschi F, Tecame A, D'Adamio S, Maffulli N, Denaro V.** Anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport activity: postural control as the key to success. *Int Orthop*, 2015; 39(3):527-34. doi: 10.1007/s00264-014-2513-9
- **Paulsen F, Waschke J.** Atlas d'anatomie humaine, anatomie générale et appareil locomoteur. *Edition Lavoisier (6ème édition)*, 2013; pp. 405.
- **Perrin P, Deviterne D, Hugel F, Perrot C.** Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture*, 2002; 15:187-194.
- **Perrin C, Conraux C, Collard C, Freyss G, Sauvage JP.** L'équilibre en pesanteur et en impesanteur. *Amette, Paris*, 1987, pp. 413.
- **Perrin P, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C.** Effects of physical and sporting activities on balance control in elderly people. *Br J Sports Med*, 1999; 33(2):121–126.
- **Perrin P, Jeandel C, Perrin CA, Béné MC.** Influence of visual control, conduction, and central integration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology*, 1997; 43(4):223–231.
- **Perrin P, Lestienne F.** Mécanismes de l'équilibre humain : exploration fonctionnelle, application au sport et à la rééducation. *Paris, Masson*, 1994; pp. 163.
- **Perrin P, Perrin C, Schneider D, Béné MC.** Exploration of the role of labyrinthine functions on balance control using static posturography. *Neurotol Newslett*, 1996;2:54-59.
- **Perrot C, Mur JM, Mainard D, Barrault D, Perrin P.** Influence of trauma induced by judo practice on postural control. *Scand J Med Sci Sports*, 2000;10:292-297.
- **Petersson IF, Jacobsson LT.** Osteoarthritis of the peripheral joints. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2002;16: 741–760.

- **Peultier L, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Zhang Z, Rat AC, Gueguen R, Paysant J, Perrin P.** Influence of meteorological elements on balance control and pain in patients with symptomatic knee osteoarthritis. *Int J Biometeorol*, 2017;61:903-910. doi: 10.1007/s00484-016-1269-x
- **Peultier L, Mainard D, Boisseau P, Paysant J, Perrin P.** Rééducation en milieu aquatique après ligamentoplastie du genou chez le sportif. *La Presse thermale et climatique*, 2015 ; 152 : 140-143.
- **Peultier-Celli L, Mainard D, Wein F, Paris N, Boisseau P, Ferry A, Gueguen R, Chary-Valckenaere I, Paysant J, Perrin P.** Comparison of an innovative rehabilitation, combining reduced conventional rehabilitation with balneotherapy, and a conventional rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes. *Frontiers in Surgery*, 2017. doi: 10.3389/fsurg.2017.00061
- **Peyron J, Stanescu V.** Cartilage articulaire normal de l'adulte. Anatomie, physiologie, métabolisme, vieillissement. *Encycl Med Chir (Paris) Appareil locomoteur*, 1994; 14-003-A-10.
- **Quick DC.** Joint pain and weather. A critical review of the literature. *Minn Med*, 1997; 80(3):25–29.
- **Ray MB.** Osteoarthritis. *Postgrad Med J*, 1937; 13(143):311-320.
- **Roberts D, Fridén T, Zätterström R, Lindstrand A, Moritz U.** Proprioception in people with anterior cruciate ligament deficient knees: comparison of symptomatic and asymptomatic patients. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1999;29(10):587-594.
- **Roos H, Adalberth T, Dahlberth L, Lohmander LS.** Osteoarthritis of the knee after injury to the anterior cruciate ligament or meniscus: the influence of time and age. *Osteoarthritis Cartilage*, 1995;3:261-267. doi: 10.2519/jospt.1999.29.10.587
- **Roos EM, Roos HP, Lohmander LS, Ekdahl C, Beynnon BD.** Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)--development of a self-administered outcome measure. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1998;28(2):88-96. doi: 10.2519/jospt.1998.28.2.88
- **Rouanne JR, Vellas B, Clanet M.** Les effets du vieillissement sur la marche et l'équilibre. *Rev Oto Neuro Ophthalmol*, 1993; 19-20:68-72.
- **Royer A, Cecconello R.** Bilans articulaires cliniques et goniométriques. Généralités. *EMC Podologie Kinésithérapie*, 2004; 1(2):82-91.
- **Ruskell GL.** Extraocular muscle proprioceptors and proprioception. *Prog Retin Eye Res*, 1999; 18(3):269-291.

- **Sanders TL, Kremers HM, Bryan AJ, Fruth KM, Larson DR, Pareek A, Levy BA, Stuart MJ, Dahm MJ, Krych AJ.** Is anterior cruciate ligament reconstruction effective in preventing secondary meniscal tears and osteoarthritis? *Am J Sports Med*, 2016, 44(7):1699-1707. doi: 10.1177/0363546516634325
- **Saunders JB.** The knee joint-its functional anatomy and the mechanism of certain injuries. *Cal West Med*, 1933; 39(2):83-85.
- **Scapinelli R.** Vascular anatomy of the human cruciate ligaments and surrounding structures. *Clin Anat*, 1997; 10:151-162. doi: 10.1002/(SICI)1098-2353(1997)10:3<151::AID-CA1>3.0.CO;2-X
- **Sharma L, Kapoor D, Issa S.** Epidemiology of osteoarthritis: an update. *Curr Opin Rheumatol*, 2006; 18(2):147-156. doi: 10.1097/01.bor.0000209426.84775.f8
- **Shelbourne KD, Gray T.** Anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon graft followed by accelerated rehabilitation. A two-to nine-year followup. *Am J Sports Med*, 1997; 25(6):786-795. doi: 10.1177/036354659702500610
- **Shelbourne KD, Nitz P.** Accelerated rehabilitation after cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1992; 15(6):256-264. DOI: 10.2519/jospt.1992.15.6.256
- **Sherrington CS.** The integrative action of the nervous system. *New York, NY: C Scribner's Sons*, 1906.
- **Sherrington C, Lord SR.** Increased prevalence of fall risk factors in older people following hip fracture. *Gerontology*, 1998;44(6): 340-344.
- **Shiraishi M, Mizuta H, Kubota K, Otsuka Y, Nagamoto N, Takagi K.** Stabilometric assessment in the ACL reconstructed knee. *Clin J Sport Med*, 1996; 6(1):32-39.
- **Shumway-Cook A, Horak FB.** Assessing the influence of sensory interaction of balance. Suggestion from the field. *Phys Ther*, 1986;66:1548-1550.
- **Sibley JT.** Weather and arthritis symptoms. *J Rheumatol*, 1985; 12(4):707–710.
- **Simon D, Mascarenhas R, Saltzman BM, Rollins M, Bach Br, MacDonald P.** The relationship between anterior cruciate ligament injury and osteoarthritis of the knee. *Adv Orthop*, 2015;2015:928301. doi: 10.1155/2015/928301
- **Société Française de Rhumatologie.** <http://public.larhumatologie.fr/grandes-maladies/arthrose>.
- **Solomonow M, Krogsgaard M.** Sensorimotor control of knee stability. A review. *Scand J Med Sci Sports*, 2011; 11:64-80.

- **Strusberg I, Mendelberg RC, Serra HA, Strusberg AM.** Influence of weather conditions on rheumatic pain. *J Rheumatol*, 2002; 29(2):335–338.
- **Tarantola J, Nardone A, Tacchini E, Schieppati M.** Human stability improves with the repetition of the task: effect of foot position and visual condition. *Neurosci Lett*, 1997; 228(2):75–78.
- **Tegner Y, Lysholm J.** Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res*, 1985;198:43-49.
- **Tegner Y, Lysholm J, Gillquist J, Öberg B.** Two-year follow-up of conservative treatment of knee ligament injuries. *Acta Orthop Scand*, 1984;55(2):176-180.
- **Thermes et cures thermales en France –** Disponible sur : <http://www.medecinethermale.fr/>
- **Thysen S, Luyten FP, Lories RJ.** Targets, models and challenges in osteoarthritis research. *Dis Model Mech*, 2015; 8(1):17-30. doi: 10.1242/dmm.016881
- **Timm KE.** The clinical and cost-effectiveness of two different programs for rehabilitation following ACL reconstruction. *JOSPT*, 1997;25(1):43-48. doi: 10.2519/jospt.1997.25.1.43
- **Timmermans EJ, Schaap LA, Herbolzheimer F, Dennison EM, Maggi S, Pedersen NL, Castell MV, Denkinger MD, Edwards MH, Limongi F, Sánchez-Martínez M, Siviero P, Queipo R, Peter R, van der Pas S, Deeg DJ, EPOSA Research Group.** The influence of weather conditions on joint pain in older people with osteoarthritis: results from European project on OsteoArthritis. *J Rheumatol*, 2015; 42(10):1885–1892. doi: 10.3899/jrheum.141594
- **Tjon SS, Geurts AC, van't Pad Bosch P, Laan RF, Mulder T.** Postural control in rheumatoid arthritis patients scheduled for total knee arthroplasty. *Arch Phys Med Rehabil*, 2000; 81(11):1489-1493.
- **Törpel A, Becker T, Thiers A, Hamacher D, Schega L.** Inter-session reliability strength testing in knee and elbow extension and flexion using the BTE PrimusRS. *J Sport Rehabil*, 2017;1-14. doi: 10.1123/jsr.2016-0209
- **Tortora GJ, Derrickson B.** Principes d'anatomie et de physiologie. *Editions de boeck*, 2007; pp. 1246.
- **Tovin BJ, Wolf SL, Greenfield BH, Crouse J, Woodfin BA.** Comparison of the Effects of Exercise in Water and on Land on the Rehabilitation of Patients with Intra-articular Anterior Cruciate Ligament Reconstructions. *Phys Ther*, 1994; 74(8):710-719.

- **Tsoukas D, Fotopoulos V, Basdekis G, Makridis KG.** No difference in osteoarthritis after surgical and non-surgical treatment of ACL-injured knees after 10 years. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016;24(9):2953-2959. doi: 10.1007/s00167-015-3593-9
- **Vergés J, Montell E, Tomàs E, Cumelles G, Castañeda G, Marti N, Möller I.** Weather conditions can influence rheumatic diseases. *Proc West Pharmacol Soc*, 2004; 47:134–136.
- **Vidal.** Gonarthrose : déremboursement des solutions viscoélastiques d'acide hyaluronique pour injection intra-articulaire. Disponible sur : www.vidal.fr
- **Vignos PJ.** Osteoarthritis of the knee. *Arthritis Rheum*, 1962; 5:95-98.
- **von Mackensen S, Hoeppe P, Maarouf A, Tourigny P, Nowak D.** Prevalence of weather sensitivity in Germany and Canada. *Int J Biometeorol*, 2005; 49(3):156–166. doi: 10.1007/s00484-004-0226-2
- **Vouriot A, Hannhart B, Gauchard G, Barot A, Ledin T, Mur JM, Perrin P.** Long-term exposure to solvents impairs vigilance and postural control in serigraphy workers. *Int Arch Occup Environ Health*, 2005;78: 510-515. doi: 10.1007/s00420-005-0609-7
- **Whipple RH, Wolfson LI, Amerman PM.** The relationship of knee and ankle weakness to falls in nursing home resident: an isokinetic study. *J Am Geriatr Soc*, 1987; 35(1):13–25.
- **Widmaier EP, Raff H, Strang KT.** Physiologie humaine – Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme. *Edition Maloine, 4ème édition*, 2007, 809p.
- **Wilder FV, Hall BJ, Barret JP.** Osteoarthritis pain and weather. *Rheumatology (Oxford)*, 2003; 42(8):955–958. doi: 10.1093/rheumatology/keg264
- **Wilson SA, McCann PD, Gotlin RS, Ramakrishnan HK, Wootten ME, Insall JN.** Comprehensive gait analysis in posterior-stabilized knee arthroplasty. *J Arthroplasty*, 1996;11(4):359-367.
- **Winter DA.** Biomechanics and Motor Control of Human Movement. *Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 1990b; pp.370.
- **Wright HP.** Osteoarthritis. *Can Med Assoc J*, 1944; 51(5):463-465.
- **Wyke B.** The neurology of joints. *Ann R Coll Surg Engl*, 1967; 41:25-50.
- **Yasuda K, Sasaki T.** Muscle exercise after anterior cruciate ligament reconstruction. Biomechanics of the simultaneous isometric contraction method of the quadriceps and the hamstrings. *Clin Orthop Relat Res*, 1987; 220:226-274.

- **Zätterström R, Fridén T, Lindstrand A, Moritz U.** The effect of physiotherapy on standing balance in chronic anterior ligament insufficiency. *Am J Sports Med*, 1994; 22:531-536. doi: 10.1177/036354659402200416
- **Zhang Z, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Rat AC, Paysant J, Perrin P.** Diurnal variation on balance control in patients with symptomatic knee osteoarthritis. *Arch of Gerontol Geriatr*, 2015; 61(1):109–114. doi: 10.1016/j.archger.2015.03.009
- **Zhou MW, Gu L, Chen YP, Yu Cl, Ao Yf, Huang HS, Yang YY.** Factors affecting proprioceptive recovery after anterior cruciate ligament reconstruction. *Chin Med J*, 2008; 121(22):2224-2228.

VIII. ANNEXES

ANNEXE 1 - ARTICLE IN FRONTIERS IN SURGERY, 2017



Comparison of an Innovative Rehabilitation, Combining Reduced Conventional Rehabilitation with Balneotherapy, and a Conventional Rehabilitation after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Athletes

OPEN ACCESS

Edited by:

Vassilios S. Nikolaou,
University General Hospital
Attikon, Greece

Reviewed by:

Konstantinos Markatos,
Biomedical Research
Foundation of the Academy
of Athens, Greece
Korres Stylianos Demetrios,
Athens State University,
United States

*Correspondence:

Philippe Perrin
philippe.perrin@univ-lorraine.fr

Specialty section:

This article was submitted
to Orthopedic Surgery,
a section of the journal
Frontiers in Surgery

Received: 02 July 2017

Accepted: 09 October 2017

Published: 07 November 2017

Citation:

Peultier-Celli L, Mainard D, Wein F,
Paris N, Boisseau P, Ferry A,
Gueguen R, Chary-Valckenaere I,
Paysant J and Perrin P (2017)
Comparison of an Innovative
Rehabilitation, Combining Reduced
Conventional Rehabilitation with
Balneotherapy, and a Conventional
Rehabilitation after Anterior Cruciate
Ligament Reconstruction in Athletes.
Front. Surg. 4:61.
doi: 10.3389/fsurg.2017.00061

Laetitia Peultier-Celli^{1,2}, Didier Mainard³, Frank Wein⁴, Nicolas Paris⁴, Patrick Boisseau⁵, Alexandre Ferry⁵, René Gueguen¹, Isabelle Chary-Valckenaere^{6,7}, Jean Paysant^{1,8} and Philippe Perrin^{1,2*}

¹ Faculty of Medicine and UFR STAPS, University of Lorraine, EA 3450, Development, Adaptation and Handicap, Villers-lès-Nancy, France, ² Laboratory for the Analysis of Posture, Equilibrium and Motor Function (LAPEM), University Hospital of Nancy, Vandoeuvre-lès-Nancy, France, ³ Department of Orthopedics and Trauma Surgery, University Hospital of Nancy, Nancy, France, ⁴ Department of Orthopedics Surgery, Mèdipôle Gentilly-Saint-Jacques, Maxéville, France, ⁵ Institut de Formation en Masso-Kinésithérapie, Nancy, France, ⁶ Department of Rheumatology, University Hospital of Nancy, Vandoeuvre-lès-Nancy, France, ⁷ IMoPA, UMR 7365 CNRS, Vandoeuvre-lès-Nancy, France, ⁸ Regional Institute of Physical Medicine and Rehabilitation, Nancy Cedex, France

Background: Instability of the knee, related to anterior cruciate ligament injury, is treated by surgical reconstruction. During recovery, a loss of proprioceptive input can have a significant impact. Few studies have evaluated the benefits of rehabilitation of the knee in aquatic environment on functional outcomes.

Objective: This study aimed to compare an innovative rehabilitation protocol combining reduced conventional rehabilitation with aquatic rehabilitation, with a conventional rehabilitation, according to the National French Health Authority, in terms of kinetics, development of proprioceptive skills, and functional improvement of the knee.

Methods: 67 patients, who were amateur or professional athletes, were randomized into two groups: 35 patients followed the conventional rehabilitation protocol (Gr1) and 32 patients followed the innovative rehabilitation protocol (Gr2). Patients were evaluated before surgery, and at 2 weeks, 1, 2, and 6 months after surgery using posturography, and evaluation of muscular strength, walking performance and proprioception. This study is multicenter, prospective, randomized, and controlled with a group of patients following conventional rehabilitation (level of evidence I).

Results: For the same quality of postural control, Gr2 relied more on somesthesia than Gr1 at 6 months. The affected side had an impact on postural control and in particular on the preoperative lateralization, at 2 weeks and at 1 month. Lateralization depended on the affected knee, with less important lateralization in Gr2 preoperatively and at 1 month. The quadriceps muscular strength was higher in Gr2 than in Gr1 at 2 and 6 months and

muscle strength of the external hamstring was greater in Gr2 than in Gr1 at 6 months. The isokinetic test showed a greater quadriceps muscular strength in Gr2. Gr2 showed a greater walking distance than Gr1 at one month. Gr2 showed an improvement in the proprioceptive capacities of the operated limb in flexion for the first 2 months.

Conclusion: The effectiveness of the innovative rehabilitation program permits faster recovery, allowing for an earlier return to social, sporting, and professional activities. Faster retrieval of knee function following aquatic rehabilitation would prevent both short-term risk of lesions of the contralateral limb due to overcompensation and long-term risk of surgery due to osteoarthritis.

Registration of clinical trials: NCT02225613.

Keywords: anterior cruciate ligament injury, rehabilitation, balneotherapy, postural control, proprioception, sports injury

INTRODUCTION

Anterior cruciate ligament (ACL) injury is one of the main injuries in sporting activities with an incidence of nearly 32,000 victims per year in France (1), especially in young patients or athletes. This injury is rather unusual in the general population and can occur during most physical and sporting activities, particularly in activities which involve rotation constraints of the lower limbs such as football, rugby, handball, basketball, volleyball, and especially skiing (2). The ACL does not recover spontaneously due to its poor vascularity, and rupture of this ligament may result in short-term, medium-term, and long-term complications and poor functional prognosis. Instability of the knee and subsequent postural control impairments can occur in sporting activities, especially pivot sports, or during activities of daily living (3). This instability can affect other structures of the knee by damaging the meniscus which acts as a shock absorber. These events can also damage articular cartilage of the femur and the tibia leading to long-term osteoarthritis (4–7). Reconstruction of ACL by auto-graft tendon is the optimal treatment for these injuries, offering maximal joint stability with minimal surgical risk (3). Several studies have shown recovery of postural stability (8–10), which can be explained by the regeneration of sensory neurons after reconstruction of ACL (11). Among the reconstruction techniques, a hamstrings autograft uses the tendons of the gracilis and semitendinosus muscles. Once removed, these tendons are folded in half in order to obtain a new ligament with four strands. Among other techniques, a tape locking screw (TLS), developed by Collette in Brussels in 2001 (12), is nowadays used in France in 10% of cases (2). This technique uses only one fragment of the tendon of the semitendinosus muscle (the tendon of the gracilis may nevertheless sometimes be used). The graft is placed in small diameter bone tunnels with suspension strips and an interference screw. Finally, the Kenneth Jones (KJ) technique relies on the removal of the central third of the patellar tendon with a bone rod at each end, at the top of the femur and at the bottom on the tibia (13). Regardless of the technique, the graft taken is calibrated and then prepared before being inserted and fixed in both tibial and femoral bone tunnels. Surgery has to be followed by a long process of neuromotor reprogramming through rehabilitation.

Several rehabilitation techniques are used and studies have been carried out to compare the effects of rehabilitation in water versus more traditional rehabilitation on land. Tovin et al. (14) have shown that 2 months after surgery, aquatic exercises may not be as effective than on land for muscle strength but that water has a beneficial effect on edema and pain decrease. Zamarioli et al. (15) showed that during 9 weeks of rehabilitation, patients undergoing aquatic rehabilitation tended to recover faster than those who had undergone conventional land rehabilitation on clinical parameters such as pain, range of motion, muscle strength, swelling, and muscle mass circumference. Tovin et al. (14) suggested that future studies should analyze the effectiveness of a program that combines traditional and water-based exercises over a longer follow-up period.

The main objective of this study was to compare an innovative rehabilitation protocol with an “aquatic part” (balneotherapy) and a “dry part” and a conventional rehabilitation protocol (1) in terms of dynamics of recovery and development of the proprioceptive skills in athletes with ACL reconstruction. A secondary objective was to compare both groups in terms of functional improvement, i.e., pain, joint amplitude, muscular strength, and walking performance.

PATIENTS AND METHODS

Setting and Participants

Sixty-seven patients aged from 18 to 49 years participated in this study. The volunteers underwent surgery by orthopedic surgeons from the University Hospital of Nancy and private clinics around Nancy, East of France. Among the 67 patients, none have undergone surgical complications.

All subjects were leisure or competitive sportsmen (amateur or professional). All of them had chronic knee instability and the indication of a first-line ACL reconstruction using TLS, semitendinosus or gracilis tendons or KJ was given. Exclusion criteria were history of neurological disease (stroke, degenerative diseases of the central nervous system or the peripheral nervous system), medication for psychotropic or antihypertensive purposes, contraindications to aquatic activities (especially cutaneous), and

recent sprains less than 3 months in the lower limbs that could interfere with postural control.

This study is multicenter, prospective, randomized, and controlled with a group of patients following conventional rehabilitation (level of evidence I). All participants gave written informed consent before the randomization. The study was approved by the French Medical Ethical Committee (Comité de Protection des Personnes de Lorraine), realized in structures (Nancy-Thermal) agreed for research (Agence Régionale de Santé), and registered in ClinicalTrials.gov with the identifier: NCT02225613.

Randomization and Interventions

All patients began the same conventional rehabilitation protocol according to the recommendations of the National French Health Authority (HAS), until tissues healing (3). For 3 weeks, starting from the 15th postoperative day, subjects were randomized into two rehabilitation groups. To implement randomization, a statistician assigned numbers in two groups, each number corresponding to a patient. Sealed envelopes with the numbers were then prepared by the study Promotor (Direction for Research of the University Hospital who is not investigator of the study). No patient refused the group into which they were assigned. The first group (Gr1, $n = 35$; mean age = 29.91 ± 7.70 years; 21 males) followed a conventional rehabilitation protocol (according to HAS recommendations) and the second group (Gr2; $n = 32$; mean age = 28.22 ± 7.38 ; 26 males) followed an innovative rehabilitation protocol with a reduced conventional part and an aquatic part. The total duration of patient care was the same between the two groups regardless of the rehabilitation protocol followed: 45 min, once a day, five times a week, from Monday to Friday, for 3 weeks. After these 3 weeks, all patients returned to a conventional rehabilitation (according to HAS recommendations) (3) (Figure 1).

Outcomes and Follow-up

Postural Control Statement

Postural control tests, main endpoint, were carried out in a specially designed sound proof room devoted to posturography recordings. A vertical force platform, fitted with three strain-gauge force transducers (Medicapteurs, Balma, France) was used to perform posturography and to provide a measurement of the body sway in terms of displacement of the center of foot pressure

(CoP) in a two-dimensional horizontal plane (recording time: 25.6 s, acquisition frequency: 40 Hz) (Figure 2). The signals from the transducers were amplified, converted from analog into digital form and then recorded on a computer. The sway path traveled and area covered by the CoP trajectory were used to quantify postural sway (Figure 3). The mean shift on the X-axis was also used to quantify the lateralization and its side. Each subject was asked to stand upright on the platform, barefoot, feet abducted at 30°, heels separated by 3 cm, arms along the body, remaining as stable as possible and breathing normally in six conditions (16–18) to test somatosensory cues (19) (Table 1).

In order to evaluate participants’ ability to adapt and adjust balance control performance correctly and rapidly to change of external and internal constraints, a mean equilibrium score (MES) was calculated by adding the scores of each condition, and dividing that sum by six [$MES = (\text{sum C1–C6})/6$], low values being representative of good postural control (20–22). Each score was adjusted to score area in C1 to identify the significance of each sensory system influencing postural control, ratio C2/C1 representing the somatosensory contribution to postural control (R_{SOM}), ratio C4/C1, the visual contribution (R_{VIS}) and ratio C5/C1, the vestibular contribution (R_{VEST}) (23, 24) (Table 1). A lower ratio of a sensory input is representative of a better use of this sensory input.

All patients were submitted to postural control tests before surgery (Ev1), and four times after the beginning of rehabilitation; at 2 weeks (Ev2) (corresponding to the beginning of the specific rehabilitation to the study), at 1 month (Ev3) (corresponding to the end of the specific rehabilitation to the study), at 2 months (Ev4) and at 6 months (Ev5) (Figure 3).

Clinical Parameters Statement

The functional improvement, secondary endpoints, was evaluated by different clinical assessments:

- (1) The intensity of affected knee joint pain was assessed with the Visual Analog Scale (VAS) for pain. The VAS consisted of a 100 mm line whose endpoints were designated as “no pain” (at 0 mm) and “unbearable pain” (at 100 mm), respectively. Patients were requested to locate the level of knee pain on the line with a small vertical mark (25, 26).
- (2) The proprioception test was carried out in a sitting position, on an examination table, without contact with the base of

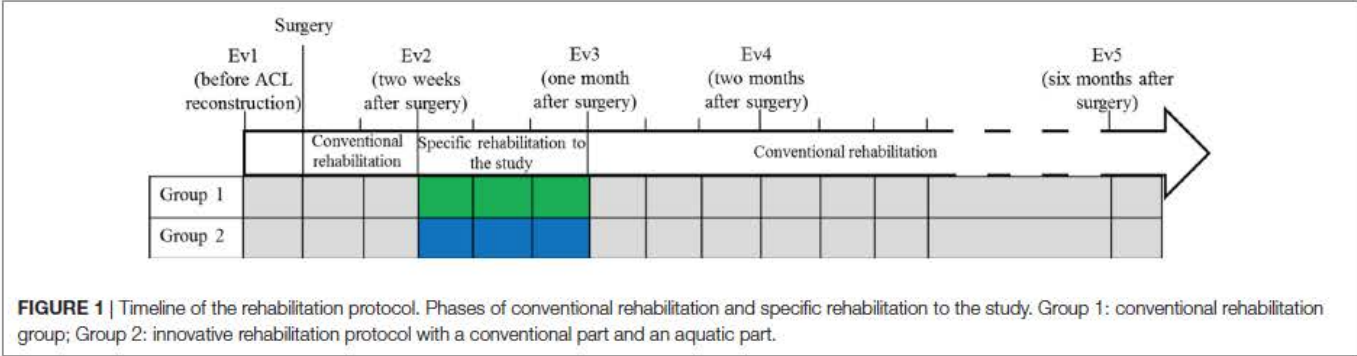


FIGURE 1 | Timeline of the rehabilitation protocol. Phases of conventional rehabilitation and specific rehabilitation to the study. Group 1: conventional rehabilitation group; Group 2: innovative rehabilitation protocol with a conventional part and an aquatic part.



FIGURE 2 | Postural control analysis on a posturography platform (Medicaptureurs, Balma, France). Virtual reality goggles (RM Ingénierie, Rodez, France).

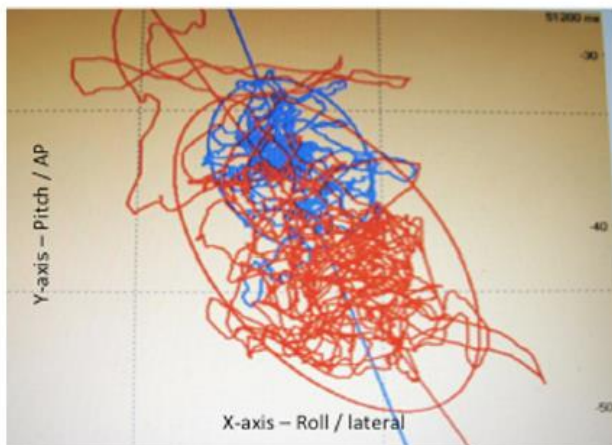


FIGURE 3 | Posturography: statokinesigram, sway path traveled and area covered (confidence ellipse covering 90% of the points) by the center of foot pressure, in eyes open (blue) and eyes closed (red) conditions.

the lower half of the posterior part of the thigh. The tested member was placed on a skateboard. Flexion and extension movements were realized with the patients' eyes closed. The lower limb was passively flexed or extended by the

physiotherapist at an arbitrary angle before being returned passively to the neutral position. Patients were instructed to flex actively the tested limb to the same angle than the passive position determined by the physiotherapist (27–31). The error was measured in degrees by an inclinometer placed on the proximal part of the tibia below the anterior tuberosity.

- (3) Joint amplitudes were evaluated in flexion and extension, active and passive (28, 32, 33).
- (4) Trophicity refers to all the mechanisms and processes involved in the nutrition of organs and tissues. This test consisted of digital pressure on the edema after which it was observed whether the imprint left by the finger disappeared rapidly or not. This test was positive if the impression disappeared slowly (28).
- (5) Muscle strength testing was performed in knee extension to evaluate the strength of the femoral quadriceps, and then in knee flexion to assess strength of the hamstrings. A score ranging from 0 (no contraction) to 5 (normal contraction) was attributed to muscle strength (28). An isokinetic test allowed evaluating parameters such as strength, muscle deficit, and hamstring/quadriceps ratio. The evaluation was performed on the contralateral and ipsilateral limbs in order to establish a comparison of the muscle strength of the two limbs at speeds of 60°s^{-1} and then 180°s^{-1} .
- (6) The 6 min walk test consisted of measuring the greatest possible distance that a patient could walk at their own pace in 6 min (34).
- (7) Patients had to respond to the Lysholm-Tegner (35), International Knee Documentation Committee (IKDC) (36), and Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) (37) questionnaires.

For each of the five evaluation times, the clinical tests performed are presented in Table 2.

Statistical Analysis

Qualitative data were expressed in terms of number (n) and percentage (%). Quantitative data were expressed as mean and SD.

A cross-sectional analysis was used to compare the two rehabilitation groups at each evaluation time. Frequency comparisons in independent series were performed with the Chi squared test. Comparisons of means between the two rehabilitation groups were done using the Student's t test for independent series. The ANOVA variance analysis was used to study the relationships between a quantitative dependent variable and several independent explanatory variables. Due to the small sample size tested on the isokinetic test, a nonparametric Mann–Whitney test was used to make comparisons between the two groups. A probability level $p \leq 0.05$ was considered significant.

A longitudinal analysis was used to assess the progression of patients in a given group between two evaluations. Comparisons of mean values between the different evaluations in the same group were made by the Student's t test for paired series. The ANOVA variance analysis was used to study the relationships between the difference between two evaluations and an independent explanatory variable. The McNemar analysis was used with

TABLE 1 | Postural control test.

Postural control test		
Name	Situation	Sensory consequences
Conditions		
Condition 1 (C1)	Eyes open on firm support	–
Condition 2 (C2)	Eyes closed on firm support	Vision absent
Condition 3 (C3)	Vision altered (virtual reality goggles), on firm support	Altered vision
Condition 4 (C4)	Eyes open on foam support	Altered proprioception
Condition 5 (C5)	Eyes closed on foam support	Vision absent, altered proprioception
Condition 6 (C6)	Vision altered (virtual reality goggles) on foam support	Altered vision and proprioception
Name	Pair	Significance
Ratios		
Somatosensory (R_{SOM})	C2/C1	Question: does sway increase when visual cues are removed? Lower scores: better use of somatosensory references
Visual (R_{VIS})	C4/C1	Question: does sway increase when somatosensory cues are inaccurate? Lower scores: better use of visual references
Vestibular (R_{VEST})	C5/C1	Question: does sway increase when visual cues are removed and somatosensory cues are inaccurate? Lower scores: better use of vestibular cues

Determination of the six conditions and significance of sensory ratios.

TABLE 2 | Tests schedule.

	Ev1	Ev2	Ev3	Ev4	Ev5
Posturography	x	x	x	x	x
Visual Analog Scale (VAS) pain	x	x	x	x	x
Proprioception test	x			x	
Joint amplitudes		x	x	x	x
Trophicity		x	x	x	x
Muscular strenght		x	x	x	x
Isokinetic test					x
6 min walk test			x		x
Questionnaires (Lysholm-Tegner, International Knee Documentation Committee, Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score)	x				x

Ev1: evaluation before anterior cruciate ligament reconstruction; Ev2: 2 weeks after surgery; Ev3: 1 month; Ev4: 2 months; Ev5: 6 months.

ordinal variable to compare frequencies across time in each group. A probability level $p \leq 0.05$ was considered significant except for the results of the posturography test. To take into account multiple comparisons, the Bonferroni procedure was applied to

TABLE 3 | Baseline anthropometric characteristics of patients with conventional rehabilitation (Group 1) protocol and innovative rehabilitation protocol (Group 2).

	Group 1 ($n = 35$)	Group 2 ($n = 32$)	p -value
	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Student's t test
Age (years)	29.91 $\pm$ 7.70	28.22 $\pm$ 7.38	0.364
Height (m)	1.72 $\pm$ 0.08	1.76 $\pm$ 0.10	0.064
Weight (kg)	69.59 $\pm$ 11.55	73.34 $\pm$ 13.54	0.225
BMI (kg.m^{-2})	23.46 $\pm$ 2.70	23.44 $\pm$ 2.57	0.971
	n (%)	n (%)	Chi2
Sex, males	21 (60.00)	26 (80.25)	0.058

SD, standard deviation; BMI, body mass index.

pairwise comparisons with a significant $p < 0.05/5 = 0.01$ adjustment due to the five evaluations.

The SPSS Statistics software (IBM, Armonk, NY, USA) version 23.0 was used for all analyzes.

RESULTS

Participants

No statistically significant difference was observed for anthropometric variables (age, sex, height, weight, body mass index) between the two groups of patients at baseline (Table 3). No significant difference was observed between the two rehabilitation groups regarding the surgical techniques used ($p = 0.427$).

Postural Control

No statistically significant differences of the MES of the sway path traveled and the area covered by the center of foot pressure were observed between the two rehabilitation groups at the five evaluations. No statistically significant differences of R_{VIS} and R_{VEST} were observed between the two rehabilitation groups at the five evaluations whereas R_{SOM} score was significantly lower in Gr2 than in Gr1 ($p = 0.008$) at Ev5, reflecting a greater use of somesthesia in balance control (Table 4). Patients of the two groups rely on the contralateral limb to the surgery to the evaluation at Ev1 ($p = 0.002$), Ev2 ($p < 0.001$) and Ev3 ($p = 0.001$). Gr1 rely more than Gr2 on the contralateral limb to the surgery at Ev1 ($p = 0.037$) and Ev3 ($p = 0.039$).

Significant differences were showed between Ev1 and Ev2 for R_{VIS} and R_{VEST} in both groups. Patients used more visual and the vestibular input at Ev2 to maintain their balance control (Gr1: R_{VIS} , $p = 0.004$; R_{VEST} , $p < 0.001$; Gr2: R_{VIS} , $p = 0.001$; R_{VEST} , $p < 0.001$). In Gr1, the area decreased between Ev2 and Ev3 ($p = 0.004$) and between Ev3 and Ev4 ($p = 0.001$), and the sway path decreased between Ev3 and Ev4 ($p = 0.001$). In Gr2, the sway path increased between Ev1 and Ev2 ($p = 0.003$) and decreased between Ev2 and Ev3 ($p = 0.001$). Gr1 relied more on the limb contralateral to the operated limb between Ev1 and Ev2 ($p < 0.001$), whereas they relied less on the contralateral limb between Ev2 and Ev3 ($p < 0.001$) and Ev1 and Ev5 ($p = 0.010$). Gr2 relied more on the limb contralateral to the surgery between Ev1 and Ev2 ($p < 0.001$), whereas they relied less on the contralateral limb between Ev2 and Ev3 ($p < 0.001$).

TABLE 4 | Comparison of the postural control between the two groups of rehabilitation.

	Group 1 (n = 35)	Group 2 (n = 32)	Student's t test
	Mean ± SD	Mean ± SD	p-value
Evaluation 1			
Area (mm ²)	633.78 ± 229.36	767.64 ± 459.74	0.131
Sway path (mm)	660.53 ± 215.01	649.83 ± 235.13	0.846
R _{SOM}	1.46 ± 0.80	1.60 ± 0.98	0.506
R _{VIS}	3.69 ± 2.42	3.81 ± 1.59	0.812
R _{VEST}	12.11 ± 5.73	16.09 ± 11.36	0.081
Evaluation 2			
Area (mm ²)	696.13 ± 251.07	740.90 ± 348.25	0.546
Sway path (mm)	729.58 ± 187.42	732.20 ± 231.81	0.959
R _{SOM}	1.35 ± 0.54	1.63 ± 1.06	0.176
R _{VIS}	2.44 ± 1.32	2.51 ± 1.26	0.825
R _{VEST}	7.88 ± 5.08	8.22 ± 4.95	0.784
Evaluation 3			
Area (mm ²)	610.53 ± 205.35	656.21 ± 213.39	0.375
Sway path (mm)	676.18 ± 183.81	631.80 ± 187.17	0.331
R _{SOM}	1.46 ± 1.02	1.54 ± 1.15	0.746
R _{VIS}	2.83 ± 1.86	2.59 ± 1.42	0.548
R _{VEST}	8.17 ± 3.81	7.52 ± 3.51	0.478
Evaluation 4			
Area (mm ²)	556.13 ± 173.78	595.04 ± 205.83	0.243
Sway path (mm)	612.64 ± 165.88	589.98 ± 176.82	0.590
R _{SOM}	1.45 ± 0.67	1.31 ± 0.61	0.356
R _{VIS}	3.27 ± 1.63	2.95 ± 1.44	0.404
R _{VEST}	8.07 ± 3.88	7.92 ± 4.14	0.880
Evaluation 5			
Area (mm ²)	583.72 ± 196.31	639.65 ± 286.87	0.352
Sway path (mm)	629.10 ± 220.00	603.67 ± 198.25	0.622
R _{SOM}	1.62 ± 0.87	1.14 ± 0.50	0.008
R _{VIS}	4.32 ± 3.25	3.09 ± 2.27	0.080
R _{VEST}	11.51 ± 7.26	9.57 ± 7.86	0.297

SD, standard deviation.

Clinical Parameters

- (1) No statistically significant difference in pain was observed between the two rehabilitation groups over time. In Gr1, pain decreased between Ev2 and Ev3 ($p = 0.007$) and Ev1 and Ev5 ($p = 0.039$). In Gr2, pain increased between Ev1 and Ev2 ($p = 0.027$), then decreased between Ev2 and Ev3 ($p < 0.001$), Ev4 and Ev5 ($p = 0.030$), and Ev1 and Ev5 ($p = 0.012$).
- (2) No statistically significant difference in proprioception was observed between the two groups over time. In Gr2, an improvement of proprioception in flexion was observed at Ev4 ($p = 0.002$).
- (3) No statistically significant difference in joint amplitude was observed between the two groups over time. In the two groups, an improvement in active and passive flexion was observed between Ev2 and Ev3 ($p < 0.001$), Ev3 and Ev4 ($p < 0.001$), Ev4 and Ev5 ($p < 0.001$). In Gr1, an improvement in passive extension was observed between Ev2 and Ev3 ($p = 0.015$) and Ev3 and Ev4 ($p = 0.006$), and an improvement in active extension was observed between Ev4 and Ev5 ($p < 0.001$). In Gr2, an improvement in active extension was observed between Ev2 and Ev3 ($p = 0.008$), Ev3 and Ev4 ($p = 0.038$), and Ev4 and Ev5 ($p = 0.002$). An improvement in passive extension was observed between Ev2 and Ev3 ($p = 0.021$) and Ev4 and Ev5 ($p = 0.006$) in Gr2.
- (4) No statistically significant difference in trophicity was observed between the two groups over time. An improvement in trophicity was observed in the two groups between Ev2 and Ev3 (Gr1: $p = 0.039$; Gr2: $p = 0.006$) and Ev4 and Ev5 (Gr1: $p = 0.004$; Gr2: $p = 0.035$).
- (5) Statistically significant differences in quadriceps muscle strength were observed at Ev4 ($p = 0.015$) and Ev5 ($p = 0.027$) between the two groups. At Ev4 in Gr2, 14 patients obtained a score of 5 (43.75%), 17 a score of 4 (53.13%) and 1 a score of 3 (3.12%) versus 5 a score of 5 (14.29%), 25 a score of 4 (71.43%) and 1 a score of 3 (2.85%) in Gr1. At Ev5 in Gr2, 24 patients obtained a score of 5 (75%) and 8 a score of 4 (25%) versus 17 a score of 5 (48.57%) and 18 a score of 4 (51.43%) in Gr1. Statistically significant differences in internal hamstring muscle strength were observed at Ev2 ($p = 0.026$). In Gr2, 13 patients obtained a score of 4 (40.63%), 14 a score of 3 (43.75%), and 5 a score between 0 and 2 (15.62%) versus 8 a score of 4 (22.86%), 26 a score of 3 (74.29%) and 1 a score between 0 and 2 (2.85%) in Gr1. Statistically significant differences in external hamstring muscle strength were observed at Ev5 ($p = 0.019$) between the two groups. In Gr2, 22 patients obtained a score of 5 (68.75%), 9 a score of 4 (28.13%) and 1 a score of 3 (3.12%) versus 12 a score of 5 (34.29%), 21 a score of 4 (60.00%) and 2 a score of 3 (5.71%) in Gr1. The statistical analysis showed an increase in the muscle strength of the quadriceps between Ev2 and Ev3 ($p = 0.006$) and Ev3 and Ev4 ($p = 0.039$) in Gr1. The muscle strength of the hamstring increased between Ev2 and Ev3 ($p = 0.001$) and Ev4 and Ev5 ($p = 0.031$). In Gr2, the muscle strength of the quadriceps increased between Ev2 and Ev3 ($p < 0.001$), and the muscle strength of the hamstring increased between Ev2 and Ev3 ($p < 0.001$). At Ev5, the muscle strength of the quadriceps developed in isokinetic testing was significantly greater in Gr2 at either 60°s^{-1} ($p = 0.027$) or 180°s^{-1} ($p = 0.047$). Moreover, muscle deficit of the quadriceps of the ipsilateral limb compared to the contralateral limb was lower in Gr2 ($p = 0.020$).
- (6) A statistically significant difference in the 6 min walk test was observed between the two groups at Ev3 ($p = 0.025$). Gr1 traveled 425.27 ± 158.45 m against 506.59 ± 127.70 m for the Gr2. 6 min walking performance significantly increased at Ev5 compared to Ev3 in the two groups ($p < 0.001$) and there was no significant difference at Ev5.
- (7) No statistically significant difference for questionnaires was observed between the two groups. An improvement in the functional Lysholm-Tegner score was observed between Ev1 and Ev5 in Gr1 ($p < 0.001$) and Gr2 ($p = 0.004$). Statistical analysis showed an improvement in the IKDC functional score in both groups ($p < 0.001$). Significant improvement in knee function after injury was observed in both groups ($p < 0.001$). In both groups an improvement was observed for pain (Gr1, $p = 0.001$; Gr2, $p = 0.016$), daily life (Gr1, $p < 0.001$; Gr2, $p < 0.001$), quality of life (Gr1, $p < 0.001$;

Gr2, $p < 0.001$) and an increase in sports and leisure activities (Gr1, $p < 0.001$; Gr2, $p < 0.001$).

DISCUSSION

This study aimed to compare an innovative rehabilitation protocol combining a dry and an aquatic part with a conventional rehabilitation protocol with the same total duration of patient care, in terms of dynamics of recovery, development of proprioceptive skills and functional improvement in athletes with ACL reconstruction. The main results of this study showed that for the same quality of postural control, patients who followed the innovative rehabilitation protocol had less lateralization at the side contralateral to the surgery than patients who followed the conventional rehabilitation protocol after the specific period of rehabilitation. The innovative group also relied more on somesthesia 6 months after surgery. Secondary results showed that, although muscle strength increased in both rehabilitation groups during follow-up, patients who followed the innovative rehabilitation protocol had greater muscle strength of the external hamstring 6 months after surgery and greater muscle strength of the quadriceps 2 months and 6 months after surgery. This difference in muscle strength of the quadriceps 6 months after surgery was confirmed by the isokinetic test. This test confirmed a difference in muscle strength between the two groups at the rate of 60°s^{-1} as well as at the rate of 180°s^{-1} and a lower deficit of the quadriceps in the innovative rehabilitation protocol group. On the other hand, although walking distance in 6 min increased in both groups between the 1st month and the 6th months after surgery, patients who followed the innovative rehabilitation protocol walked a greater distance 1 month after surgery. Finally, although both rehabilitation groups had similar proprioceptive performances before and 2 months after surgery, patients who followed the innovative rehabilitation protocol showed an improvement of proprioception at the ipsilateral limb 2 months after surgery compared to before surgery.

The main endpoint showed that for the same quality of postural control 6 months after surgery, patients who followed the innovative rehabilitation protocol increased the weight of somesthesia more than the conventional rehabilitation protocol group. The conventional group did not increase somesthesia in the course of evaluations. This means that patients who followed innovative rehabilitation had developed more proprioceptive capacities during rehabilitation. On the other hand, in agreement with the study of Dauty et al. (38), 15 days after surgery, patients of both groups relied more heavily on the contralateral limb as demonstrated by the posturography test. This compensation necessity decreased in both groups one month after surgery and was less needed in patients receiving the aquatic rehabilitation protocol than in patients who had followed the conventional rehabilitation protocol. Reduced gravity and water buoyancy decrease the detrimental effects of weight bearing and impact forces on joint structure (39) and the Archimedes' principle allows an early and progressive loading by lowering the immersion level (40). This progressive loading can explain the reduced lateralization in the patients who followed the protocol of innovative rehabilitation one month after surgery.

In this study, measurements of joint amplitudes, trophicity, pain assessment, and Lysholm-Tegner, IKDC and KOOS questionnaires did not show any significant difference between the two groups. The evolution of these parameters during the 6 months of follow-up showed similarities in the two groups. First, an improvement in the flexion and extension of the knee joint was observed in the two rehabilitation groups between the 15th day and the 1st postoperative month, between the 1st month and the 2nd postoperative month, and between the 2nd month and the 6th postoperative month. In rehabilitation, the gain in joint amplitude is obtained initially by soft techniques of recovery of the mobility. Then, massages of all the planes of articular sliding with kneading, frictions, and deep transverse massages make possible to avoid retractions. Passive and active mobilization allows for an increase in flexion by the use of supra-patellar supports, contraction-relaxation and the search for lateral sliding by manual support or contraction of the hamstrings.

We also compared pain reduction in the two groups. A reduction in pain was observed between the 15th day and the 1st postoperative month, and between the 2nd month and the 6th postoperative month in the group following the innovative rehabilitation protocol. The analgesic means used in rehabilitation such as circulatory massages, cryotherapy, or scar massages to avoid the formation of tissue adhesions, all participate to this reduction of pain. This is supported by the fact that pain 6 months after surgery is lower than the pain experienced before surgery.

An improvement in trophicity was found between the 15th day and the first postoperative month, as well as between the 2nd month and the 6th postoperative month in both groups. Massages allowed lymphatic drainage and decreased edema. Finally, the Lysholm-Tegner, IKDC, and KOOS questionnaires showed an increase in scores between preoperative evaluation and evaluation 6 months after surgery in both rehabilitation groups (41). Thus, patients judged the functionality of their knee to be better 6 months after surgery than before surgery. They also have less pain, improve their daily life and quality of life, and take up recreational activities and sports activities.

Patients who followed the innovative rehabilitation protocol had significantly greater muscular strength than patients who followed the conventional rehabilitation protocol 2 months and 6 months after surgery. Several properties of the aquatic environment can explain this difference. First, a body immersed in water is subjected to a resistance effect called drag force and turbulence (40). This resistance to advancement increases with the square of the speed: the faster the body or part of the body moves, the greater the driving strength (42). In an aquatic environment, when a patient feels pain, he can stop his movement; the force then falls precipitously because the viscosity of the water dampens the movement almost instantaneously. This allows better control of muscle building (40). Second, after any intra-articular injury of the knee, resting of the quadriceps is observed. The Archimedes' principle allows the quadriceps to be stressed in discharge, and therefore, a soft muscle building. Third, lowering the body's apparent weight allows early loading, and therefore, progressive muscular strengthening by lowering the immersion

level (40, 42). In addition, water temperature causes a muscular heating which can favor the mobilization of the operated member and thus allow indirectly a muscular building. Hydrostatic pressure also plays an indirect role in muscle strengthening by promoting venous and lymphatic return. As a result of this, contractures (i.e., the defense mechanism that takes place after a trauma to block the traumatized zone) will disappear and thus allow a progressive mobilization, and therefore, a muscular effort of the initially contracted area. However, it was reported that electromyographic activity of under water exercises was decreased as compared to similar exercises performed on dry land (44–46). Moreover, in 1994, Tovin et al. (14) had already compared rehabilitation exercises in the aquatic environment with dry rehabilitation exercises in patients having surgery of the ACL injury and showed that aquatic exercises were not as effective as dry exercises for strength gain and muscle trophicity. Nevertheless, the studies on the subject are contradictory since Zamarioli et al. (15) showed that patients following an aquatic rehabilitation had a better recovery of the muscular strength. Our study had the specificity of combining dry aquatic rehabilitation and aquatic rehabilitation. Dry exercises and exercises in the aquatic environment differ in nature and this could explain this difference in muscular strength in favor of patients who have followed the protocol of innovative rehabilitation. The Archimedes' principle allows standing exercises with a normal motor pattern for the patient, which is directly transferable on the land and which allows a better dry muscle strengthening than exercises that would be made in seated or lying down positions. Despite this difference in muscle strength between the two rehabilitation groups, a progressive improvement was observed in both groups during the 6 months of follow-up. Our study is in agreement with other studies that have shown an improvement in muscle strength and a reduction in the difference in muscle strength between the operated limb and the contralateral limb after different rehabilitation programs (41, 47–49). This progressive improvement can be explained by a muscular building process. On the one hand, muscular rehabilitation aims at combating muscular amyotrophy. On the other hand, the hamstrings play the role of braking the last degrees of extension and also stabilizing the joint when the knee is bent under load. At the end of rehabilitation, muscular building favors exercises derived from sporting activities.

This study showed that patients who followed the innovative rehabilitation protocol walked a greater distance in 6 min than patients who followed the conventional rehabilitation protocol 1 month after surgery. With water immersion, gravitational forces can be partially or completely compensated so that only the forces of the couple act on the injured site. For example, for an immersion up to the shoulders, the body's apparent weight is 15–20 kg and only a few active motor units are needed to make the movement possible. Due to the apparent decrease in body weight, progressive loading is made possible by lowering the immersion level (40, 43). Immersion thus allows active movements, which are automatically transferred to walking pattern in land conditions. In addition, 6 months after surgery, there was no significant difference between the two rehabilitation groups, suggesting that patients who followed the innovative rehabilitation

protocol recovered capacities faster than the group following the conventional rehabilitation protocol but patients who followed conventional protocol did catch up by 6 months.

The proprioception test revealed no significant difference between the two rehabilitation groups before surgery and 2 months after surgery. Nevertheless, after comparing the results obtained before and 2 months after surgery, this study showed that patients who followed the innovative rehabilitation protocol significantly reduced the proprioceptive deficit in flexion of the operated knee after surgery. The aquatic environment forces the patient to maintain balance under new conditions. These conditions allow the stimulation of the proprioceptive pathway by creating situations of imbalance that the patient must gradually control. For example, a patient standing with a swimming board placed under the foot develops proprioceptive information. As the swimming board tends to rise to the surface, the patient has to demonstrate good coordination to maintain it, strengthening his neuromuscular vigilance and work in balance (40). Moreover, hydrostatic pressure associated with the environment viscosity is the source of external sensory stimuli. Immersing part of the body results in developing a better perception of the position of the limbs. Similarly, the resistance to displacement created swirling sensations, which enhances exteroceptive or even proprioceptive information, and thus, allows a better awareness of the body pattern (40).

This work has several limitations. This study required 14 physiotherapists but to avoid variations by ensuring repeatability, harmonization of practices was carried out before the first patient was enrolled. Another limitation of this study was due to auto-questionnaires. This always results in subjectivity of responses and it is possible that some patients may overestimate or underestimate the functional capacity of the knee. The duration of management in aquatic rehabilitation specific to the study was short. Nevertheless, this duration had been chosen to align with the model of spa treatment in France, which lasts an average of 3 weeks.

CONCLUSION

This study shows that the innovative rehabilitation protocol (therapy incorporating both a dry and aquatic segment) improves proprioception and limits overcompensation on the limb contralateral to the operated limb. Even if patients undergoing a conventional rehabilitation protocol recover the delay after 6 months of surgery, faster and better recovery of knee functionality, following aquatic rehabilitation would in the short-term prevent injury to the contralateral limb as a result of overcompensation, and serve in the longer term to reduce the risk of osteoarthritis. The effectiveness of such rehabilitation could also enable patients to recover social, physical and professional activities earlier, which would also be of economic benefit, in particular with a reduction in work absence.

ETHICS STATEMENT

All participants gave written informed consent before the study, which was approved by the French Medical Ethical Committee

(Comité de Protection des Personnes de Lorraine) and registered in ClinicalTrials.gov with the identifier: NCT02225613.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors listed have made substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the orthopedics surgeons of the Médipôle Gentilly: Dr. Nicolas Hummer, Dr. Nicolas Paris, Dr. Frank Wein; of Louis Pasteur Clinic: Dr. Benoît Goudot, Dr. Frank Wein; of Saint-André Clinic: Dr. Maurice Morel; of the University Hospital: Dr. Manuela Barla, Dr. Rémi Belleville, Dr. Jean-Baptiste Gross,

Prof. Didier Mainard, Dr. Michael Mangin, Dr. Vincent Seivert. The authors thank the physiotherapists: Mr., Ms. Johnny Afonso, Patrick Boisseau, Xavier Celli, Jessy Courtier, Suzy Diller, Jean-Philippe De Jesus Goncalves, Antoine Fourcaux, Alexandre Ferry, Laureline Grajon, Elodie Jussy, Angélique Labeys, Thibaut Lombardet, Aurélie Muller, Camille Pons, Thomas Wysocki. The authors acknowledge Prof. Michel Boulangé, Dr. Jean-Marc Geoffroy, and Prof. Gisèle Kanny for their advices and help in this study. This study was promoted by the Nancy University Hospital, France, with a grant from the Métropole du Grand Nancy, France. In the Métropole du Grand Nancy, the authors would like to thank especially Dr. André Rossinot, president, former minister, and Ms. Marie-Catherine Tallot. The authors acknowledge Dr. Art Mallinson (Vancouver, BC, Canada) for its helpful advice in the final read-through of the manuscript.

REFERENCES

- Haute Autorité de Santé (HAS). Prise en charge thérapeutique des lésions méniscales et des lésions isolées du ligament croisé antérieur du genou chez l'adulte. *Service des bonnes pratiques professionnelles*. La Plaine – Saint-Denis: Haute Autorité de Santé (HAS) (2008). 105 p.
- Alidrisi N, Elyacoubi M, Berrada MS, Elbardouni A, Mahfoud M, Dahmani O, et al. Ligamentoplastie du LCA aux ischiojambiers sous arthroscopie avec fixation de l'implant par le système TLS. Principes et résultats de 38 cas. *J Traumatol Sport* (2011) 28:159–64. doi:10.1016/j.jts.2011.07.003
- Haute Autorité de Santé (HAS). Critères de suivi en rééducation et d'orientation en ambulatoire ou en SSR après ligamentoplastie du croisé antérieur du genou. *Service recommandations professionnelles, Service Evaluation médico-économique*. La Plaine – Saint-Denis: Haute Autorité de Santé (HAS) (2008). 85 p.
- Blalock D, Miller A, Tilley M, Wang J. Joint instability and osteoarthritis. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskeletal Disord* (2015) 18(8):15–23. doi:10.4137/CMAAMD.S22147
- Keays SL, Newcombe PA, Bullock-Saxton JE, Bullock MI, Keays AC. Factors involved in the development of osteoarthritis after anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* (2010) 38(3):455–63. doi:10.1177/0363546509350914
- Li RT, Lorenz S, Xu Y, Harner CD, Fu FH, Irrgang JJ. Predictors of radiographic knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* (2011) 39(12):2595–603. doi:10.1177/0363546511424720
- Meunier A, Odensten M, Good L. Long-term results after primary repair or non-surgical treatment of anterior cruciate ligament rupture: a randomized study with a 15-year follow-up. *Scand J Med Sci Sports* (2007) 17(3):230–7. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00547.x
- Harrison EL, Duenkel N, Dunlop R, Russell G. Evaluation of single-leg standing following anterior cruciate ligament surgery and rehabilitation. *Phys Ther* (1994) 74(3):245–52. doi:10.1093/ptj/74.3.245
- Shiraishi M, Mizuta H, Kubota K, Otsuka Y, Nagamoto N, Takagi K. Stabilometric assessment in the ACL reconstructed knee. *Clin J Sport Med* (1996) 6(1):32–9. doi:10.1097/00042752-199601000-00008
- Henriksson M, Ledin T, Good L. Postural control after ACL reconstruction and functional rehabilitation. *Am J Sports Med* (2001) 29(3):359–66. doi:10.1177/03635465010290031801
- Ochi M, Iwasa I, Uchio Y, Adachi N, Sumen Y. The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br* (1999) 81-B(5):902–6. doi:10.1302/0301-620X.81B5.9202
- Collette M, Cassard X. The tape locking screw technique (TLS): a new ACL reconstruction method using a short hamstring graft. *Orthop Traumatol Surg Res* (2011) 97:555–9. doi:10.1016/j.otsr.2011.03.016
- Jones KG. Reconstruction of the anterior cruciate ligament. A technique using the central one-third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am* (1963) 45:925–32. doi:10.2106/00004623-196345050-00003
- Tovin BJ, Wolf SL, Greenfield BH, Crouse J, Woodfin BA. Comparison of the effects of exercise in water and on land on the rehabilitation of patients with intra-articular anterior cruciate ligament reconstructions. *Phys Ther* (1994) 74(8):710–9. doi:10.1093/ptj/74.8.710
- Zamarioli A, Pezolato A, Mieli E, Shimano AC. The significance of water rehabilitation in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Fizjoterapia* (2008) 16(2):3–6. doi:10.2478/v10109-009-0013-z
- Lion A, Spada RS, Bosser G, Gauchard GC, Anello G, Bosco P, et al. Biological determinants of postural disorders in elderly women. *Int J Neurosci* (2013) 123(1):24–30. doi:10.3109/00207454.2012.722570
- Perrin P, Jeandel C, Perrin CA, Béné MC. Influence of visual control, conduction, and central integration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology* (1997) 43(4):223–31. doi:10.1159/000213854
- Kingma H, Gauchard GC, de Waele C, van Nchel C, Bisdorff A, Yelnick A, et al. Stocktaking on the development of posturography for clinical use. *J Vestib Res* (2011) 21(3):117–25. doi:10.3233/VES-2011-0397
- Shumway-Cook A, Horak F. Assessing the influence of sensory interaction on balance. *Phys Ther* (1986) 66(10):1548–50. doi:10.1093/ptj/66.10.1548
- Peultier L, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Zhang Z, Ray AC, et al. Influence of meteorological elements on balance control and pain in patients with symptomatic knee osteoarthritis. *Int J Biometeorol* (2017) 61:903. doi:10.1007/s00484-016-1269-x
- Tarantola J, Nardone A, Tacchini E, Schieppati M. Human stability improves with the repetition of the task: effect of foot position and visual condition. *Neurosci Lett* (1997) 228(2):75–8. doi:10.1016/S0304-3940(97)00370-4
- Vouriot A, Hannhart B, Gauchard G, Barot A, Ledin T, Mur JM, et al. Long-term exposure to solvents impairs vigilance and postural control in serigraphy workers. *Int Arch Occup Environ Health* (2005) 78:510–5. doi:10.1007/s00420-005-0609-7
- Gauchard GC, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin P. On the role of knee joint in balance control and posture strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait Posture* (2010) 32(2):155–60. doi:10.1016/j.gaitpost.2010.04.002
- Lion A, Bosser G, Gauchard GC, Djabballah K, Mallié JP, Perrin P. Exercise and dehydration: a possible role of inner ear in balance control disorder. *J Electromyogr Kinesiol* (2010) 20:1196–202. doi:10.1016/j.jelekin.2010.07.016
- Boureau F, Luu M. Les méthodes d'évaluation de la douleur clinique. *Doul Analg* (1988) 1(2):65–73. doi:10.1007/BF03006125
- Huskisson EC. Measurement of pain. *Lancet* (1974) 2(7889):1127–31. doi:10.1016/S0140-6736(74)90884-8
- Carter ND, Jenkinson TR, Wilson D, Jones DW, Torode AS. Joint position sense and rehabilitation in the anterior cruciate ligament deficient knee. *Br J Sports Med* (1997) 31:209–12. doi:10.1136/bjsm.31.3.209
- Chatrenet Y. Evaluations Clinique et fonctionnelle du genou. *EMC Kinésithérapie Médecine physique Réadaptation* (2013) 9(1):1–17. doi:10.1016/S1283-0887(12)43932-9
- Fischer-Rasmussen T, Jensen PE. Proprioceptive sensitivity and performance in anterior cruciate ligament-deficient knee joints. *Scand J Med Sci Sports* (2000) 10:85–9. doi:10.1034/j.1600-0838.2000.010002085.x

30. Good L, Roos H, Gottlieb DJ, Rentröm PA, Beynnon BD. Joint position sense is not changed after acute disruption of the anterior cruciate ligament. *Acta Orthop Scand* (1999) 70(2):194–8. doi:10.3109/17453679909011261
31. Missaoui B, Portero P, Bendaya S, Hankie O, Thoumie P. Posture and equilibrium in orthopedic and rheumatologic diseases. *Neurophysiol Clin* (2008) 38:447–57. doi:10.1016/j.neucli.2008.09.004
32. Neiger H, Genot C. Goniométrie articulaire, recherche des amplitudes articulaires et transcription des résultats. *Ann Kinesither* (1983) 10(6):215–9.
33. Royer A, Cecconello R. Bilans articulaires cliniques et goniométriques. Généralités. *EMC Podologie Kinésithérapie* (2004) 1(2):82–91. doi:10.1016/j.emck.2004.02.001
34. Abdel Kafi S, Deboeck G. Le test de marche de six minutes en réhabilitation respiratoire. *Rev Mal Respi* (2005) 22:5. doi:10.1016/S0761-8425(05)85692-X
35. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res* (1985) 198:43–9.
36. Hefti F, Müller W, Jakob RP, Stäubli HU. Evaluation of knee ligament injuries with IKDC form. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* (1993) 1(3–4):226–34. doi:10.1007/BF01560215
37. Roos EM, Roos HP, Lohmander LS, Ekdahl C, Beynnon BD. Knee injury and osteoarthritis outcome score (KOOS) – development of a self-administered outcome measure. *J Orthop Sports Phys Ther* (1998) 28(2):88–96. doi:10.2519/jospt.1998.28.2.88
38. Dauty M, Collon S, Dubois C. Change in posture control after recent knee anterior cruciate ligament reconstruction? *Clin Physiol Funct Imaging* (2010) 30:187–91. doi:10.1111/j.1475-097X.2010.00926.x
39. Harrison R, Bulstrode S. Percentage of weight bearing during partial immersion in the hydrotherapy pool. *Physiother Pract* (1987) 3:60–3. doi:10.3109/09593988709087741
40. Kemoun G, Watelain E, Carette P. Hydrokinésithérapie. *EMC Kinésithérapie-Médecine physique-Réadaptation* (2006) 2(3):1–28. doi:10.1016/S1283-0887(06)43711-7
41. Dragicevic-Cvjetkovic D, Jandric S, Bijeljic S, Palija S, Manojlovic S, Talic G. The effects of rehabilitation protocol on functional recovery after anterior cruciate ligament reconstruction. *Med Arch* (2014) 68(5):350–2. doi:10.5455/medarch.2014.68.350-352
42. Chevutschi A, Dengremont B, Lensel G, Thevenon A. La balnéothérapie au sein de la littérature: propriété de l'eau. *Kinesither Rev* (2007) 7:14–20. doi:10.1016/S1779-0123(07)70482-5
43. Becker BE. Aquatic therapy: scientific foundations and clinical rehabilitation applications. *PM R* (2009) 1:859–72. doi:10.1016/j.pmrj.2009.05.017
44. Fugisawa H, Suenaga N, Minami A. Electromyographic study during isometric exercise of the shoulder in head-out water immersion. *J Shoulder Elbow Surg* (1998) 7:491–4. doi:10.1016/S1058-2746(98)90200-2
45. Kelly BT, Roskin LA, Kirkendall DT, Speer KP. Shoulder muscle activation during aquatic and dry land exercise in nonimpaired subjects. *J Orthop Sports Phys Therapy* (2000) 30:204–10. doi:10.2519/jospt.2000.30.4.204
46. Pöyhönen T, Keskinen KL, Hautala A, Savolainen J, Mälikä E. Human isometric force production and electromyogram activity of knee extensor muscles in water and on dry land. *Eur J Appl Phys* (1999) 80:52–6. doi:10.1007/s004210050557
47. Beard DJ, Dodd CA. Home or supervised rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *J Orthop Sports Phys Ther* (1998) 27(2):134–43. doi:10.2519/jospt.1998.27.2.134
48. Shelbourne KD, Gray T. Anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon graft followed by accelerated rehabilitation. A two-to nine-year followup. *Am J Sports Med* (1997) 25(6):786–95. doi:10.1177/036354659702500610
49. Timm KE. The clinical and cost-effectiveness of two different programs for rehabilitation following ACL reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* (1997) 25(1):43–8. doi:10.2519/jospt.1997.25.1.43

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2017 Peultier-Celli, Mainard, Wein, Paris, Boisseau, Ferry, Gueguen, Chary-Valckenaere, Paysant and Perrin. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

ANNEXE 2 – POSTER PRÉSENTÉ AU CONGRÈS

POSTURE, ÉQUILIBRE, MOUVEMENT, 2016

(Prix de la meilleure communication affichée)

REEDUCATION EN MILIEU AQUATIQUE APRES LIGAMENTOPLASTIE DU GENOU CHEZ LE SPORTIF

L. Peultier¹, D. Mainard², F. Wein³, N. Paris³, P. Boisseau⁴, J. Paysant⁵, P. Perrin¹

¹ EA 3450 DevAH – Développement, Adaptation et Handicap, Université de Lorraine, Nancy, France

² Service de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, CHRU, Nancy, France

³ Service de Chirurgie Orthopédique, Polyclinique de Gentilly, Nancy, France

⁴ IFMK – Institut Lorrain de Formation en Masso-Kinésithérapie, Nancy, France

⁵ IRR – Institut Régional de médecine physique et de Réadaptation, Nancy, France

INTRODUCTION

Nancy Thermal : une histoire qui coule de source...

1909

Premier forage

1911

Autorisation d'exploitation de l'eau du forage par l'Académie nationale de médecine

1913

Inauguration de Nancy Thermal

Fin 1930

Abandon du thermalisme à Nancy-Thermal

2007

Début du partenariat Grand Nancy – CHRU de Nancy

2010

Quatrième forage sur le site

2011

Réhabilitation des locaux historiques de thermalisme

2012 -

Etude clinique arthrose du genou

Mai 2014

Avis favorable de l'Académie nationale de médecine

Juillet 2014

Arrêté préfectoral d'autorisation d'exploiter la source minérale naturelle à des fins thérapeutiques

Sept. 2014

Lancement de l'étude clinique à destination des sportifs opérés des ligaments croisés du genou

Sports de pivot contact :

- Sports collectifs : football, rugby, handball, basketball
- Arts martiaux : judo

Sports de pivot sans contact :

- Sports de glisse : ski
- Sports de raquettes : tennis, badminton, squash

Rupture du ligament croisé

Afférences visuelles

Afférences vestibulaires

Somesthésie + proprioception + extéroception

Système nerveux central

Stabilisation du regard

Stabilisation de la posture

Rééducation

Plasticité neuronale

Reprogrammation sensori-motrice

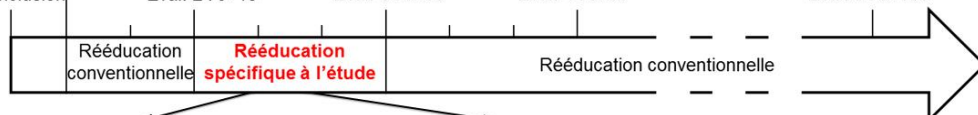
Retour aux activités sportives, sociales et professionnelles

PATIENTS ET METHODE

- 81 patients ayant bénéficié d'une reconstruction chirurgicale, répartis dans deux groupes de rééducation :

Intervention chirurgicale : J0

Eval. 1 : inclusion Eval. 2 : J+15 Eval. 3 : J+36 Eval. 4 : J+60 Eval. 5 : J+180



Protocole de rééducation conventionnelle :
rééducation à sec en cabinet libéral (n = 43)

Protocole à sec réduit + rééducation en milieu thermal :
techniques de kinésithérapie en environnement thermal (n = 38)

Evaluations

=



Analyse du contrôle postural sur plateforme de posturographie (Medicapteurs, Nice), avec sensibilisation par modification des afférences somato-sensorielles (plateau mousse) et des afférences visuelles (lunettes de réalité virtuelle, RM Ingénierie, Rodez).

+

- Evaluation de la douleur
- Amplitudes articulaires
- Force musculaire
- Proprioception
- Analyse du mouvement
- Performance de marche
- Questionnaires

RESULTATS

Etat fonctionnel en fin de rééducation pour chaque groupe :

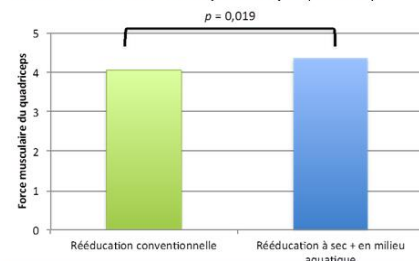
	Rééducation conventionnelle	Rééducation à sec + en milieu thermal
Contrôle postural	↗	↗
Douleur	↘	↘
Amplitudes articulaires	↗	↗
Force musculaire	↗	↗
Proprioception	NS	↗
Analyse du mouvement	NS	NS
Performance de marche	↗	↗
Qualité de vie	↗	↗

NS : non significatif

Rééducation conventionnelle vs rééducation à sec + en milieu thermal :

- **Amplitudes articulaires** : entre les évaluations 2 et 3, les patients suivant la rééducation à sec + en milieu aquatique progressent plus vite en flexion ($p = 0,024$).

- **Force musculaire** du quadriceps (Eval. 4)



DISCUSSION ET CONCLUSION

Nécessité d'inclure l'effectif initialement déterminé sur le plan statistique (128 patients) afin d'évaluer l'efficacité d'un protocole de rééducation innovant sur un retour aux activités sociales, sportives et professionnelles plus précoce.

Références :

- Peultier L, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Zhang Z, Rat AC, Gueguen R, Paysant J, Perrin P. Influence of meteorological elements on balance control and pain in patients with symptomatic knee osteoarthritis. Int J Biometeorol. 2017.
- Zhang Z, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Rat AC, Paysant J, Perrin P. Diurnal variation on balance control in patients with symptomatic knee osteoarthritis. Arch Gerontol Geriatr. 2015.

ANNEXE 3 - ARTICLE IN INTERNATIONAL JOURNAL OF
BIOMETEOROLOGY, 2017

Influence of meteorological elements on balance control and pain in patients with symptomatic knee osteoarthritis

Laetitia Peultier^{1,2}  · Alexis Lion^{1,2,3} · Isabelle Chary-Valckenaere^{4,5} · Damien Loeuille^{4,5} · Zheng Zhang^{1,6} · Anne-Christine Rat^{4,7} · René Gueguen¹ · Jean Paysant^{1,8} · Philippe P. Perrin^{1,2,9}

Received: 31 May 2016 / Revised: 22 October 2016 / Accepted: 25 October 2016 / Published online: 10 November 2016
© ISB 2016

Abstract This study aimed to determine if pain and balance control are related to meteorological modifications in patients with knee osteoarthritis (OA). One hundred and thirteen patients with knee OA (mean age = 65 ± 9 years old, 78 women) participated in this study. Static posturography was performed, sway area covered and sway path traveled by the center of foot pressure being recorded under six standing postural conditions that combine three visual situations (eyes open, eyes closed, vision altered) with two platform situations (firm and foam supports). Knee pain score was assessed using a visual analog scale. Balance control and pain measurements recorded in the morning were correlated with the meteorological data. Morning and daily

values for temperature, precipitation, sunshine, height of rain in 1 h, wind speed, humidity, and atmospheric pressure were obtained from the nearest data collecting weather station. The relationship between postural control, pain, and weather variations were assessed for each patient on a given day with multiple linear regressions. A decrease of postural stability was observed when atmospheric pressure and maximum humidity decreased in the morning ($p < 0.05$) and when atmospheric pressure decreased within a day ($p < 0.05$). Patient's knee pain was more enhanced when it is warmer in the morning ($p < 0.05$) and when it is wetter and warmer within a day ($p < 0.05$). The relationship between weather, pain, and postural control can help patients and health professionals to better manage daily activities.

✉ Philippe P. Perrin
philippe.perrin@univ-lorraine.fr

Keywords Postural balance · Knee osteoarthritis · Frail older adult · Pain · Meteorology

¹ EA 3450, Development, Adaptation and Disadvantage, Faculty of Medicine and UFR STAPS, University of Lorraine, F-54600 Villers-lès-Nancy, France

² Laboratory for the Analysis of Posture, Equilibrium and Motor Function (LAPEM), University Hospital of Nancy, F-54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

³ Sports Medicine Research Laboratory, Luxembourg Institute of Health, L-1460 Strassen, Luxembourg

⁴ Department of Rheumatology, University Hospital of Nancy, F-54511 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

⁵ IMoPA UMR-CNRS, 7365 Paris, France

⁶ Department of Orthopaedics, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, China

⁷ INSERM, CIC-EC, CIE6, F-54000 Nancy, France

⁸ Regional Institute of Physical Medicine and Rehabilitation, F-54042 Nancy Cedex, France

⁹ Department of Oto-Rhino-Laryngology, University Hospital of Nancy, F-54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Introduction

Osteoarthritis (OA) is a common degenerative joint disease frequently accompanied by pain, functional impairment (Woolf and Pfleger 2003), and postural control impairments (Gauchard et al. 2010). OA has been found closely related to weather changes (Renstschler et al. 1929). It is an old and popular belief that OA symptoms are influenced by weather conditions. Between one and two thirds of the patients with rheumatic disorders believe that their symptoms are influenced by the weather (von Mackensen et al. 2005). This certainty is very deeply rooted in many cultures. For example in China language, “rheumatism” is translated by “Fēngshī zhèng” (風濕症), “Fēng” (風) meaning “wind” and “Shī” (濕) meaning “wet.” In several countries (e.g., Germany and Japan), television weather reports entitled “Health weather” warn patients about the pain they might feel by weather

changes. Despite the frequent assertion that the weather conditions change the intensity of pain in OA, this influence is difficult to confirm and often controversial (Figueiredo et al. 2011; Harris 1984; Quick 1997). To our knowledge, 11 studies investigated the effect of weather on pain in patients with OA during the three last decades (Table 1) (Aikman 1997; Brennan et al. 2012; Cay et al. 2011; Clarke and Nicholl 1991; Dorleijn et al. 2014; Guedj and Weinberger 1990; McAlindon et al. 2007; Sibley 1985; Strusberg et al. 2002; Timmermans et al. 2015; Vergés et al. 2004; Wilder et al. 2003). Follow-up time varied from 1 to 24 months. The number of studied patients also ranged from 10 to 222. Among the different studied weather elements, atmospheric pressure was reported as having the most influence on the OA symptoms and precipitation as having the least effect on OA in 8 of the 11 studies mentioned, sunshine and the wind speed being insufficiently analyzed. For some, the most severe pain is associated with anticyclonic situations (Lawrence and Molyneux 1968), whereas for others, it is associated with low-pressure situations (Hollander and Yeostros 1963). According to Amor (1992), OA is more painful in a damp and cold atmosphere than in a warm and dry environment.

In addition, balance control is impaired in patients with knee OA compared to matched healthy individuals (Gauchard et al. 2010; Hassan et al. 2011). This function, which is an integral component of many ordinary activities, is regulated through mechanisms of maintaining posture and stabilization, requiring management of body orientation in space by central processing of visual, vestibular, and somatokinesthetic afferences (Massion 1994). The knee joint acts overall as an important neurosensorial structure. Indeed,

knee contains ligaments and menisci that provide afferent inputs via the mechanoreceptors and muscles acting on the joint (Duman et al. 2012). Therefore, balance impairment in patients with OA may be explained by muscular, tendinous, ligamentous, and meniscal changes resulting in impaired proprioception and performance-based activity limitations (Sharma 1999). However, the effect of meteorological factors on balance control has not been explored in patients with knee OA. Exploring weather-related postural stability in patients with knee OA therefore seems important in the management of knee OA, not only for day life activities but also for prevention of fall-related injuries, especially in older adult patients. This study aimed to determine if pain and balance control disturbances could be related to meteorological factors.

Methods

Participants

One hundred and thirteen subjects (mean age = 65.3 ± 9.2 years, 78 women) participated in this study. All subjects had knee OA (unilateral or bilateral femorotibial lesions) according to American College of Rheumatology criteria (Altman et al. 1986). Inclusion criteria were as follows: knee OA unilateral or bilateral femorotibial lesions, a visual analog scale (VAS) for pain greater than 30 mm, and Kellgren and Lawrence (1957) radiological classification greater than or equal to grade 2. Participants were excluded if they had isolated femoropatellar OA; indications of knee joint surgery including replacement in this year; other musculoskeletal diseases; severe depressive

Table 1 OA and meteorology elements: review of the literature

Author(s)	Follow-up time	Patients (n)	Meteorological variables					
			T	P	S	WS	RH	AP
Sibley (1985)	1 month	35	–	–	NA	–	–	–
Guedj and Weinberger (1990)	1 month	24	+	+	NA	NA	–	+
Clarke and Nicholl (1991)	2 months	53	NA	NA	NA	NA	–	–
Aikman (1997)	1 month per season	25	+	–	NA	+	+	+
Strusberg et al. (2002)	12 months	52	+	NA	NA	NA	+	–
Wilder et al. (2003)	23 months	154	–	–	NA	NA	NA	+
Vergés et al. (2004)	1 month	80	–	NA	NA	NA	–	+
McAlindon et al. (2007)	3 months	200	+	–	NA	NA	–	+
Cay et al. (2011)	8 months	10	+	–	–	–	–	–
Brennan et al. (2012)	1 month	53	–	–	NA	NA	NA	+
Dorleijn et al. (2014)	24 months	222	–	–	–	–	+	+
Timmermans et al. (2015)	18 months	810	+	–	NA	–	+	–

PubMed/Medline were searched during the three last decades. The following search criteria were used: “osteoarthritis*[All Fields] AND (“weather”[All Fields] OR “meteorolog*[All Fields])”

T temperature, P precipitation, S sunshine, WS wind speed, RH relative humidity, AP atmospheric pressure, + positive correlation, – negative correlation, NA not assessed

syndrome, psychosis; use of massage, physiotherapy, functional rehabilitation, and acupuncture of the targeted knee within the last month; changes in non-steroidal anti-inflammatory drugs in the past 5 days; changes in analgesics in the last 24 h; changes in symptomatic slow-acting drug in OA in the past 3 months; and intra-articular injection of corticoids within the last month or hyaluronic acid in the past 3 months in the targeted knee. Age, sex, height, and weight were recorded, and body mass index (BMI) was calculated. Informed consent was obtained from all individual participants included in the study, which was approved by the French Medical Ethical Committee (*Comité de Protection des Personnes de Lorraine*).

Posturography

Balance control tests were carried out in a specially designed soundproof room for posturography recordings (*Agence Régionale de Santé de Lorraine* agreement for research). A vertical force platform, fitted with three strain gauge force transducers (Médicapture, Balma, France), was used to perform posturography and to provide a measurement of the body sway in terms of displacement of the center of foot pressure (CoP) in a two-dimensional horizontal plane (recording time 25.6 s, equipment containing an analog-digital converter of 16 bits and a sampling frequency of the CoP of 40 Hz) (Dumas et al. 2013; Legrand et al. 2012; Lion et al. 2014). The signals from the transducers were amplified, converted from analog into digital form, and then recorded on a computer. The sway area (in mm²) covered by the CoP trajectory and the sway path (in mm) traveled by CoP were used to quantify postural sway (Fig. 1). Low values for sway path and area parameters are representative of good posture control (Perrin et al. 1999; Tarantola et al. 1997). Each subject was asked to stand upright on the platform, barefoot, feet abducted at 30°, heels separated by 3 cm, arms along the body, remaining as stable as possible, and breathing normally (Lion et al. 2013; Perrin et al. 1997). Subjects remain standing on the platform in six conditions of

test (C1 to C6) that combines three visual situations (eyes open, eyes closed, vision altered (sway-referenced visual surround by virtual reality goggles, RM Ingénierie, Rodez, France)) with two platform situations (firm support, foam support). Basic measurements of the participant's stability were done on firm support with eyes open (C1), eyes closed (C2), and altered vision (C3). Enhanced measurements of balance were performed eyes open, eyes closed, and vision altered on foam support (C4, C5, and C6), the latter modifying the somatosensory cues (Shumway-Cook 1994; Shumway-Cook and Horak 1986). In order to evaluate the participant's ability to adapt and adjust balance control performance correctly and rapidly to change external and internal constraints, a mean equilibrium score (MES) was calculated by adding the scores of each condition and dividing that sum by six (Herpin et al. 2009; Vouriot et al. 2005).

Pain assessment

The intensity of affected knee joint pain was assessed with the VAS for pain (Shumway-Cook and Horak 1986). The VAS consisted of a 100-mm line whose endpoints were designated as "no pain" (at 0 mm) and "unbearable pain" (at 100 mm), respectively. The patients were requested before the balance control test to locate the level of knee pain on the line with a small vertical mark.

Meteorology

Meteorological data was obtained from a French weather website ("Info climat"). The measurement station is located at Nancy-Essey (suburb of Nancy), near of the balance control laboratory, east of France (48.69° N, 6.22° E) at an altitude of 212 m (www.infoclimat.fr). All the parameters recorded by the meteorological station were taken into account: minimum and maximum temperature (°C), total precipitation (mm), height of rain in 1 h (mm), total duration of sunshine (h), maximum velocity of the wind (km h⁻¹), minimum and maximum percentage of humidity, humidity at 12 o'clock, humidity range, maximum and minimum atmospheric pressure corrected according to sea level, and atmospheric pressure range (hPa) (Cay et al. 2011).

Procedure

Postural control and pain were measured between 8 a.m. and noon, especially to limit the diurnal variation of postural control (Zhang et al. 2015) with one recording per patient (to avoid learning effect on postural control), the duration of the whole study being of 9 months. Meteorological data were measured between 8 a.m. and noon (morning measurements). Moreover, meteorological data during the entire day, i.e., between 1 a.m. (before measurements) and 2 a.m. (after measurements), were recorded. Among elements related to

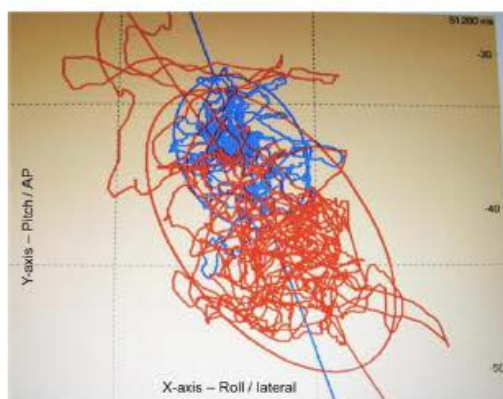


Fig. 1 Posturography test. Sway path traveled and area covered (confidence ellipse covering 90% of the points) by the center of foot pressure, eyes open (condition C1) and eyes closed (conditions C2, higher values)

meteorological conditions, data of precipitation and duration of sunshine taken on the entire day were averaged. For the other parameters, the minimum or maximum values of each parameter were recorded (Fig. 2).

Statistical analysis

A first model (model 1) to assess the relation between the main outcome variables (postural control: MES sway path and MES sway area) and the independent variables (morning meteorological parameters; anthropometric variables: age, gender, BMI, and pain) was made using multiple regression analysis. Model 2 was similar to model 1, except for the meteorological parameters which were recorded during the entire day. A third model (model 3) to assess the relation between pain and the independent variables (morning meteorological parameters; anthropometric variables: age, gender, BMI) was made using multiple regression analysis. Model 4 was similar to model 3, except for the meteorological parameters which were recorded during the entire day. Variables were entered in the models using a forward selection method with a $p < 0.05$ threshold. A 0.05 p level of significance was set, and SPSS Statistics (IBM, Armonk, NY, USA) version 19.0 was used for all analysis.

Results

Population and weather

Mean VAS score was 54.7 mm (SD = 17.4), and mean BMI was 30.0 (SD = 5.5). Mean sway path was 527.9 mm (SD = 295.8 mm), and mean sway area was 379.3 mm² (SD = 248.7 mm²). The atmospheric conditions measured during the entire study period are presented in Table 2.

Effect of meteorology on postural control

As shown in Table 3, several weather parameters affect MES value of postural control. With meteorological measurements

taken in the morning (model 1), when atmospheric pressure decreased, an increase of MES in sway path ($p = 0.027$) and sway area ($p = 0.015$) was observed and when the maximum humidity decreased, MES sway path increased ($p = 0.027$). In addition, with meteorological parameters measured during the entire day (model 2), a decrease of atmospheric pressure was associated with the higher MES sway path ($p = 0.024$).

Effect of age and sex on postural control

A significant increase of sway path and sway area was observed with age (Table 3). In model 1, for each additional year, sway path increased by 10.2 mm ($p < 0.001$) and sway area increased by 5.9 mm² ($p = 0.013$). In model 2, for each additional year, sway path increased by 9.3 mm ($p = 0.003$) and sway area increased by 5.9 mm² ($p = 0.026$). Statistical analysis showed that the sway area of men was larger than for women in models 1 ($p = 0.011$) and 2 ($p = 0.032$).

Effect of meteorology on pain

Intensity of knee pain differed with variations of the atmospheric conditions measured (Table 4). With meteorological measurements taken at the morning (model 3), pain intensity was higher when minimum temperature increased ($p = 0.027$). With meteorological measurements recorded during the entire day, pain intensity was higher when minimum humidity increased ($p = 0.021$) and maximum temperature increased ($p = 0.004$) (model 4).

Discussion

The most important findings of the study in patients with knee OA were the postural control impairment when the atmospheric pressure decreases during morning and more generally during the entire day and when maximum humidity decreased during morning. The other meteorological parameters had no influence on postural control. Furthermore, independently of meteorological parameters, postural control deteriorates

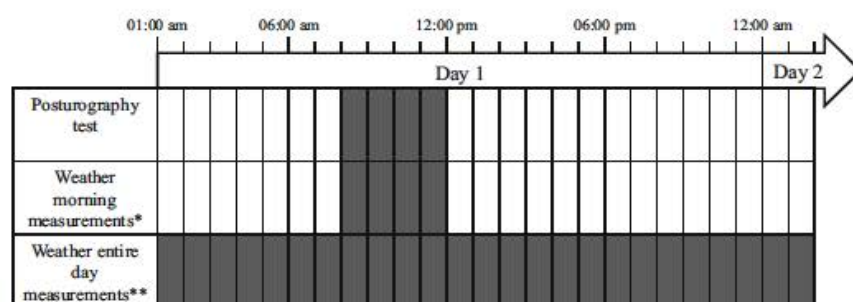


Fig. 2 Recording period for posturography and weather parameters. Asterisk pertains to temperature max and min, precipitation, height of rain in 1 h, wind speed, humidity max and min, humidity at 12 o'clock,

and atmospheric pressure. Double asterisk pertains to temperature max and min, precipitation, sunshine, height of rain in 1 h, wind speed, humidity max and min, humidity at 12 o'clock, and atmospheric pressure

Table 2 Measured atmospheric conditions during the study period (9 months)

	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Sunshine (h)	Height of rain in 1 h (mm)	Wind speed (km h ⁻¹)	Humidity (%)	Humidity at 12 o'clock (%)	Atmospheric pressure (hPa)
Morning								
Minimum	-0.30	0.00		0.00	13.00	39.00	39.00	1003.70
Maximum	30.00	8.50		5.70	48.20	99.00	96.00	1033.70
Mean (SD)	14.84 (7.17)	0.20 (0.86)		0.12 (0.56)	28.20 (9.64)	73.56 (6.95)	62.31 (14.97)	1019.11 (5.34)
Entire day								
Minimum	-4.40	0.00	0.00	0.00	18.50	25.00	39.00	1002.90
Maximum	34.00	21.40	14.20	13.70	70.40	99.00	96.00	1033.70
Mean (SD)	15.7 (8.36)	1.46 (3.27)	7.16 (3.99)	0.78 (1.8)	40.92 (12.60)	68.95 (25.81)	62.31 (14.96)	1018.47 (5.73)

Table 3 Multiple linear regressions—weather and anthropometric variables related to posturography data (sway path and sway area)

	Sway path		Sway area	
	B	P value	B	P value
Model 1				
Age	0.318	<0.001	0.219	0.013
Sex			-0.229	0.011
Pressure change	-0.213	0.017	-0.223	0.012
Humidity max			-0.220	0.014
Model 2				
Age	0.284	0.003	0.212	0.026
Sex			-0.205	0.032
Pressure change	-0.221	0.018		

Model 1: relation between postural control, anthropometric variables (age, gender, BMI, and pain), and the meteorological parameters recorded in the morning. Model 2: relation between postural control, anthropometric variables (age, gender, BMI, and pain), and the meteorological parameters recorded during the entire day

B unstandardized coefficient

with aging and is worse in men compared to women postural control. Patient's knee pain was more pronounced when minimum temperature increased during the morning and when minimum humidity or maximum temperature increased in the entire day.

A decrease in atmospheric pressure can be accompanied by stiffness of the joint and an increase of the nociceptive response; atmospheric pressure changes can also cause a transient imbalance of the body pressure, making nerve endings more sensitive and causing more pain (Jamison et al. 1995). Chamber experiments were performed showing that the pressure drop and the increase in moisture lead to an increase in painful sensations (Hollander 1961). The very short period of time during which the subject is exposed to weather variations and sudden changes imposed is not enough significant to be

Table 4 Multiple linear regressions—weather and anthropometric variables related to pain

	VAS for pain	
	B	P value
Model 3		
Temperature min	0.208	0.027
Model 4		
Temperature max	0.298	0.004
Humidity min	0.238	0.021

Model 3: relation between pain, anthropometric variables (age, gender, BMI), and the meteorological parameters recorded in the morning. Model 4: relation between pain, anthropometric variables (age, gender, BMI), and the meteorological parameters recorded during the entire day

B unstandardized coefficient

detectable by the subject. Moreover to our knowledge, our study is the first study to examine the relationship between postural control and weather conditions in older people with knee OA. Posturography measurements reduce the biases related to subjective data of perception of pain. It has been shown in this study that humidity and ambient temperature influence severity of knee pain. However, the relation between joint pain and weather factors has been difficult to confirm. Indeed, many studies had already established the relation of pain perception and weather changes with self-administered questionnaires through the VAS (Cay et al. 2011), but they did not use objective values, and the results are conflicting. For example, only Guedj and Weinberger (1990) showed that precipitation had an effect on pain. For many authors (Aikman 1997; Cay et al. 2011; Guedj and Weinberger 1990; McAlindon et al. 2007; Strusberg 2002), temperature has an impact on the pain, while for other authors (Brennan et al. 2012; Dorleijn et al. 2014; Sibley 1985; Whipple et al. 1987; Wilder et al. 2003), temperature has no effect on pain. But, it has been shown that when temperature decreases or weather is wet, body parts such as bones, muscles, and tendons have variable density, can expand or contract thereby increasing pain (Jamison et al. 1995).

Balance control stability decreased with aging. Advancing age plays an important role in the development of OA and simultaneously increases the risk of falling. Postural sway was found to significantly increase with aging during static posturographic test, and aging affects multiple sensory inputs, as well as the musculoskeletal system and central nervous system ability to perform sensorimotor integration (Perrin et al. 1997). Knee proprioception is less accurate in older adult patients with knee OA compared to older adult control participants and in healthy older participants compared to younger participants (Altman 1986). With the evolution of OA, structural changes in the knee joint induce mechanical stability changes at the ankle-subtalar joint complex (Hubbard et al. 2010). Moreover, balance impairment increases with age due to both the loss of strength of ankle dorsiflexor muscles and decreasing tactile sensitivity, joint position sense, and proprioception (Whipple et al. 1987). In addition, significant differences were observed between genders. Sway area is higher in males than in females which means that balance control was less performant in males. Indeed, many studies have shown that males had a poorer postural control than females especially in the elderly in case of visual and vestibular conflicts (Faraldo-Garcia et al. 2011; Matheson et al. 1999).

Study limitations

Some limitations of this study have to be noted. This study took place in a single geographical site, resulting in limited geographic and meteorological variability. Our study was conducted in a plain region in which atmospheric pressure

variations are lower compared to a mountainous area. Nevertheless, significant differences were observed on postural control according to atmospheric pressure variations, whereas these atmospheric pressure variations were small and thus less perceptible by the patient.

Our study did not consider measurements of practice of physical and sporting activities (Quicke et al. 2015), time to rest, and spend time outdoors. Indeed, patients who are more physically active may seek more their joints which may promote the emergence of pain. Similarly, staying indoors during periods of extreme cold or, conversely, heavy heat could limit the effects of this exposure, explaining that temperature is correlated to pain (subjective parameters) and not to posturography values (objective parameters). Thus, during these extremes of outdoor temperatures, the effect might only manifest among individuals who venture outdoors (McAlindon et al. 2007). In addition, patient's sleep time was unknown, as sleep deprivation is related to postural impairments.

Future research must be considered for each patient time spent outside and inside and consider the differences in climate between the two environments. Future research should also focus on physical activities for patients who can influence postural control strategies.

Conclusion

The association between balance control and atmospheric pressure and humidity changes suggest that weather conditions affect balance control of patients with knee OA. In addition, the results show that the influence of humidity on joint pain is stronger when the temperature increases. It could have a noticeable effect of the weather, on both postural control and pain in patients with knee OA. Knowledge about the relationship between weather and pain or postural control can help patients with knee OA to better manage their daily activities and health professionals to better understand and manage the changes in balance control and pain.

Acknowledgements The authors acknowledge the staff of the rheumatology department for participant recruitment; Ms. Amandine Vallata and the staff of Clinical Epidemiology Center (CEC), especially Prof. Francis Guillemin, Head of the CEC, for project management; and Prof. Michel Boulangé for his advices in medical climatology.

This study was promoted by the Nancy University Hospital, France, with a grant from the *Communauté Urbaine du Grand Nancy*, France.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest.

Funding information Role: transportation costs for patients and emergency trolley.

References

- Aikman H (1997) The association between arthritis and the weather. *Int J Biometeorol* 40(4):192–199
- Altman R, Asch E, Bloch D, Bole G, Borenstein D, Brandt K et al (1986) Development of criteria for the classification and reporting of osteoarthritis. Classification of osteoarthritis of the knee. Diagnosis and therapeutic criteria committee of the American rheumatism association. *Arthritis Rheum* 29(8):1039–1049
- Amor B (1992) Les rhumatismes. Hermann, Presses Universitaire de France, Paris, 128p
- Brennan SA, Hamey T, Queally JM, McGoon JO, Gormley IC, Shannon FJ (2012) Influence of weather variables on pain severity in end-stage osteoarthritis. *Int Orthop* 36(3):643–646. doi:10.1007/s00264-011-1304-9
- Cay HF, Sezer I, Firat MZ, Kaçar C (2011) Which is the dominant factor for perception of rheumatic pain: meteorology or psychology? *Rheumatol Int* 31(3):377–385. doi:10.1007/s00296-009-1279-7
- Clarke AM, Nicholl J (1991) Does the weather affect the osteoarthritic patient? *Br J Rheumatol* 30(6):477
- Dorleijn DMJ, Luijsterburg PAJ, Burdorf A, Rozendaal RM, Verhaar JAN, Bos PK et al (2014) Associations between weather conditions and clinical symptoms in patients with hip osteoarthritis: a 2-year cohort study. *Pain* 155(4):808–813. doi:10.1016/j.pain.2014.01.018
- Duman I, Taskaynatan MA, Mohur H, Tan AK (2012) Assessment of the impact of proprioception exercises on balance and proprioception in patients with advanced knee osteoarthritis. *Rheumatol Int* 32(12):3793–3798. doi:10.1007/s00296-011-2272-5
- Dumas G, Lion A, Gauchard GC, Herpin G, Magnusson M, Perrin PP (2013) Clinical interest of postural and vestibule-ocular reflex changes induced by cervical muscles and skull vibration in compensated unilateral vestibular lesion patients. *J Vest Res* 23(1):41–49. doi:10.3233/VES-130468
- Faraldo-Garcia A, Santos-Pérez S, Labella-Caballero T, Soto-Varela A (2011) Influence of gender on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Acta Otorinolaringol* 62(6):333–338. doi:10.1016/j.otorri.2011.03.003
- Figueiredo ECQ, Figueiredo GC, Dantas RT (2011) Influence of meteorological elements on osteoarthritis pain: a review of the literature. *Rev Bras Reumatol* 51(6):616–628
- Gauchard G, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin PP (2010) On the role of knee joint in balance control and postural strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait Posture* 32(2):155–160. doi:10.1016/j.gaitpost.2010.04.002
- Guedj D, Weinberger A (1990) Effect of weather conditions on rheumatic patients. *Ann Rheum Dis* 49(3):158–159
- Harris C (1984) Seasonal variation in depression and osteoarthritis. *J R Coll Gen Pract* 34(265):436–439
- Hassan B, Mockett S, Doherty M (2011) Static postural sway, proprioception, and maximal voluntary quadriceps contraction in patients with knee osteoarthritis and normal control subjects. *Ann Rheum Dis* 60(6):612–618
- Herpin G, Gargouri I, Gauchard GC, Nisse C, Khadhraoui M, Elleuch B, Zmirou-Navier D, Perrin PP (2009) Effect of chronic and subchronic organic solvents exposure on balance control of workers in plant manufacturing adhesive materials. *Neurotox Res* 15:179–186
- Hollander JL (1961) The controlled-climate chamber for study of the effects of meteorological changes on human diseases. *Trans N Y Acad Sci* 24:167–172
- Hollander JL, Yeostos SJ (1963) The effect of simultaneous variations of humidity and barometric pressure on arthritis. *Bull Am Met Soc* 44:489–494
- Hubbard TJ, Hicks-Little C, Cordova M (2010) Changes in ankle mechanical stability in those with knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil* 91(1):73–77. doi:10.1016/j.apmr.2009.09.015
- Infoclimat - La météo en temps réel. Available from: www.infoclimat.fr
- Jamison RN, Anderson KO, Slater MA (1995) Weather changes and pain: perceived influence of local climate on pain complaint in chronic pain patients. *Pain* 61(2):309–315
- Kellgren JH, Lawrence JS (1957) Radiological assessment of osteoarthritis. *Ann Rheum Dis* 16(4):494–502
- Lawrence JS, Molyneux M (1968) Degenerative joint disease among populations in Wensleydale, England and Jamaica. *Int J Biometeor* 12(2):163–175
- Legrand A, Bui-Quoc E, Doré-Mazars K, Lemoine C, Gérard CL, Bucci MP (2012) Effect of a dual task on postural control in dyslexic children. *PLoS One* 7(4):e35301. doi:10.1371/journal.pone.0035301
- Lion A, Spada RS, Bosser G, Gauchard GC, Anello G, Bosco P et al (2013) Biological determinants of postural disorders in elderly women. *Int J Neurosci* 123(1):24–30. doi:10.3109/00207454.2012.722570
- Lion A, Spada RS, Bosser G, Gauchard G, Anello G, Bosco P et al (2014) “Postural first” principle when balance is challenged in elderly people. *Int J Neurosci* 124(8):558–566
- Massion J (1994) Posture control system. *Curr Opin Neurobiol* 4(6):877–887
- Matheson AJ, Darlington CL, Smith PF (1999) Further evidence for age-related deficits in human postural function. *J Vestib Res* 9(4):261–264
- McAlindon T, Formica M, Schmid CH, Fletcher J (2007) Changes in barometric pressure and ambient temperature influence osteoarthritis pain. *Am J Med* 120(5):429–434
- Perrin PP, Jeandel C, Perrin CA, Béné MC (1997) Influence of visual control, conduction, and central integration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology* 43(4):223–231
- Perrin PP, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C (1999) Effects of physical and sporting activities on balance control in elderly people. *Br J Sports Med* 33(2):121–126
- Quick DC (1997) Joint pain and weather. A critical review of the literature. *Minn Med* 80(3):25–29
- Quicke JG, Foster NE, Thomas MJ, Holden MA (2015) Is long-term physical activity safe older adults with knee pain?: a systematic review. *Osteoarthritis Cartil* 23(9):1445–1456. doi:10.1016/j.joca.2015.05.002
- Renstschler E, Vanzant F, Rowntree L (1929) Arthritic pain in relation to changes in weather. *JAMA* 92:1995–2000
- Sharma L (1999) Proprioceptive impairment in knee osteoarthritis. *Rheum Dis Clin N Am* 25(2):299–314
- Shumway-Cook A (1994) Vestibular rehabilitation in traumatic brain injury. In: Herdman SJ (ed) *Vestibular rehabilitation*. Davis Company, Philadelphia, pp. 347–359
- Shumway-Cook A, Horak F (1986) Assessing the influence of sensory interaction on balance. *Phys Ther* 66(10):1548–1550
- Sibley JT (1985) Weather and arthritis symptoms. *J Rheumatol* 12(4):707–710
- Strusberg I, Mendelberg RC, Serra HA, Strusberg AM (2002) Influence of weather conditions on rheumatic pain. *J Rheumatol* 29(2):335–338
- Tarantola J, Nardone A, Tacchini E, Schieppati M (1997) Human stability improves with the repetition of the task: effect of foot position and visual condition. *Neurosci Lett* 228(2):75–78
- Timmermans EJ, Schaap LA, Herbolsheimer F, Dennison EM, Maggi S, Pedersen NL et al (2015) The influence of weather conditions on joint pain in older people with osteoarthritis:

- results from European project on OsteoArthritis. *J Rheumatol* 42(10):1885–1892
- Vergés J, Montell E, Tomás E, Cumesles G, Castañeda G, Martí N et al (2004) Weather conditions can influence rheumatic diseases. *Proc West Pharmacol Soc* 47:134–136
- von Mackensen S, Hoeppe P, Maarouf A, Tourigny P, Nowak D (2005) Prevalence of weather sensitivity in Germany and Canada. *Int J Biometeorol* 49(3):156–166
- Vouriot A, Hannhart B, Gauchard GC, Barot A, Ledin T, Mur JM et al (2005) Long-term exposure to solvents impairs vigilance and postural control in serigraphy workers. *Int Arch Occup Environ Health* 78:510–515
- Whipple RH, Wolfson LI, Amerman PM (1987) The relationship of knee and ankle weakness to falls in nursing home resident: an isokinetic study. *J Am Geriatr Soc* 35(1):13–25
- Wilder FV, Hall BJ, Barret JP (2003) Osteoarthritis pain and weather. *Rheumatology (Oxford)* 42(8):955–958
- Wolf AD, Pfleger B (2003) Burden of major musculoskeletal conditions. *Bull World Health Organ* 81(9):646–956
- Zhang Z, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Rat AC, Paysant J et al (2015) Diurnal variation on balance control in patients with symptomatic knee osteoarthritis. *Arch of Gerontol Geriatr* 61(1): 109–114. doi:[10.1016/j.archger.2015.03.009](https://doi.org/10.1016/j.archger.2015.03.009)

ANNEXE 4 – ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX THERMALES

ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX THERMALES

RAPPORT

Au nom de la commission XII (Thermalisme et Eaux minérales).

Sur la demande d'avis relatifs à l'autorisation pour la communauté urbaine du Grand Nancy d'exploiter une eau minérale naturelle pour l'alimentation en eaux d'un centre thermal au titre de l'article L 1322-1 du code de la santé publique.

MOTS-CLÉS : THERMALISME. EAUX MINÉRALES NATURELLES. NANCY. RHUMATOLOGIE

Jean-Louis Montastruc* et Patrice Queneau*

**Membre de l'Académie Nationale de Médecine*

***Service de Pharmacologie Médicale et Clinique et Service d'Hydrologie et Climatologie Médicales, Laboratoire de Médecine Thermale, Faculté de Médecine, 37 allées Jules-Guesde, 31000-Toulouse, France*

ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Elles ont été effectuées par le laboratoire IPL agréé par le Ministère de la Santé. Il s'agit d'une analyse bactériologique et physico chimique sur un échantillon du 29 septembre 2010, de deux analyses bactériologiques et physico chimiques sur des prélèvements du 24 novembre 2010 et 23 mai 2011 et de 15 analyses bactériologiques et physico chimiques réalisées de façon mensuelle entre novembre 2010 et octobre 2011.

❖ *Composition et caractéristiques de l'eau :*

- une température autour de 35°C ;
- une odeur d'hydrogène sulfuré disparaissant rapidement après aération de l'eau et une saveur soufrée légèrement salée ;
- un pH proche de la neutralité (7,2) ;
- teneur élevée en fer (entre 0,5 et 4.4mg/l) et en manganèse (160 µg/l).

❖ *Stabilité :*

- est restée stable entre deux mesures.

❖ *Contaminants :*

- une minéralisation relativement élevée (conductivité moyenne à 25°C : 5645µS/cm) et un faciès chloruré sodique (teneur en chlorures moyennes : 1,8 g/l et sodium 840mg/l, stable) ;
- absence de traces d'oligo-éléments et de micro polluants minéraux à l'exception de traces d'arsenic (21,2 µg/l en sachant que la limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine est de 10 µg/l).
- on retrouve quelques traces de bore (0,7mg/l) aluminium, sélénium, zinc, lithium (2mg/l) et bromure (29mg/l) ;
- on ne retrouve ni nitrates ni matières phosphorées, ni pesticides, ni micro polluants organiques.

❖ *Radioéléments :*

- radioactivité naturelle : α de 0,5 Bq/l et 1,7 Bq/l (limite pour les eaux de consommation humaine de 0,1 et 1 Bq/l). Ceci s'explique la présence de radium 228,226 et de potassium naturel ainsi que d'uranium 234 et de polonium 210 ;
- la dose totale indicative susceptible d'être reçue par un consommateur de 2l/j est inférieure aux normes.
- le radon n'a pas été détecté dans l'eau.

Compte tenu des valeurs de radioactivité et de la présence de traces d'arsenic à une quantité supérieure aux quantités des eaux destinées à la consommation humaine, le pétitionnaire propose de limiter la quantité journalière dans le cadre médical de la cure et de n'installer aucune buvette dans l'établissement de soins.

ANNEXE 5 - CALENDRIER DE L'ÉTUDE THERMASPORT

FLOWCHART/CALENDRIER DE L'ÉTUDE THERMASPORT

Actions (x = routine ; X = spécifique à l'étude)	Inclusion J-8 à J-1	EVAL 1 J-8 à J-1	J0	EVAL 2 J16 à J19 15 jours	J15 à J37 + 3 j	EVAL 3 J37 à J44 1 mois	EVAL 4 J53 à J67 2 mois	EVAL 5 J173 à 187 6 mois
Information sur l'étude	X							
Recueil du consentement écrit	X							
Examen clinique (obligatoire avant l'inclusion)	X							
Validation des critères d'inclusion et non inclusion	X							
Randomisation	X							
Auto-questionnaire de pratique d'activités sportives	X							
Date de reprise des activités sportives								X
Echelle de douleur EVA		x		x		x	x	x
Trophicité				x		x	x	x
Goniométrie				x		x	x	x
Force musculaire (EMFM)				x		x	x	x
Test de 6 minutes						X		X
Auto-questionnaire de genou KOOS		X						X
Evaluation proprioceptive (tests cliniques)		x				X	x	
Evaluation posturographique		X		X			X	X
Analyse cinématique Bioval		X					X	
Auto-questionnaire des paramètres sociaux et professionnels						X	X	X
Intervention chirurgicale			x					
Traitement de rééducation spécifique à l'étude					X			
Recueil des EI/EIG	X	X	X	X	X	X	X	X

ANNEXE 6 - DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES DU CALCUL DU CENTRE DE GRAVITÉ

DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES DU CALCUL DU CENTRE DE GRAVITÉ

Les tables anthropométriques donnent la position des CG des segments corporels par un pourcentage de la distance entre les articulations proximales et distales de chacun de ces segments.

Segment	Position du marqueur proximal	Position du marqueur distal	Masse du segment / masse corporelle (en %)	CG du segment depuis l'épiphyse proximale (en %)	CG du segment depuis l'épiphyse distale (en %)
Tête + cou	Sommet du crâne	7 ^e cervicale	8,2	34	66
Tronc	Grand trochanter	Articulation glénohumérale	49,8	50	50
Bras	Axe glénohuméral	Trochlée humérale	2,8	44	56
Avant-bras	Trochlée humérale	Apophyse styloïde cubitale	1,6	43	57
Mains	Apophyse styloïde cubitale	2 ^e phalange du médium	0,6	51	49
Cuisses	Grand trochanter	Condyle fémoral	10	43	57
Jambes	Condyle fémoral	Malléole	4,6	43	57
Pieds	Malléole	Tête du cou 2 ^e métatarsien	1,4	50	50

Calcul du centre de masse d'un segment :

$$D_{CG/LP} = CG_{\text{segment depuis l'épiphyse proximale}} \times L$$

Avec :

- $D_{CG/LP}$: distance qui sépare le CG du point proximal du segment
- L : longueur du segment

Ou

$$D_{CG/LD} = CG_{\text{segment depuis l'épiphyse distale}} \times L$$

Avec :

- $D_{CG/LD}$: distance qui sépare le CG du point distal du segment
- L : longueur du segment

Remarque : la position du CG des segments est exprimée sous la forme d'un pourcentage de la longueur du segment à partir de l'articulation proximale et distale.

ANNEXE 7 – ALGORITHME POUR L'ANALYSE DES DONNÉES DES CAPTEURS BIOVAL

ALGORITHME POUR L'ANALYSE DES DONNÉES DES CAPTEURS BIOVAL

```

1 clc
2 clear
3
4 [File,Path]=uigetfile({'*.csv'},'Mon fichier Bioval',...
5     '/Users/laetitiapeultier/Documents/MATLAB/Mesures des amplitudes
6         articulaires BioVal/');
7
8
9 %% Initialize variables.
10
11 delimiter = ',';
12 startRow = 2;
13
14 %% Read columns of data as strings:
15 % For more information, see the TEXTSCAN documentation.
16 formatSpec = '%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%[\n\r]';
17
18 %% Open the text file.
19 fileID = fopen([Path File],'r');
20
21 %% Read columns of data according to format string.
22 % This call is based on the structure of the file used to generate
23 % this code.
24 % If an error occurs for a different file, try regenerating the
25 % code Import Tool.
26 dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter,
27     'HeaderLines', startRow-1, 'ReturnOnError', false);
28
29 %% Close the text file.
30 fclose(fileID);
31
32 %% Convert the contents of columns containing numeric strings to
33 numbers.
34 % Replace non-numeric strings with NaN.
35 raw = repmat({''},length(dataArray{1}),length(dataArray)-1);
36 for col=1:length(dataArray)-1
37     raw(1:length(dataArray{col}),col) = dataArray{col};
38 end
39 numericData = NaN(size(dataArray{1},1),size(dataArray,2));
40 for col=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13]
41 % Converts strings in the input cell array to numbers. Replaced non-
42 % numeric strings with NaN.
43 rawData = dataArray{col};
44 for row=1:size(rawData, 1);
45 % Create a regular expression to detect and remove non-numeric
46 % prefixes and suffixes.
47 regexstr = '(?<prefix>.*) (?<numbers>([-
48 ]*(\d+[,]*)+[\.] {0,1} \d*[eEdD]{0,1} [-+]* \d*[i]{0,1})) | ([-
49 ]*(\d+[,]*) * [\.] {1,1} \d+[eEdD]{0,1} [-
50 +]* \d*[i]{0,1})) (?<suffix>.*)';
51 try
52     result = regexp(rawData{row}, regexstr, 'names');
53     numbers = result.numbers;
54
55     % Detected commas in non-thousand locations.
56     invalidThousandsSeparator = false;
57     if any(numbers==',' );
58         thousandsRegExp = '^ \d+?( \, \d{3}) * \. {0,1} \d*$';
59         if isempty(regexp(thousandsRegExp, ',', 'once'));
60             numbers = NaN;
61             invalidThousandsSeparator = true;
62         end
63     end
64 % Convert numeric strings to numbers.
65 if ~invalidThousandsSeparator;
66     numbers = textscan(strrep(numbers, ',', '.'), '%f');

```

```

67         numericData(row, col) = numbers{1};
68         raw{row, col} = numbers{1};
69     end
70     catch me
71     end
72 end
73 end
74
75
76 %% Replace non-numeric cells with NaN
77 R = cellfun(@(x) ~isnumeric(x) && ~islogical(x), raw); % Find non-numeric
78 cells
79 raw(R) = {NaN}; % Replace non-numeric cells
80
81 %% Create output variable
82 data = cell2mat(raw);
83 data1=(data(:, [1,3,6,9,12]));
84 %% Clear temporary variables
85 clearvars data delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans raw
86 col numericData rawData row regexstr result numbers
87 invalidThousandsSeparator thousandsRegExp me R;
88
89 nb_capteur=4;
90
91 %%prendre les données du test
92 plot(data1(:,2:end))
93 [x,y]=ginput(2);
94 clear y
95 clf
96 close
97
98 x=round(x);
99
100 data2=data1(x(1,1):x(2,1),:);
101
102 %% Prendre les 20sec qui nous intéressent
103 plot(data2(:,2:end))
104 [x,y]=ginput(2);
105 clear y
106 clf
107 close
108
109 x=round(x);
110
111 data3=data2(x(1,1):x(2,1),:);
112 %% somme des angulations absolues
113     sum_angle=sum(abs(data3(1:441,2:4)));
114
115 %% Somme des angulations pour chaque articulations
116     % Sélection des valeurs positives et négatives
117     for j=1:nb_capteur-1
118         ind(1,j).data=find(data3(:,j+1));
119     end
120 clear j
121
122     % voir si certains capteurs sont vides ou non
123     for j=1:nb_capteur-1
124         vide(1,j)=isempty(ind(1,j).data);
125     end
126 clear j
127
128 %% Graphique
129 temps=[0:length(data3)-1]./30;
130 subplot(3,1,1)
131 plot(temps,data3(:,2))
132 ylabel('angle cheville (°)')
133 set(gca,'xlim',[0 20])
134 subplot(3,1,2)
135 plot(temps,data3(:,3))
136 ylabel('angle genou (°)')

```

```
137 set(gca,'xlim',[0 20])
138 subplot(3,1,3)
139 plot(temps,data3(:,4))
140 xlabel('temps (s)')
141 ylabel('angle hanche ( $\infty$ )')
142 set(gca,'xlim',[0 20])
143
144 %% plot(bioval(:,1),bioval(:,2))
```

ANNEXE 8 - CONSIGNES DU 6 MINUTES “WALKING TEST”

CONSIGNES DU « 6 MINUTES WALKING TEST »

Le test était réalisé dans un couloir à la piscine ronde de Nancy Thermal. Des plots espacés de trois mètres étaient placés sur toute la longueur du couloir soit sur une longueur de 40 m. Le

nombre d'aller-retour était compté pour obtenir une distance totale parcourue par le patient en six minutes.

Les consignes suivantes étaient données aux sujets :

« Le but de ce test est de marcher le plus possible pendant six minutes. Vous marcherez aller et retour dans ce couloir. Marcher six minutes, c'est long, et donc vous devrez faire un effort. Vous allez probablement vous sentir hors d'haleine et fatigué. Vous pouvez donc ralentir, vous arrêter ou vous reposer si nécessaire. Vous pouvez vous appuyer contre le mur pendant le repos, mais reprendre la marche dès que possible. Vous parcourrez le couloir aller et retour en tournant autour des cônes. Vous devez contourner les cônes et continuer sans hésiter. Maintenant, je vais vous montrer. Voilà comment je fais un demi-tour sans hésiter.

Pendant le test, vous ne pouvez pas parler, car cela influence vos performances. Je vous indiquerai le temps restant toutes les minutes. Je vous demanderai de vous arrêter après 6 minutes. Êtes-vous prêt ? Je vais compter les demi-tours que vous faites. Rappelez-vous que vous devez marcher aussi loin que possible pendant 6 minutes, mais sans courir.

Allez-y maintenant ou dès que vous êtes prêt. »

Au cours du test les encouragements suivants étaient donnés au patient :

- à 30 secondes : « C'est très bien, continuez ainsi »
- à 1 minute : « C'est très bien, plus que 5 minutes, continuez ainsi »
- à 1 minute 30 secondes : « C'est très bien, continuez ainsi »
- à 2 minutes : « C'est très bien, plus que 4 minutes, continuez ainsi »
- à 2 minutes 30 secondes : « C'est très bien, continuez ainsi »
- à 3 minutes : « C'est très bien, plus que 3 minutes, continuez ainsi »
- à 3 minutes 30 secondes : « C'est très bien, continuez ainsi »
- à 4 minutes : « C'est très bien, plus que 2 minutes, continuez ainsi »
- à 4 minutes 30 secondes : « C'est très bien, continuez ainsi »
- à 5 minutes : « C'est très bien, plus que 1 minute, continuez ainsi »
- à 5 minutes 30 secondes : « C'est très bien, continuez ainsi »
- à 5 minutes 45 secondes : « Je vais bientôt vous dire de vous arrêter »

- à 6 minutes : « *Et maintenant, arrêtez-vous* » (Abdel Kafi & Deboeck, 2005).

ANNEXE 9 - FICHE DE TEGNER ET LYSHOLM

FICHE DE TEGNER ET LYSHOLM

Nom du patient :

Date de l'examen :

Instabilité

Jamais de dérobement = 25
En exercice, rarement = 20
En exercice, fréquemment = 15
Occasionnel, vie courante = 10
Souvent, vie courante = 5
À chaque pas = 0

Douleur

Jamais = 25
En exercice, modéré = 20
En exercice, importante = 15
Marche > 2 km, importante = 10
Marche < 2 km, importante = 5
Constante = 0

Blocage

Jamais = 15
Accrochage sans blocage = 10
Blocage occasionnel = 6
Blocage fréquent = 2
Blocage aigu à l'examen = 0

Gonflement

Jamais = 10
Lors d'exercices intenses = 6
Lors d'une activité courante = 2
Constant = 0

Escaliers

Pas de gêne = 10
Léger handicap = 6
Une marche à la fois = 2
Impossible = 0

Accroupissement

Pas de gêne = 10

Léger handicap = 4

Pas plus de 90° = 2

Impossible = 0

Boiterie

Aucune = 5

Modérée ou occasionnelle = 4

Sévère et constante = 0

Canne

Jamais = 5

En permanence = 2

Station debout impossible = 0

SCORE LYSHOLM = TOTAL :

0 à 64 points = MAUVAIS

65 à 83 points = MOYEN

84 à 100 points = BON / EXCELLENT

Evénements significatifs pendant le traitement	Date
Ablation attelle	
Reprise appui total	

Satisfaction du patient : Très content Content Déçu Très déçu

COMMENTAIRES :

ANNEXE 10 - QUESTIONNAIRE IKDC

IKDC : ÉVALUATION SUBJECTIVE DU GENOU

Nom/Prénom :

Date de ce jour :

Date de l'accident/la blessure :

Symptômes*

* Basez vos réponses sur le plus haut niveau d'activité que vous pensez être capable d'accomplir sans avoir de symptômes significatifs, même si vous ne faites pas actuellement ces activités.

1. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez accomplir sans souffrir du genou ?

- ☐ Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- ☐ Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- ☐ Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- ☐ Activités douces comme la marche, les travaux ménagers ou le jardinage
- ☐ Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de la douleur

2. Au cours des 4 dernières semaines, ou depuis votre accident/blessure, combien de fois avez-vous souffert du genou (de 0 à 10) :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Jamais										Constamment

3. Indiquez l'intensité de la douleur en cochant la case correspondante (de 0 à 10) :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aucune douleur imaginable										La pire douleur

4. Au cours des 4 dernières semaines, ou depuis l'accident/la blessure, votre genou était-il raide ou enflé ?

- ☐ pas du tout
- ☐ un peu
- ☐ moyennement
- ☐ beaucoup
- ☐ énormément

5. Quel est le plus haut niveau d'activités que vous pouvez accomplir sans que votre genou n'enfle ?

- ☐ Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- ☐ Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- ☐ Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- ☐ Activités douces comme la marche, les travaux ménagers ou le jardinage
- ☐ Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou enflé

6. Au cours des 4 dernières semaines, ou depuis l'accident/la blessure, y-a-t-il un blocage ou un accrochage de votre genou ?

- ☐ Oui
- ☐ Non

7. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez accomplir sans que votre genou ne se dérobe ?

- ☐ Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- ☐ Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- ☐ Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- ☐ Activités douces comme la marche, les travaux ménagers ou le jardinage
- ☐ Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou qui se dérobe

Activités sportives

8. Quel est le plus haut niveau d'activité que vous pouvez pratiquer régulièrement ?

- ☐ Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football
- ☐ Activités intenses comme un travail physique dur, le ski ou le tennis
- ☐ Activités modérées comme un travail physique moyen, la course à pied ou le jogging
- ☐ Activités douces comme la marche, le ménage ou le jardinage
- ☐ Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou

9. Quelle incidence a votre genou sur votre capacité à ?

	Pas difficile	Légèrement difficile	Très difficile	Impossible
a. Monter les escaliers				
b. Descendre les escaliers				
c. S'agenouiller (appui sur le devant du genou)				
d. S'accroupir				
e. S'asseoir				
f. Se lever d'une chaise				
g. Courir en ligne droite				
h. Sauter avec réception sur la jambe faible				
i. S'arrêter et repartir brusquement (marche ou course à pied si vous êtes un athlète)				

Fonction

10. Comment notez-vous la fonction de votre genou sur une échelle de 0 à 10 (10 correspondant au fonctionnement optimal et 0 étant l'incapacité à accomplir les activités de la vie quotidienne et les activités sportives).

Fonction avant l'accident/la blessure du genou :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Performance nulle								Performance optimale		

Fonction actuelle du genou :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Performance nulle								Performance optimale		

Calcul des résultats de l'évaluation subjective du genou

<http://www.orthopaedicsore.com/>

Des recherches ont été faites quant aux méthodes de calcul des résultats de l'évaluation subjective du genou. La méthode consistant à totaliser les résultats de chaque réponse s'est avérée aussi précise que d'autres méthodes plus sophistiquées.

Les réponses à chaque question sont enregistrées selon le principe suivant : 1 est attribué à la performance la plus basse ou aux symptômes les plus élevés. Par exemple, pour la question n° 1 qui concerne le plus haut niveau d'activité qu'il est possible d'accomplir sans souffrir du genou, le chiffre 1 est attribué si la réponse cochée est « Aucune des activités ci-dessus ne m'est possible à cause de mon genou » et le chiffre 5 est attribué si la réponse cochée est « Activités très intenses comportant sauts et rotations comme au basket ou au football ». Pour la réponse n° 2 concernant le nombre de fois au cours des quatre dernières semaines que le patient a souffert du genou, la réponse cochée « Constamment » correspond à 1 point et la réponse cochée « Jamais » correspond à 11 points.

Il suffit ensuite de totaliser les points de chaque réponse et de les mettre sur une base s'étalant de 0 à 100.

Remarque :

Ne pas compter la réponse à la question n° 10° concernant la fonction du genou avant l'accident/la blessure. Procéder comme suit :

- 1. Donner un chiffre à chaque réponse (le chiffre le plus bas pour la performance la plus basse ou les symptômes les plus élevés).*
- 2. Calculer le total brut en totalisant tous les points à l'exception de la question n° 10 concernant la fonction du genou avant l'accident/la blessure.*
- 3. Appliquer la formule suivante pour obtenir un résultat sur une échelle de 0 à 100 :*

$$\text{Résultat de l'IKDC} = \frac{[\text{Total brut} - \text{Chiffre le plus bas}] \times 100}{[\text{Nombre de résultats possibles}]}$$

où le résultat le plus bas possible est 18 et le nombre de résultats possibles est 87.

Par conséquent, si la totalité des points des 18 questions est 60, le résultat de l'IKDC sera calculé comme suit :

$$\text{Résultat de l'IKDC} = \frac{[60 - 18] \times 100}{[87]}$$

soit un résultat de 48,3.

Ce résultat est interprété comme une mesure de la capacité de la fonction telle que les résultats les plus élevés représentent les niveaux les plus performants de la fonction et les niveaux les plus bas des symptômes. Un résultat de 100 signifie qu'il n'y a aucune limite aux activités quotidiennes et sportives et que les symptômes sont nuls.

Le résultat peut être obtenu si au moins 90 % des réponses ont été effectuées (soit un minimum de 16 questions). Pour calculer le total brut lorsque des données manquent, substituer le résultat moyen possible et l'ajouter à la formule comme décrit ci-dessus.

ANNEXE 11 - QUESTIONNAIRE DU GENOU KOOS

QUESTIONNAIRE DU GENOU KOOS

Nom :

Date :

Date de naissance :

Instructions

Ce questionnaire vous demande votre opinion sur votre genou. Il nous permettra de mieux connaître ce que vous ressentez et ce que vous êtes capable de faire dans votre activité de tous les jours.

Répondez à chaque question. Veuillez cocher une seule case par question. En cas de doute, cochez la case qui vous semble la plus adaptée à votre cas.

Symptômes

Ces questions concernent vos symptômes au cours des **huit derniers jours**.

S1. Est-ce que votre genou gonfle ?

Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Tout le temps
☐	☐	☐	☐	☐

S2. Ressentez-vous des ou entendez-vous des craquements ou n'importe quel autre type de bruit en bougeant le genou ?

Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Toujours
☐	☐	☐	☐	☐

S3. Est-ce que votre genou accroche ou se bloque en bougeant ?

Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Toujours
☐	☐	☐	☐	☐

S4. Pouvez-vous étendre votre genou complètement ?

Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Toujours
☐	☐	☐	☐	☐

S5. Pouvez-vous plier votre genou complètement ?

Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Toujours
☐	☐	☐	☐	☐

Raideur

Ces questions concernent la raideur de votre genou au cours des **huit derniers jours**.

La raideur est la sensation d'avoir du mal à bouger le genou.

S6. Le matin au réveil, la raideur de votre genou est :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

S7. Après être resté(e) assis(e), couché(e), ou au repos pendant la journée, la raideur de votre genou est :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

Douleur

P1. Avez-vous souvent mal au genou ?

Jamais	Une fois par mois	Une fois par semaine	Tous les jours	Tout le temps
☐	☐	☐	☐	☐

Au cours des **huit derniers jours**, quelle a été l'importance de votre douleur du genou en faisant les activités suivantes ?

P2. En tournant, pivotant sur votre jambe :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P3. En étendant complètement le genou :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P4. En pliant complètement le genou :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P5. En marchant sur un terrain plat :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P6. En montant ou en descendant les escaliers :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P7. Au lit, la nuit :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P8. En restant assis(e) ou couché(e) :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

P9. En restant debout :

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

Fonction, vie quotidienne

Les questions suivantes concernent ce que vous êtes capable de faire. Au cours des **huit derniers jours**, quelle a été votre difficulté pour chacune des activités suivantes ?

A1. Descendre les escaliers

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A2. Monter les escaliers

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A3. Vous relever d'une position assise

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A4. Rester debout

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A5. Vous pencher en avant pour ramasser un objet

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A6. Marcher sur un terrain plat

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A7. Monter ou descendre de voiture

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A8. Faire vos courses

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A9. Mettre vos chaussettes ou vos collants

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A10. Sortir du lit

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A11. Enlever vos chaussettes ou vos collants

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A12. Vous retourner ou garder le genou dans la même position en étant couché(e)

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A13. Entrer ou sortir d'une baignoire

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A14. Rester assis(e)

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A15. Vous asseoir ou vous relever des toilettes

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A16. Faire de gros travaux ménagers (déplacer des objets lourds, récurer les sols,...)

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

A17. Faire des petits travaux ménagers (faire la cuisine, faire la poussière,...).

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

Activités, sport et loisirs

Les questions suivantes concernent ce que vous êtes capable de faire au cours d'autres activités. Au cours des **huit derniers jours**, quelle a été votre difficulté pour les activités suivantes ?

SP1. Rester accroupi(e)

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

SP2. Courir

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

SP3. Sauter

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

SP4. Tourner, pivoter sur votre jambe

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

SP5. Rester à genoux

Absente	Légère	Modérée	Forte	Extrême
☐	☐	☐	☐	☐

Qualité de vie

Q1. Pensez-vous souvent à votre problème de genou ?

Jamais	Une fois par mois	Une fois par semaine	Tous les jours	Tout le temps
☐	☐	☐	☐	☐

Q2. Avez-vous modifié votre façon de vivre pour éviter les activités qui pourraient aggraver votre problème de genou ?

Pas du tout	Un peu	Modérément	Beaucoup	Totalement
☐	☐	☐	☐	☐

Q3. Est-ce qu'un manque de confiance dans votre genou vous gêne ?

Pas du tout	Un peu	Modérément	Beaucoup	Totalement
☐	☐	☐	☐	☐

Q4. Finalement, êtes-vous gêné(e) par votre genou ?

Pas du tout	Un peu	Modérément	Beaucoup	Totalement
☐	☐	☐	☐	☐

*****Merci beaucoup d'avoir répondu à ce questionnaire*****

**ANNEXE 12 - AUTO-QUESTIONNAIRE SUR LA PRATIQUE
DES ACTIVITÉS PHYSIQUES ET SPORTIVES**

AUTO-QUESTIONNAIRE SUR LA PRATIQUE DES ACTIVITÉS PHYSIQUES ET SPORTIVES

ACTIVITES SPORTIVES				
1. Actuellement, pratiquez-vous des activités sportives ?	☐ Oui ☐ Non			
1.a. Si oui, lesquelles ?	Activité 1	Activité 2	Activité 3	Activité 4
1.b. Depuis combien de temps ?	mois années	mois années	mois années	mois années
1.c. Combien de fois par semaine ?				
1.d. Durée moyenne de chaque séance par activité ?	minutes heures	minutes heures	minutes heures	minutes heures
2. Dans le passé, avez-vous pratiqué d'autres activités sportives (dont la pratique est maintenant abandonnée) ?	☐ Oui ☐ Non			
2.a. Si oui, lesquelles ?	Activité 1	Activité 2	Activité 3	Activité 4
2.b. Pendant combien de temps	mois années	mois années	mois années	mois années
2.c. Combien de fois par semaine ?				
2.d. Durée moyenne de chaque séance par activité ?	minutes heures	minutes heures	minutes heures	minutes heures
2.e. Quand avez-vous arrêté ?				

ANNEXE 13 - AUTO-QUESTIONNAIRE DES PARAMÈTRES SOCIAUX ET PROFESSIONNELS

AUTO-QUESTIONNAIRE DES PARAMÈTRES SOCIAUX ET PROFESSIONNELS

Activités sociales

Avez-vous repris vos activités sociales (de type cinéma, expositions, repas amis, restaurants...) ?

☐ non

☐ oui, ...

☐ j'ai repris des activités sociales identiques alors à quelle date : JJ/MM/AAAA

☐ j'ai repris des activités sociales différentes alors à quelle date : JJ/MM/AAAA

Activités professionnelles *(dans l'hypothèse où vous aviez une activité professionnelle avant votre entorse grave du genou)*

Avez-vous repris des activités professionnelles ?

☐ non

☐ car je suis toujours en arrêt (maladie ou accident du travail)

☐ car j'ai perdu mon emploi en rapport avec mon entorse grave du genou

☐ car j'ai perdu mon emploi sans rapport avec mon entorse grave du genou

☐ oui, ...

☐ j'ai repris mes activités professionnelles antérieures et identiques

alors, à quelle date : JJ/MM/AAAA

☐ j'ai repris mes activités professionnelles antérieures et adaptées

alors, à quelle date : JJ/MM/AAAA

☐ j'ai repris des activités professionnelles différentes

alors, à quelle date : JJ/MM/AAAA

Facteurs prédictifs de la qualité du contrôle postural et de sa compensation dans les pathologies traumatiques et dégénératives du genou.

La rupture du ligament croisé antérieur du genou est très fréquente, notamment dans les activités qui impliquent des contraintes en rotation. Une dégénérescence du cartilage articulaire du genou peut par la suite engendrer une arthrose. Le but de cette étude était d'une part dans les pathologies traumatiques et d'autre part dans les pathologies dégénératives, atteignant cette articulation, d'analyser les facteurs prédictifs du contrôle postural et de la récupération fonctionnelle.

Les effets d'une rééducation innovante combinant une rééducation conventionnelle réduite avec une rééducation en milieu aquatique ont été comparés à ceux d'une rééducation conventionnelle définie par la Haute Autorité de Santé, sur la cinétique de récupération des compétences proprioceptives et sur l'amélioration fonctionnelle. Le contrôle postural par posturographie et la motricité au moyen de tests cliniques ont été quantifiés chez 67 patients ayant présenté une rupture du ligament croisé antérieur, avant intervention et jusqu'à six mois après intervention chirurgicale. Les effets des paramètres météorologiques sur le contrôle postural et la douleur dans la gonarthrose ont été évalués chez 113 patients, par posturographie et échelle de douleur.

Pour une même qualité globale du contrôle postural six mois après ligamentoplastie du genou, les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant utilisaient davantage la somesthésie que ceux ayant suivi une rééducation conventionnelle, qui devaient recourir plus à un mécanisme de compensation. La proprioception était améliorée deux mois après l'intervention chirurgicale par rapport à l'évaluation pré-opératoire chez les patients ayant suivi le protocole innovant. La force musculaire était plus importante chez les patients ayant suivi le protocole de rééducation innovant un mois, deux mois et six mois après intervention. Un mois après l'intervention, la distance de marche parcourue était plus importante chez les patients ayant suivi la rééducation innovante que chez les patients ayant suivi la rééducation conventionnelle.

Chez les patients présentant une gonarthrose, une dégradation du contrôle postural était observée lorsque la pression atmosphérique et l'humidité maximale diminuaient au cours de la matinée et lorsque la pression atmosphérique diminuait au cours de la journée. L'augmentation de la douleur était corrélée avec l'augmentation de la température sur la matinée et avec l'augmentation de la température et de l'humidité sur la journée.

L'environnement dans lequel évolue le sujet (ex : milieu aquatique, ambiance climatique) a donc une influence sur la performance du contrôle postural. Une meilleure prise en charge en rééducation post-ligamentoplastie du genou permettrait de limiter la nécessité de compensation sur le membre contralatéral par une meilleure utilisation de la somesthésie et ainsi prévenir la survenue de l'arthrose et d'une rupture ligamentaire contralatérale. Ceci permettrait de limiter les coûts socio-professionnels.

Mots-clés : ligament croisé antérieur, gonarthrose, rééducation, paramètres météorologiques, contrôle postural.

Predictive factors of the quality of postural control and compensation in traumatic and degenerative pathologies of the knee.

The knee can suffer damage from either traumatic or degenerative pathology. Anterior cruciate ligament (ACL) injuries frequently occur, especially in activities that including rotational stresses. Degeneration of the articular cartilage of the knee can subsequently result in osteoarthritis. The aim of this study was to analyze the predictive factors of postural control and recovery in traumatic injuries and also in degenerative pathologies of the knee.

The effects of an innovative rehabilitation protocol combining reduced conventional rehabilitation with aquatic rehabilitation were compared with conventional rehabilitation defined by the National French Health Authority on the kinetics of recovery of proprioceptive skills and functional improvement. Postural control and motor control using clinical tests were quantified in 67 patients with ACL surgery before and up to six months after surgery. The effects of meteorological parameters on postural control and pain in knee osteoarthritis were evaluated in 113 patients, using posturography and also a pain scale.

Six months after knee ligament surgery, both groups attained the same quality of postural control. However, patients who followed the innovative protocol made more use of proprioceptive inputs compared to the group who underwent conventional rehabilitation who made more use of a compensation mechanism. In patients following the innovative protocol proprioception was improved two months after surgery compared to before surgery. Muscle strength was higher in patients who followed the innovative rehabilitation protocol at one, two and six months after surgery. One month after surgery, the walking distance traveled was higher in patients who underwent innovative rehabilitation than in patients who had undergone conventional rehabilitation.

In patients with knee osteoarthritis, degradation of postural control was observed when atmospheric pressure and maximum humidity decreased during the morning and when atmospheric pressure decreased during the entire day. Increased pain was correlated with increased temperature in the morning and with increased temperature and humidity during the entire day.

The environment in which evolves the subject (aquatic, climatic) thus has an influence on postural control performance. A better management in post-ligamentoplasty rehabilitation of the knee would reduce the need for compensation using the contralateral limb, by better use of somesthesia. This could prevent the occurrence of osteoarthritis and a contralateral ACL injury, which would also reduce costs to the society and health care.

Keywords: anterior cruciate ligament, knee osteoarthritis, rehabilitation, meteorology, postural control.