



**HAL**  
open science

# Cross éducation : effets du travail excentrique unilatéral des extenseurs du genou sur le gain de force controlatéral

Laurent Zaaboul

## ► To cite this version:

Laurent Zaaboul. Cross éducation : effets du travail excentrique unilatéral des extenseurs du genou sur le gain de force controlatéral. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04783058

**HAL Id: dumas-04783058**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04783058v1>**

Submitted on 14 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ  
ÉCOLE DES SCIENCES DE LA RÉADAPTATION  
FORMATION EN MASSO-KINÉSITHÉRAPIE**

**« CROSS EDUCATION » :  
EFFET DU TRAVAIL EXCENTRIQUE  
UNILATÉRAL DES EXTENSEURS DU GENOU  
SUR LE GAIN DE FORCE CONTROLATÉRAL**

**ZAABOUL Laurent**  
**Directeur de mémoire : Mr FORASACCO Jérémy**

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire pour sa disponibilité, sa bonne humeur et son travail qui m'ont permis de réaliser cette revue dans de bonnes conditions.

Je remercie tous les enseignants et intervenants de l'IFMK Marseille que j'ai pu côtoyer durant ces années.

Je veux remercier l'ensemble des jurys qui m'ont permis d'intégrer la formation de masso-kinésithérapeute.

Je souhaite maintenant adresser mes remerciements envers la personne qui partage ma vie au quotidien. Merci de m'avoir soutenu dans ce projet qui était encore en construction il y a maintenant plus de six ans. Merci d'avoir supporté ces quatre années d'études avec toutes les difficultés traversées. Enfin le plus important de tout, merci de m'avoir donné cet enfant tant attendu. Je ne te remercierai jamais assez.

Je souhaiterais à présent remercier mes parents qui ont toujours été présents. Merci de votre présence au quotidien, de votre soutien, de votre confiance et de votre amour.

Je tiens à remercier mon grand frère, mon exemple depuis mon enfance.

Je tiens à remercier mes amis avec vos « Le mec il a 35 ans il est toujours étudiant ».

Je remercie tous mes camarades de l'IFMK avec qui j'ai passé du bon temps.

## LEXIQUE / ACRONYME

<b>CE</b>	Cross-education
<b>EC</b>	Éducation croisée
<b>RCT</b>	Randomized controlled trial
<b>ECR</b>	Essai clinique randomisé
<b>SD</b>	Standard deviation
<b>SMD</b>	Standardized mean difference
<b>1RM</b>	Répétition maximale
<b>Cpt</b>	Couple maximal concentrique
<b>Ept</b>	Couple maximal excentrique
<b>lpt</b>	Couple maximal isométrique

# Table des matières

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONTEXTE</b>	<b>1</b>
<b>1.2 SYSTEME MUSCULAIRE</b>	<b>2</b>
1.2.1 <i>Muscle strié</i>	2
1.2.2 <i>Types de fibres</i>	3
1.2.3 <i>Propriétés musculaires</i>	3
1.2.4 <i>Modèle de Hill</i>	3
<b>1.3 MÉCANISMES DE CONTRACTION MUSCULAIRE</b>	<b>4</b>
1.3.1 <i>SNC et SNP</i>	4
1.3.2 <i>Jonction neuromusculaire</i>	6
1.3.3 <i>Mécanismes cellulaires</i>	7
1.3.4 <i>Mécanismes moléculaires</i>	8
1.3.5 <i>Synthèse de l'ATP</i>	8
1.3.6 <i>Mode de contraction musculaire</i>	9
<b>1.4 EXCENTRIQUE</b>	<b>10</b>
1.4.1 <i>Principes</i>	10
1.4.2 <i>Entraînement excentrique</i>	11
1.4.3 <i>Charge d'entraînement</i>	12
1.4.4 <i>Risques</i>	12
<b>1.5 CROSS EDUCATION</b>	<b>13</b>
1.5.1 <i>Historique et principes</i>	13
1.5.2 <i>Intérêt thérapeutique</i>	14
1.5.3 <i>Effets du Cross Education</i>	15
1.5.4 <i>Objectif de la revue de littérature</i>	16
<b>2. METHODOLOGIE</b>	<b>17</b>
<b>2.1 CRITERES D'ELIGIBILITE DES ETUDES DE LA REVUE</b>	<b>17</b>
<b>2.2 METHODOLOGIE DE RECHERCHE</b>	<b>18</b>
2.2.1 <i>Sources documentaires</i>	18
2.2.2 <i>Équation de recherche</i>	18
<b>2.3 METHODE D'EXTRACTION ET D'ANALYSE DES DONNEES</b>	<b>19</b>
2.3.1 <i>Méthode de sélection des études</i>	19
2.3.2 <i>Évaluation de la qualité méthodologique des études sélectionnées</i>	20
2.3.3 <i>Extraction des données</i>	20
2.3.4 <i>Méthode de synthèse des résultats</i>	20

<b>3.</b>	<b>RÉSULTATS.....</b>	<b>21</b>
3.1	SELECTION DES ETUDES .....	21
3.2	ÉTUDES EXCLUES.....	22
3.3	ÉTUDES INCLUSES.....	22
3.4	RISQUES DE BIAIS DES ETUDES INCLUSES .....	27
3.4.1	<i>Grille d'analyse étudiée .....</i>	<i>27</i>
3.4.2	<i>Synthèse de biais.....</i>	<i>28</i>
3.5	EFFETS DE L'INTERVENTION.....	29
3.5.1	<i>Critères de jugement.....</i>	<i>29</i>
<b>4.</b>	<b>DISCUSSION .....</b>	<b>38</b>
4.1	ANALYSE DES PRINCIPAUX RESULTATS .....	38
4.1.1	<i>Analyses des participants .....</i>	<i>38</i>
4.1.2	<i>Analyses des interventions .....</i>	<i>39</i>
4.1.3	<i>Analyses des modalités de l'évaluation des critères de jugement .....</i>	<i>40</i>
4.1.4	<i>Analyses des résultats des critères de jugement.....</i>	<i>41</i>
4.2	APPLICABILITE DES RESULTATS EN PRATIQUE CLINIQUE .....	46
4.3	QUALITE DES PREUVES.....	47
4.4	BIAIS POTENTIEL DE LA REVUE .....	48
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>50</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>51</b>
<b>7.</b>	<b>ANNEXE .....</b>	<b>56</b>

## SOMMAIRE DES TABLEAUX

Tableau I : PICO .....	18
Tableau II : Équation de recherche .....	19
Tableau III : Critères d'inclusion et d'exclusion .....	19
Tableau IV : Études exclues .....	22
Tableau V : Études incluses .....	22
Tableau VI : Lepley and al. 2014.....	23
Tableau VII : Coratella and al. 2015 .....	24
Tableau VIII : Martinez and al. 2021 .....	25
Tableau IX : Coratella and al. 2022.....	26
Tableau X : Échelle PEDro des articles inclus .....	27
Tableau XI : Synthèse des biais des articles inclus n°1.....	28
Tableau XII : Synthèse des biais des articles inclus n°2.....	28
Tableau XIII : Données de l'étude de Lepley and al. 2014 .....	30
Tableau XIV : Différence intra groupe extraite à partir des données de Lepley and al. 2014 .....	31
Tableau XV : Différence inter groupe EX/CNTRL extraite à partir du Tableau IX.....	31
Tableau XVI : Données de l'étude de Coratella and al. 2015 .....	32
Tableau XVII : Différence inter groupe IK/CON à partir des données de Coratella and al. 2015 .....	33
Tableau XVIII : Différence inter groupe DCER/CON à partir des données de Coratella and al. 2015....	33
Tableau XIX : Données de l'étude de Martinez and al. 2021 .....	34
Tableau XX : Différence inter groupe EG3s/CG à partir des données de Martinez and al. 2021 .....	35
Tableau XXI : Différence inter groupe EG6s/CG à partir des données de Martinez and al. 2021 .....	35
Tableau XXII : Données de l'étude de Coratella and al. 2022 .....	36
Tableau XXIII : Différence inter groupe ECC/CON à partir des données de Coratella and al. 2022 .....	37
Tableau XXIV : Qualité des preuves des études incluses .....	47
Tableau XXV : Grille AMSTAR-2 de notre revue .....	49

## SOMMAIRES DES FIGURES

Figure 1 : Muscle strié .....	2
Figure 2 : Composantes transmission de force .....	3
Figure 3 : Voie motrice .....	5
Figure 4 : Synapse Neuromusculaire .....	6
Figure 5 : Fibre musculaire et myofilament Actine et Myosine .....	7
Figure 6 : Sarcomère .....	7
Figure 7 : Cycle de contraction musculaire .....	8
Figure 8 : Voies métaboliques .....	8
Figure 9 : Contraction concentrique, isométrique et excentrique .....	9
Figure 10 : Relation F/V concentrique et excentrique d'après Lieber and al. [26] .....	10
Figure 11 : Modèles théoriques traditionnels d'éducation croisée [51] .....	13
Figure 12 : Localisations potentielles des adaptations neuronales de l'éducation croisée [48] .....	14
Figure 13 : Régime de contraction sensible au phénomène d'EC selon Manca and al. [66] .....	16
Figure 14 : Diagramme de flux .....	21
Figure 15 : Forest plot du couple de force maximal concentrique .....	42
Figure 16 : Forest plot du couple de force maximal excentrique .....	43
Figure 17 : Forest plot du couple de force maximal isométrique .....	44

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 Contexte

Dans la pratique clinique, les blessures musculo-squelettiques concernant les membres inférieurs sont très fréquentes. Environ 66% des blessures en lien avec une activité concerne les membres inférieurs avec une atteinte principalement de l'articulation du genou [1]. Même si le niveau et l'intensité de l'activité sont associés à un âge plutôt jeune et représentent des facteurs de risque importants, il semblerait également que les personnes sédentaires n'échappent pas à ce type de blessure. Il n'y aurait pas de différence significative concernant la prévalence des blessures entre les hommes et les femmes.

Parmi ces blessures, nous allons retrouver les atteintes dites unilatérales ou d'un seul membre. Elles peuvent se présenter lors d'entorse(s), de tendinopathie, de lésion(s) musculo-aponévrotique, de fracture(s), etc... Chacune des étiologies peuvent de ce fait entraîner une **limitation, immobilisation** voire une **chirurgie** du membre avec des délais de récupération physiologique et spécifique aux structures atteintes. Lors de notre prise en charge on devra respecter les phases douloureuses, de cicatrifications, d'appuis non ou partiellement autorisés par exemple. Ces délais pouvant varier de quelques jours jusqu'à plusieurs semaines **limitant** ainsi le **travail actif** sur le **membre** concerné.

Une sous utilisation ou immobilisation du membre peut entraîner une perte de force et une atrophie musculaire [2]. Alors que l'atrophie met en évidence une diminution de la taille au niveau musculaire [3], il semblerait que la **perte de force** s'initie de manière bien plus rapide que ce dernier et **dès les premiers jours** [2]. Les conséquences de cette diminution de force et de volume peuvent avoir un impact négatif sur la qualité de vie des patients.

La force du quadriceps est déjà corrélée cliniquement comme facteur prédictif d'un risque de chute [4], critère de retour au sport [5], de performance sportive [6] et même facteur prédictif de mortalité [7]...

Ainsi, une force diminuée au niveau des extenseurs du genou, notamment le quadriceps, peut avoir un impact important dans notre quotidien, que l'on soit plus ou moins actif.

En tant qu'étudiant en 4<sup>ème</sup> année de kinésithérapie et à travers ma petite expérience professionnelle lors de mes stages, j'ai été confronté plus d'une fois à des patients en incapacité ou très limités pour réaliser un travail nécessitant le recrutement de la force d'un membre atteint.

Ce raisonnement m'a amené à me poser la question suivante :

**Quel moyen avons-nous, en tant que kinésithérapeute, pour limiter une perte de force précoce d'un membre inférieur atteint sans moyen de physiothérapie ?**

## 1.2 Système musculaire

Le **muscle** est un organe composé de tissus musculaires et de tissus conjonctifs vascularisés et innervés. Ce tissu musculaire découle du phénomène/processus de myogenèse lors du développement embryonnaire.

Le corps humain est composé de plus de 600 muscles au total, catégorisés en trois groupes. Le premier groupe comprend les **muscles lisses**, composés de fibres du même nom, qui sont à commande involontaire c'est à dire non régis par la conscience, présents dans les organes ou viscères par exemple. Dans le second groupe nous retrouvons le **muscle cardiaque**, myocarde, composé de fibres striées qui est lui aussi contrôlé de manière involontaire [8]. Le troisième et dernier groupe inclut les **muscles squelettiques ou striés**, qui sont les plus présents dans le corps, on en dénombre 570. Eux ont la particularité de se contracter de manière volontaire et donc permettre un contrôle des mouvements du corps humain notamment lors de la posture ou de la locomotion. C'est ce dernier groupe musculaire sur lequel nous allons porter notre attention dans le cadre de ce mémoire.

### 1.2.1 Muscle strié

On pourrait décomposer le muscle strié en plusieurs formations qui vont de la plus grande vers la plus petite. Le muscle est avant tout enveloppé par un fascia fibreux ou aponévrose qui est une fine membrane de collagène. Ce muscle comprend plusieurs **faisceaux musculaires** qui sont regroupés par une aponévrose profonde, l'épimysium. Ces faisceaux, composés de plusieurs **fibres musculaires** également appelés **myocytes**, sont ensuite séparés par le périmysium. Ces mêmes fibres, entourées par une troisième structure conjonctive l'endomysium, sont constituées de **myofibrilles** qui sont à leur tour constituées de **myofilaments** (actine et myosine).

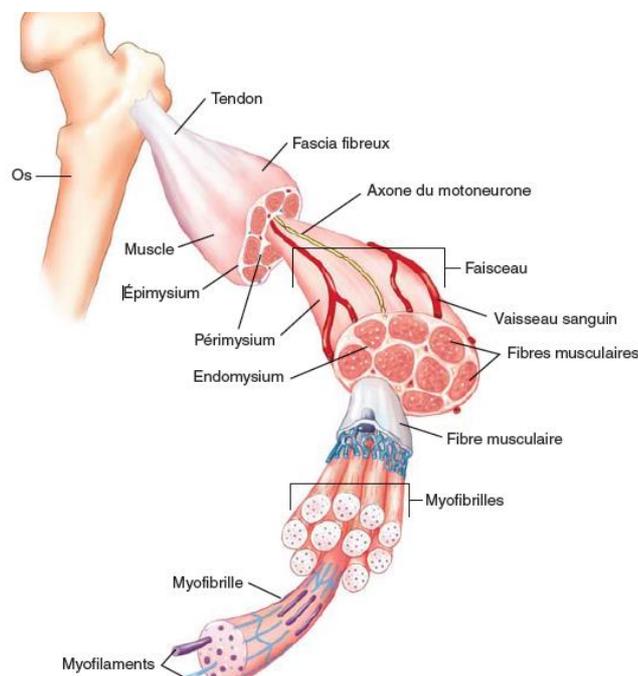


Figure 1 : Muscle strié<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <https://www.toutsurlasarcopenie.fr/muscle/> (Consulté le 15/10/2023)

### 1.2.2 Types de fibres

Dans la catégorie des muscles striés nous retrouvons différents types de fibres avec des divergences physiologiques qui vont avoir chacune un rôle essentiel sur leur résistance à la fatigue et leur production de force. Il en existe en réalité une multitude mais elles sont classées généralement en 2 types :

- Fibres de **type I** : Slow twitch ou fibre à contraction lente (rouges)
- Fibres de **type IIA** : Fast twitch ou fibre à contraction rapide (blanches)
- Fibres de **type IIB** ou **IIX** : Fast twitch ou fibre à contraction rapide (blanches)

[9]

Notons quand même que ces 2 types sont présents dans tous les types musculaires mais en quantité différente. Le reflet d'un type de fibre ou de l'autre sera modifié par la spécificité de l'entraînement ou de l'exercice auquel il sera soumis. Certaines études soumettent que suite à un entraînement spécifique, une modification des types de fibre concerne seulement celles à contraction rapide, c'est à dire de IIA → IIX ou IIB et inversement [10][11]. Néanmoins, il existe également des résultats potentiels de la modification des fibres lentes de type I vers les fibres rapides de type II et vice versa [12][13].

### 1.2.3 Propriétés musculaires

Au sein des diverses propriétés musculaires, on retrouve l'**excitabilité**, qui se réfère à la capacité du muscle à répondre à une commande ou une stimulation. La **contractilité** correspond à l'aptitude du muscle à se raccourcir et à retrouver sa position initiale. L'**élasticité** représente la capacité du muscle à se déformer, à s'allonger, et à retrouver sa forme initiale. Enfin, la **tonicité** reflète l'état de force du muscle, que ce soit au repos ou pendant une activité.

### 1.2.4 Modèle de Hill

En 1938, Hill décrit un modèle mécanique du muscle strié [14], modèle à trois composantes :

- **Contractile (CC)**, génératrice de la force et représenté par le sarcomère avec les ponts de myofilaments d'actine et de myosine.
- **Élastique série (CES)**, associé aux éléments passifs tels que le tendon, tissu conjonctif et organisé longitudinalement à la CC.
- **Élastique parallèle (CEP)** associé à la tension musculaire de repos.

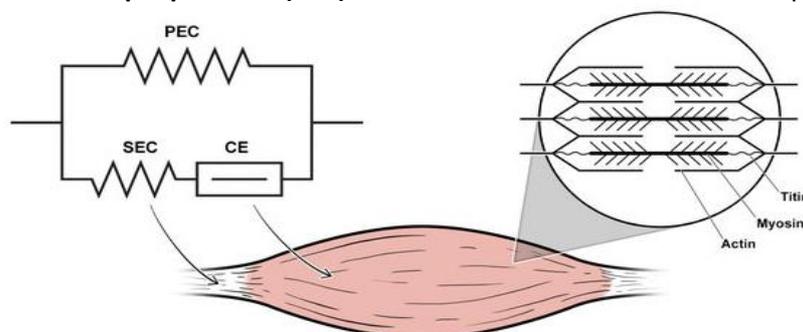


Figure 2 : Composantes transmission de force<sup>2</sup>

<sup>2</sup>[https://www.researchgate.net/publication/333650783 Scientific Basis for Eccentric Quasi-Isometric Resistance Training A Narrative Review/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/333650783_Scientific_Basis_for_Eccentric_Quasi-Isometric_Resistance_Training_A_Narrative_Review/figures?lo=1) (Consulté le 23/10/2023)

### 1.3 Mécanismes de contraction musculaire

« La contraction est la fonction essentielle des muscles striés squelettiques, responsables des mouvements du squelette. Ces mouvements sont essentiels à l'interaction de l'organisme avec son environnement, ils sont sous le contrôle du système nerveux somatique »<sup>3</sup>

#### 1.3.1 SNC et SNP

La transmission de la motricité volontaire dans le système nerveux se réalise au travers d'une voie rapide composée de deux neurones :

- Le **premier motoneurone**, appelé motoneurone **supérieur**, a pour fonction de transmettre l'information du cerveau vers la moelle épinière. Il s'agit de la voie centrale, faisant partie du **système nerveux central (SNC)**.
- Le **deuxième motoneurone**, connu sous le nom de motoneurone **inférieur**, a pour responsabilité de transmettre cette information de la moelle épinière vers le muscle strié. Cette portion de la voie est périphérique et relève du **système nerveux périphérique (SNP)**.

Le premier motoneurone forme ce que l'on appelle le faisceau pyramidal. Il est constitué d'un neurone dont le **corps cellulaire** se trouve dans la substance grise du cerveau, plus précisément dans le cortex moteur. Ce corps cellulaire adopte une forme triangulaire, d'où le terme "faisceau pyramidal".

L'**axone** du motoneurone traverse la substance blanche sous-corticale, le tronc cérébral, et descend le cordon médullaire jusqu'à la corne antérieure, où il établit une connexion avec le deuxième motoneurone.

Les corps cellulaires de tous les motoneurons supérieurs sont répartis dans le cortex frontal, spécifiquement dans l'aire motrice primaire, située en avant de la scissure de Rolando. Chacun des motoneurons du cortex frontal transmet des ordres moteurs au motoneurone périphérique dédié à un muscle spécifique.

Chaque région du cortex moteur est associée à une zone anatomique spécifique, ce qui est une représentation de la somatotopie observable dans l'homonculus moteur de Penfield [15].

Puis une fois que les axones des premiers motoneurons ont quitté le cortex moteur, ils se regroupent dans une zone au niveau de la substance blanche sous-corticale appelée capsule interne. Ils vont ensuite croiser la ligne médiane à la base du bulbe, phénomène appelé décussation pyramidale, signifiant que chaque hémisphère cérébral assure l'innervation motrice de la partie controlatérale de l'hémicorps.

Ce croisement concerne environ 85 à 90% des fibres pyramidales [16], formant ainsi le **faisceau cortico-spinal croisé** ou **latéral** responsable de l'innervation de l'hémicorps controlatéral. Les fibres restantes ne croisent pas la ligne médiane, contribuant ainsi au **faisceau cortico spinal direct** ou **antérieur** et assurant l'innervation de l'hémicorps ipsilatéral.

---

<sup>3</sup> <https://www.institut-myologie.org/enseignement/connaissances-sur-le-muscle/mecanismes-de-la-contraction/>

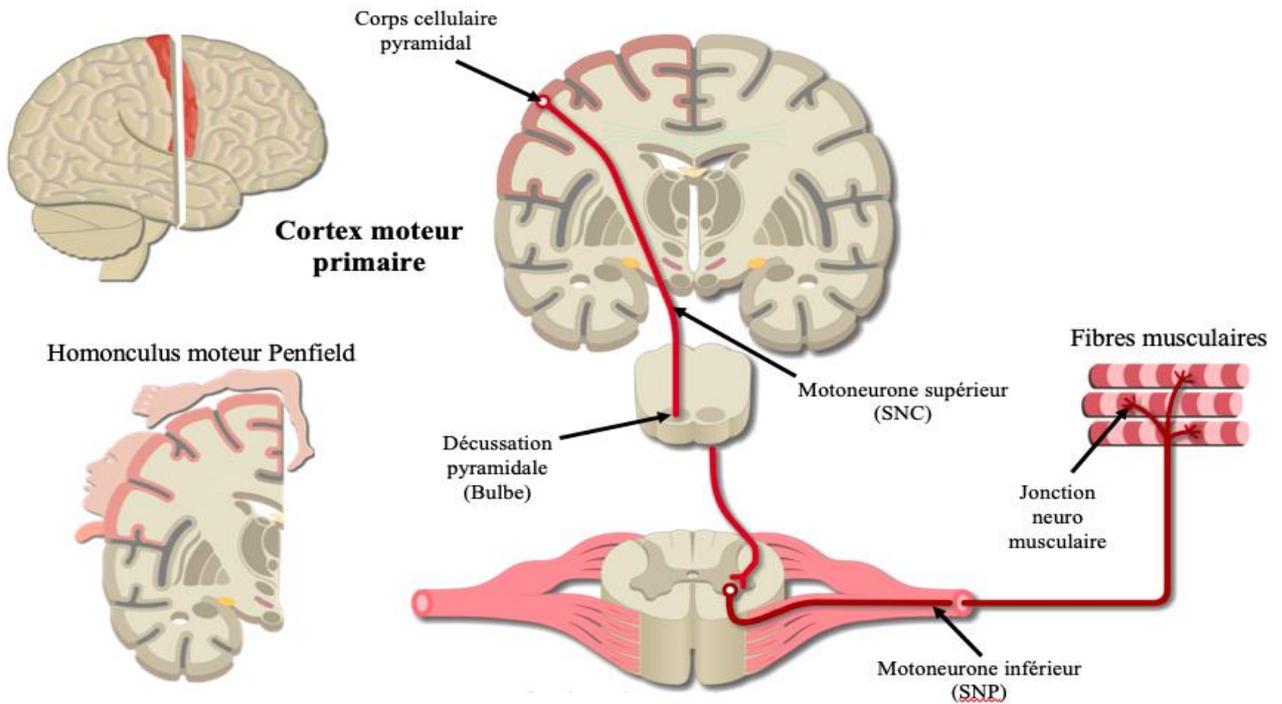


Figure 3 : Voie motrice<sup>4 5</sup>

La voie motrice périphérique représente le deuxième et dernier lieu de passage du message nerveux amenant la commande motrice jusqu'aux muscles striés, elle est formée par le deuxième motoneurone.

Son corps cellulaire est situé au niveau de la substance grise de la moelle épinière et plus spécifiquement au niveau de la corne antérieure. Son axone va quitter la ME par la racine antérieure puis le long des nerfs jusqu'au niveau de sa terminaison dans le muscle strié réalisant la plaque motrice.

Le deuxième motoneurone est sous l'influence des afférences de la voie pyramidale et extra pyramidale. La voie pyramidale va réaliser une synapse excitatrice pour transmettre le message nerveux et donc stimuler le muscle cible. Une synapse inhibitrice est également présente afin que le muscle antagoniste se relâche.

<sup>4</sup><https://www.researchgate.net/publication/362932316> La paralysie cérébrale troubles moteurs et diagnostic fonctionnel/figures (Consulté le 03/11/2023)

<sup>5</sup> <https://www.getbodysmart.com> (Consulté le 03/11/2023)

### 1.3.2 Jonction neuromusculaire

Comme nous l'avons dit précédemment le tissu musculaire est une structure innervée qui répond au couple excitation-contraction via la plaque motrice ou jonction neuromusculaire.

La synapse neuromusculaire qui lie le motoneurone au muscle va, à travers différentes étapes, permettre la contraction de ce dernier. Un influx ou message nerveux va activer des réactions chimiques qui entraîneront la contraction musculaire.

<b>Nerveux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Influx ou message nerveux , potentiel d'action à la terminaison présynaptique</li> <li>→ Activation canaux calciques <math>Ca^{2+}</math> entraînant la polarisation</li> <li>→ Libération du <b>neurotransmetteur acétylcholine (ACh)</b> dans la fente synaptique</li> </ul>
<b>Synapse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ L'ACh présente dans la fente se lie aux récepteurs de la <b>plaque motrice du muscle</b></li> <li>→ Soit détruite ou repompage</li> </ul>
<b>Muscle</b>	→ Système de <b>transduction entrée de <math>Na^+</math> dans la cellule</b> déclenche le potentiel de plaque motrice dépolarisation.

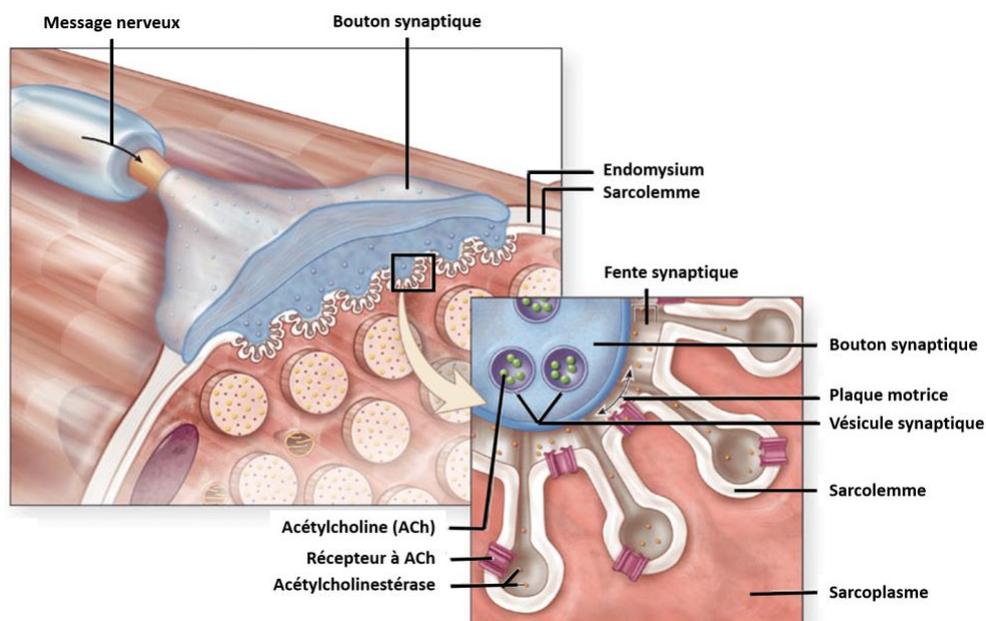


Figure 4 : Synapse Neuromusculaire<sup>6</sup>

<sup>6</sup> <https://www.biologie101.fr/terminale-svt/mouvement-systeme-nerveux-comportements/cellule-musculaire-et-contraction> (Consulté le 17/10/2023)

### 1.3.3 Mécanismes cellulaires

Le **sarcomère** représente la plus petite unité contractile du muscle, élément de base des myofibrilles, et est constitué de systèmes de filaments protéiques bien distincts. Les fibres musculaires se contractent suite aux glissements des myofilaments d'**Actine** sur les myofilaments de **Myosine**.

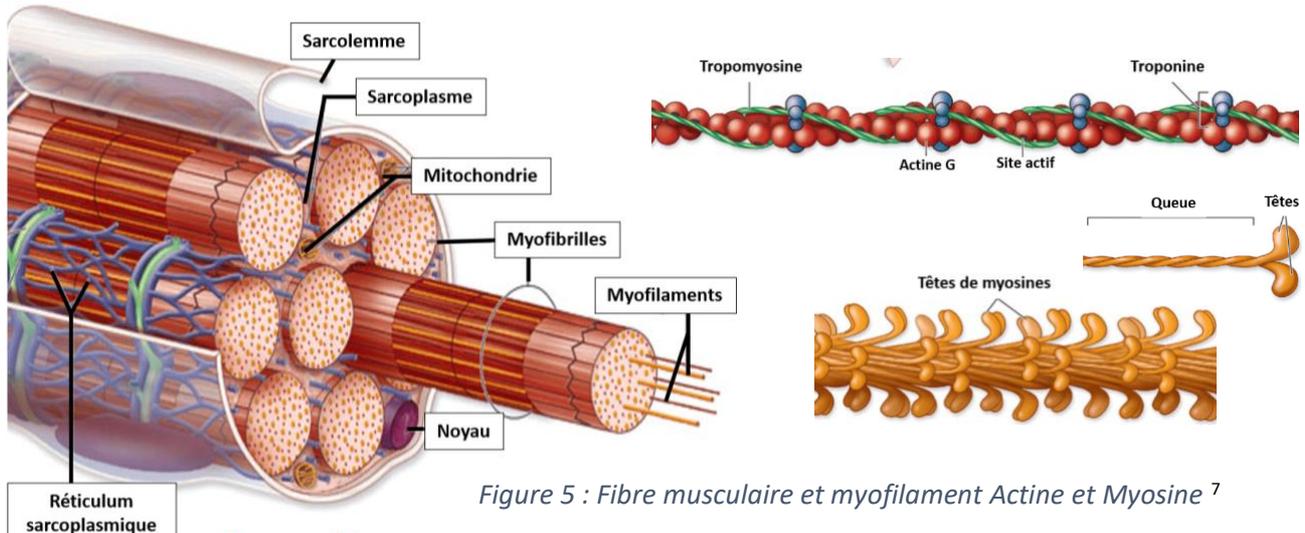


Figure 5 : Fibre musculaire et myofilament Actine et Myosine <sup>7</sup>

- **Myofilament Actine** : Filament fin, fixé sur la ligne Z  
Brins entrelacés Actine G  
Protéines régulatrices Tropomyosine et Troponine
- **Myofilament Myosine** : Filament épais, entre 2 stries Z  
Présence d'une queue et deux têtes
- **Filament de Titine** : Protéine élastique assure la stabilité mécanique du sarcomère

Lors de la contraction musculaire ce sont les sarcomères qui se raccourcissent. Ce sont bien les lignes Z et les myofilaments d'actine, en bleu, qui se rapprochent les uns par rapport aux autres. Ceci est rendu possible par la traction des myofilaments de myosine, en rouge, qui sont fixes sur les myofilaments d'actine.

À grande échelle, ce sera l'ensemble de ces raccourcissements cellulaires au niveau du muscle qui entraineront le mouvement.

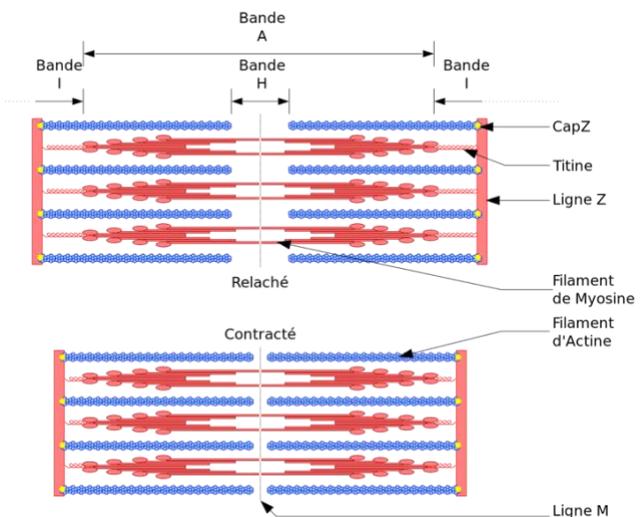


Figure 6 : Sarcomère <sup>8</sup>

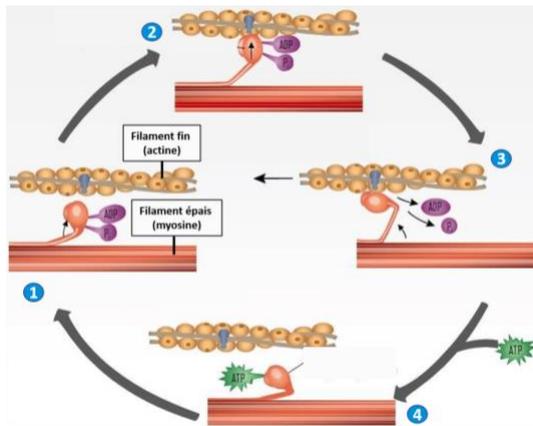
C'est l'alternance et la juxtaposition des ces filaments dans les sarcomères qui attribuent cet aspect particulier en strie [17] avec apparition de zone sombre ou claire en fonction de la superposition des protéines.

<sup>7</sup> <https://www.biologie101.fr/terminale-svt/mouvement-systeme-nerveux-comportements/cellule-musculaire-et-contraction> (Consulté le 17/10/2023)

<sup>8</sup> <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sarcomère> (Consulté le 18/10/2023)

### 1.3.4 Mécanismes moléculaires

L'association de l'acétylcholine sur les récepteurs post-synaptiques va entraîner un potentiel d'action des cellules musculaires. Le calcium ( $Ca^{2+}$ ) qui est libéré dans le cytosol va permettre la contraction en laissant notamment apparaître les sites de fixation des myofilaments d'actine pour les têtes de myosine [18]. Ensuite, chaque tête de myosine va s'associer à une molécule d'Adénosine triphosphate (ATP), encore appelée monnaie énergétique. À noter qu'au repos, absence d'ATP, les têtes de myosine sont liées aux filaments d'actine [19] conférant une rigidité musculaire. Le cycle de contraction musculaire peut recommencer tant que la quantité d'ATP et de  $Ca^{2+}$  est suffisante au niveau de la fibre musculaire.



1. L'hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi entraîne une modification de la tête de myosine
2. Les têtes de myosine se fixent alors aux myofilaments d'actine
3. Les têtes de myosine tractent les myofilaments d'actine au centre du sarcomère (raccourcissement) ADP + Pi sont relâchés
4. La molécule d'ATP s'ancre sur la tête de myosine qui a pour effet de la décrocher du filament d'actine.

Figure 7 : Cycle de contraction musculaire <sup>9</sup>

### 1.3.5 Synthèse de l'ATP

L'ATP ou Adénosine Triphosphate est une molécule qui sert à transporter l'énergie à l'intérieur des cellules essentielles à la contraction et relaxation des fibres musculaires. Afin de conserver l'activité de la contraction musculaire, le métabolisme doit approvisionner des molécules d'ATP à hauteur de leur dégradation au cours de la contraction. L'énergie recueillie provient particulièrement de l'oxydation des graisses et hydrates de carbone en situation aérobie. Cependant il existe des réactions chimiques permettant de fournir de l'énergie, ATP, en situation anaérobie pour la contraction concernant les fibres rapides.

Pour cela, le métabolisme peut s'appuyer sur trois grandes voies de production qui sont la voie aérobie, anaérobie lactique et anaérobie alactique :

Voies métaboliques	Anaérobie alactique (voies des phosphagènes)	Anaérobie lactique (glycolyse anaérobie)	Aérobie
Substrats énergétiques	Créatine phosphate (PCr)	Glycogène / Glucose	Glucides / Lipides
Molécules ATP produites	1	2[20]	32 (glucose)[21] 129 (acide gras)
Délai d'utilisation	immédiat	12 sec	90 à 180 sec
Type d'effort	Maximale, très élevée	Intensité élevée	Faible à modéré
Capacité	12 sec	2 à 3 minutes	illimité
Limite	Réserve en ATP et PCr	Lactate	VO <sub>2</sub> max

Figure 8 : Voies métaboliques

<sup>9</sup> <https://www.biologie101.fr/terminale-svt/mouvement-systeme-nerveux-comportements/cellule-musculaire-et-contraction> (Consulté le 17/10/2023)

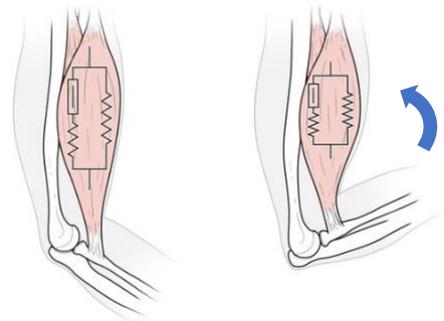
### 1.3.6 Mode de contraction musculaire

Il existe 3 types de contractions musculaires volontaires différentes :

- **Concentrique** :

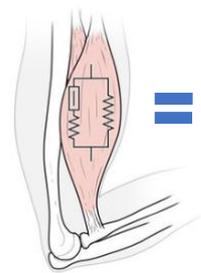
Elle se définit comme une contraction du muscle permettant une production de force suffisante à déplacer une résistance entraînant donc un mouvement durant lequel le muscle se raccourcit [22].

On l'appelle également « phase positive ». La contraction concentrique maximale, 1RM ou répétition maximale, est généralement utilisée comme référence d'entraînement.



- **Isométrique** :

Elle se définit comme un changement de la tension musculaire mais sans modification de longueur du muscle. C'est une contraction statique contre résistance pouvant être effectuée avec différentes charges. On estime que la contraction isométrique maximale équivaut à 110% - 115% de la 1RM concentrique.



- **Excentrique** :

Elle se définit comme une contraction du muscle réalisant une force frénatrice avec une force externe supérieure à la force même du muscle [23]. Les résistances pouvant varier d'une faible charge à une charge supra maximale (>1RM). Ce mode de contraction correspond au mouvement actif durant lequel le muscle s'allonge.

On l'appelle également « phase négative ». La contraction excentrique supra maximale équivaut à 130% de la 1RM concentrique.

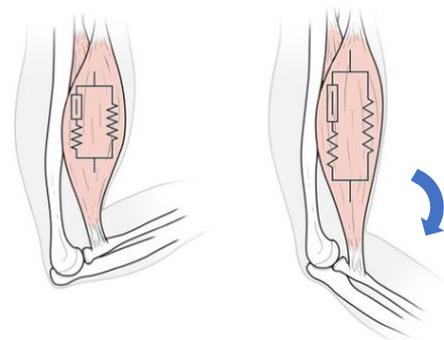


Figure 9 : Contraction concentrique, isométrique et excentrique <sup>10</sup>

Le régime de contraction excentrique fait partie des principaux critères de cette revue dont l'objectif est d'établir ces effets sur le gain de force lors du phénomène d'éducation croisé. C'est pourquoi nous allons la développer et l'aborder de manière plus détaillée.

<sup>10</sup>[https://www.researchgate.net/publication/333650783\\_Scientific\\_Basis\\_for\\_Eccentric\\_Quasi-Isometric\\_Resistance\\_Training\\_A\\_Narrative\\_Review/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/333650783_Scientific_Basis_for_Eccentric_Quasi-Isometric_Resistance_Training_A_Narrative_Review/figures?lo=1) (Consulté le 26/10/2023)

## 1.4 Excentrique

### 1.4.1 Principes

Contrairement au concentrique, la contraction excentrique se distingue par un allongement du complexe muscle-tendon entraînant des adaptations spécifiques. Ce type de travail est intéressant et largement utilisé dans le domaine de la rééducation au vu des ses propriétés mécaniques et physiologiques.

Ce mode de contraction permet de rechercher une **force plus importante** en comparaison des autres régimes comme le concentrique ou l'isométrique [24]. Par exemple, il a été démontré que la force isocinétique excentrique serait 20 à 60% supérieure à la force isocinétique concentrique [25]. Le régime de contraction excentrique agit de manière différente selon la relation force/vitesse [26] avec, paradoxalement, une force engendrée qui sera plus élevée en fonction d'un degré de vitesse plus important [27].

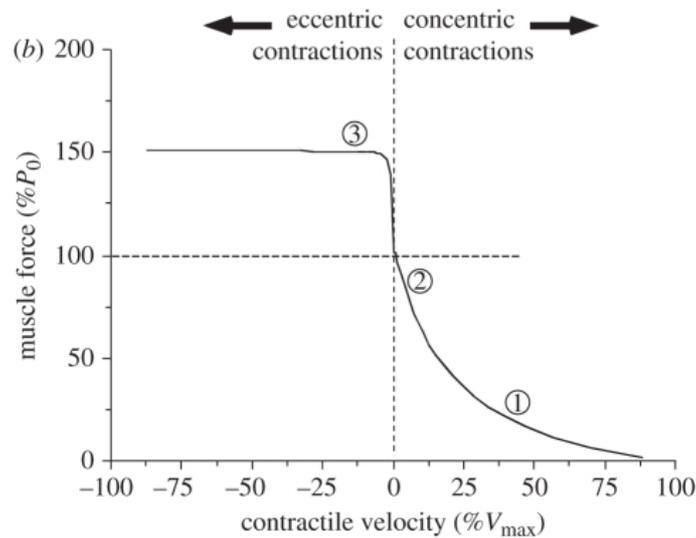


Figure 10 : Relation F/V concentrique et excentrique d'après Lieber and al.<sup>11</sup>[26]

Il produirait une **adaptation structurelle au niveau de la longueur des fascicules du muscle** et avec une hypertrophie plus marquée aux **extrémités distales** contrairement à l'entraînement concentrique qui produirait des modifications dans le corps musculaire associé à des modifications de l'angle de pennation, angle de fibres musculaires [28].

Encore aujourd'hui les mécanismes qui entrent en jeu lors des contractions excentriques tentent d'être élucidés et sont formulés sous différentes hypothèses en regard de la littérature :

La force importante développée lors de la contraction excentrique serait produite et fonction du rapport de détachement des ponts des filaments d'actine / myosine [29] ainsi que de l'augmentation de longueur du sarcomère entraînant également un étirement du **filament de Titine** (voir schéma précédent) qui accentuerait sa rigidité entraînant un transfert de force plus important [30] dans l'ensemble du sarcomère.

Une autre caractéristique est que la **contraction excentrique semble solliciter moins d'énergie** que la contraction concentrique [31].

<sup>11</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3130443/> (Consulté le 29/10/2023)

Sur le plan neurologique les contractions excentriques présentent également leurs spécificités. Lors d'un travail de contractions excentriques maximales et sub maximales l'activité corticale semble davantage stimulée mais avec une activité ou taux de décharge des unités motrices (UM) diminué [32] par rapport aux contractions concentriques. Cette diminution d'activité des UM sous entend une inhibition qui se produirait principalement au niveau spinal par le biais des voies descendantes depuis les centres supra spinaux [33]. Ce niveau d'activation serait inférieur chez des personnes non entraînées [34].

En le comparant au travail concentrique, l'excentrique réduirait l'inhibition intra corticale et augmenterait l'excitabilité corticospinale de 37 à 51 %, qui peuvent tous deux contribuer à améliorer la force vers les membres controlatéraux grâce au **phénomène d'éducation croisée** [35] que nous allons aborder en détail prochainement dans cette revue.

#### 1.4.2 *Entraînement excentrique*

*« L'entraînement en résistance peut être défini comme l'acte de contractions musculaires volontaires répétées contre une résistance supérieure à celles normalement rencontrées dans les activités de la vie quotidienne. On sait qu'un entraînement de ce type augmente la force via des adaptations au niveau des systèmes musculaires et nerveux. »<sup>12</sup>*

L'entraînement excentrique peut être différencié en trois types d'exercices comprenant un travail à charge constante (standard), isocinétique (vitesse constante) et isoinertiel (résistance constante) entraînant chacun des réponses physiologiques différentes [36].

Généralement la force maximale ou 1RM, est basée sur la charge la plus élevée réalisée par le participant sur une unique répétition dans le mode de contraction concentrique. Cette répétition maximale (RM) peut être estimée de manière relativement précise et ce jusqu'à 10 répétitions [37], apportant un réel intérêt pour des mesures sur des participants débutants.

Le régime de contraction excentrique permet de développer plus de force que tout autre régime de contraction que ce soit concentrique ou isométrique. L'isométrique maximal pourrait parfois être plus fort encore que l'excentrique mais seulement sur un angle particulier lors du mouvement [38].

Donc c'est à partir de cette 1RM, réelle ou estimée, que l'on va établir l'intensité du programme. On peut à ce moment là différencier l'entraînement excentrique en trois catégories [39] :

- **Sub ou sous maximale** → charge inférieure à la 1RM
- **Maximale** → charge égale à la 1RM
- **Supra maximale** → charge supérieure à la 1RM

L'excentrique supra maximal permettrait une stimulation bien plus importante des effets que ce soit en excentrique et concentrique [39].

---

<sup>12</sup>[https://www.researchgate.net/publication/6609134\\_Cross\\_education\\_Possible\\_mechanisms\\_for\\_the\\_contralateral\\_effects\\_of\\_unilateral\\_resistance\\_training](https://www.researchgate.net/publication/6609134_Cross_education_Possible_mechanisms_for_the_contralateral_effects_of_unilateral_resistance_training)

### 1.4.3 Charge d'entraînement

La charge d'entraînement qui englobe notamment le volume, l'intensité, la fréquence ainsi que la récupération est un point crucial de prise en charge qui devra être justifié et adapté aux objectifs. Le respect de la quantification de cette charge et des données actuelles sur un entraînement spécifique peut éviter un stress important de l'organisme avec notamment l'apparition de blessures.

Le travail excentrique peut être réalisé d'innombrable manière (poids/vitesse/répétition) sans pour autant apporter les mêmes bénéfices ou risques. Voici quelques recommandations qui devraient être respectées et en lien avec la suite de cette revue :

#### ⇒ Intensité

Lors d'un travail excentrique réalisé à une intensité sub-maximale, maximale ou supra-maximale, la charge devrait osciller entre 75 et 140% de 1RM avec un temps de récupération compris entre 45 et 240 secondes entre les séries [40].

#### ⇒ Volume

Concernant le volume d'entraînement excentrique standard ou isocinétique, il est préconisé de réaliser 3 à 4 séries par exercice, 8 à 12 exercices par session et 2 à 20 répétitions en les adaptant bien sûr aux objectifs [41][42].

#### ⇒ Récupération

La récupération suite à une première séance d'excentrique devrait se situer entre 48 et 72 heures [43]. Elle peut être réduite au fil du temps et de l'adaptation des participants aux stimuli de l'exercice.

#### ⇒ Fréquence

La fréquence des entraînements excentriques suit les lignes habituelles des entraînements en force avec 1 à 3 séances par semaine sur une durée comprise entre 4 et 24 semaines [44][45].

### 1.4.4 Risques

L'entraînement excentrique est spécifique car il permet de travailler avec des charges maximales, supra maximales et sur plusieurs répétitions. Les structures musculaires et aponévrotiques se retrouvent soumises à des hyper tensions entraînant des microlésions cellulaires au niveau de l'architecture du sarcomère et du filament de titine [46].

S'ensuit une réaction inflammatoire physiologique qui peut entraîner des DOMS (Delayed-Onset Muscular Soreness) ou douleur musculaire d'apparition retardée [47].

Les symptômes peuvent apparaître 12 à 24 heures après la séance, pour atteindre leur paroxysme entre 24 et 72 heures. Les symptômes régressent puis disparaissent autour de 5 ou 7 jours [43]. Il est évident que les sujets répondront de manière différente à ce travail en fonction de leur âge, sexe, condition physique, antécédents de travail musculaire, prédominance musculaire...

## 1.5 Cross education

Cross education ou éducation croisée est un phénomène neurophysiologique complexe qui décrit l'augmentation de la force d'un membre non entraîné suite à un entraînement unilatéral du membre opposé.

« Alors que la physiologie des adaptations musculaires suite à un entraînement en résistance est bien comprise, la nature des adaptations neuronales est moins claire »<sup>13</sup>

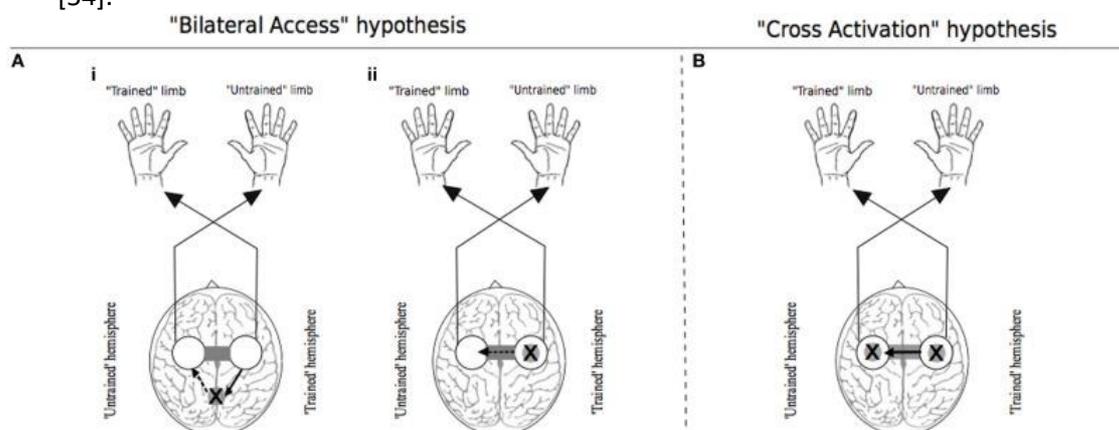
### 1.5.1 Historique et principes

Découvert il y a plus d'un siècle (1894), E.W. Scripture, T.L. Smith et E. Brown publient l'article « On the education of muscular control and power » et deviennent les précurseurs de l'éducation croisée en l'identifiant officiellement comme l'amélioration bilatérale de performance suite à un entraînement unilatéral. Depuis, bon nombre d'études ont pu présenter la présence de ce phénomène d'éducation croisée à la suite d'entraînement à **contraction volontaire**, de stimulation électrique, de vibration et même de feedback par miroir [48]. Depuis, de nombreuses études tentent de mettre en avant les possibles mécanismes responsables de ce phénomène complexe.

À ce jour, les processus sous-jacents de l'éducation croisée se situeraient au niveau cortical, sous-cortical et de la moelle épinière [49][50].

Deux principaux modèles théoriques traditionnels (*schéma ci-dessous*)[51] proposés pour expliquer comment l'entraînement unilatéral peut produire des changements bilatéraux au niveau du **cortex cérébral** :

- L'hypothèse « **Cross Activation** » ou « activation croisée » décrit que l'activité corticale bilatérale durant un exercice unilatéral permet des adaptations neuronales synchrones des deux hémisphères cérébraux. Il semblerait que l'étendue de l'activation croisée résulterait du **niveau d'intensité de contraction de l'exercice unilatéral** [52].
- L'hypothèse « **Bilateral Access** » ou « accès bilatéral » décrit que les **engrammes moteurs** élaborés lors des exercices unilatéraux sont également utilisables pour le contrôle du membre non entraîné opposé [53] avec un niveau de transfert en fonction de la **complexité de la tâche** [54].



<sup>13</sup>[https://www.researchgate.net/publication/6609134\\_Cross\\_education\\_Possible\\_mechanisms\\_for\\_the\\_contralateral\\_effects\\_of\\_unilateral\\_resistance\\_training](https://www.researchgate.net/publication/6609134_Cross_education_Possible_mechanisms_for_the_contralateral_effects_of_unilateral_resistance_training) (Consulté le 22/10/2023)

Cependant, ce ne sont que des hypothèses et nous ne savons pas si les modèles d'« activation croisée » ou d'« accès bilatéral » sont la seules origine de l'éducation croisée.

Le phénomène d'éducation croisée sur la force musculaire est une cascade de modifications au niveau du système nerveux central.

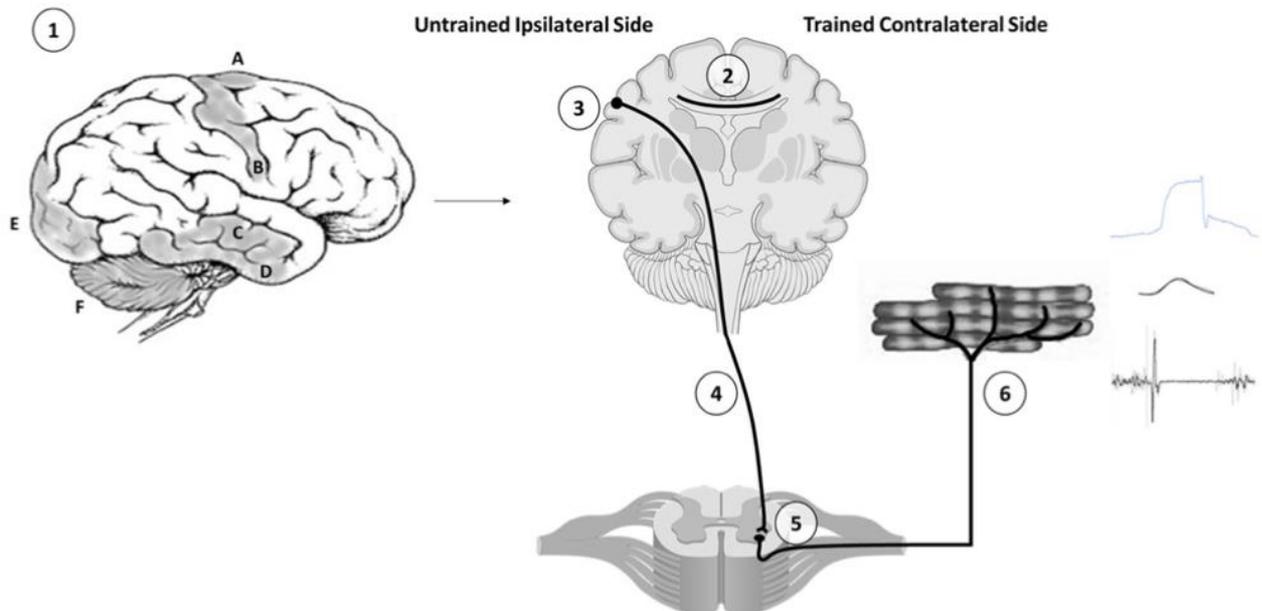


Figure 12 : Localisations potentielles des adaptations neuronales de l'éducation croisée [48]

- «
- 1) Aire motrice supplémentaire (A), cortex moteur primaire (B), gyrus temporal moyen (C) et inférieur (D), lobe occipital (E) et cervelet (F)
  - 2) L'inhibition inter hémisphérique
  - 3) Mesures TMS réduites au cortex moteur primaire ipsilatéral du côté non entraîné (SICI)
  - 4) Tractus corticospinal ipsilatéral du membre entraîné sur l'excitabilité et l'inhibition
  - 5) L'excitabilité des motoneurones ipsilatéral du membre entraîné
  - 6) Activation volontaire au TMS, de l'EMG brut engendré par stimulation corticale pendant la contraction maximale » [48]

L'éducation croisée et une compréhension accrue des mécanismes qui la caractérise permettraient probablement d'optimiser son effet à travers la mise en place d'entraînement spécifique dans un but d'améliorer certains déficits concernant des patients présentant des atteintes d'un membre.

### 1.5.2 Intérêt thérapeutique

Une immobilisation des membres peut avoir des conséquences importantes en particulier chez la PA qui est plus exposée aux chutes. Entraînant par la suite une diminution de la force musculaire, un déconditionnement général et une dégradation de la qualité de vie.

Cependant, même les sujets jeunes peuvent être exposés aux blessures et donc au risque d'être immobilisés. Une étude a mis en avant qu'une **immobilisation du genou de 3 semaines** peut entraîner une **diminution de force de 47%** sur une population âgée de  $22 \pm 3$  ans [55]. Un entraînement du membre opposé durant la période d'immobilisation permettrait d'atténuer cette perte de force [56][57][58].

On comprend alors tout le bénéfice que peut apporter l'éducation croisée dans le cadre d'une prise en charge thérapeutique. Être en mesure de stimuler à distance un muscle ou groupe musculaire de manière active est un outil non négligeable face à une atteinte immobilisant le patient. D'autres examens vont dans le même sens en présentant ainsi la pertinence de l'éducation croisée pour une utilisation en tant que **moyen de réadaptation pour des blessures unilatérales** [59][60].

Le phénomène de Cross Education ne montre **pas de limitation concernant l'âge ou le sexe** d'une population. À ce sujet, une méta-analyse incluant 96 études a présenté un gain de force suite à l'éducation croisée de 18% chez une population jeune et saine, de 15% sur une population âgée saine [61].

De récentes études ont évalué les effets de l'éducation croisée **post chirurgicale** suite à une reconstruction du ligament croisé antérieur (LCA). L'objectif était de quantifier l'augmentation de force du quadriceps de la cuisse opérée suite à un entraînement concentrique et excentrique du membre sain controlatéral. Une augmentation significative sur les deux modes de contractions de 28 et 31% sur la force isométrique du quadriceps par rapport au groupe témoin [62].

L'effet de l'éducation croisée a été constaté chez des patients sans lésions neurologiques, mais aussi chez des patients atteints de troubles neurologiques, AVC [63][64] et SEP [65] avec des gains de force de 29% [61].

### 1.5.3 Effets du Cross Education

Deux récentes méta analyses présentent les effets de l'éducation croisée sur l'augmentation de la force des membres supérieurs et inférieurs non entraînés. La première de 2017 basée sur 31 ECR a démontré un gain de force de 11,9%. Avec une augmentation de 9,4% concernant les membres supérieurs et **16,4% pour les membres inférieurs** [66].

La seconde de 2018, basée sur 22 études, quant à elle présente des effets de l'éducation croisée encore plus importants sur la force avec un gain de 21,1%. Avec une augmentation de 12,9% concernant les membres supérieurs et de **27,1% pour les membres inférieurs chez une population saine après une période de renforcement musculaire répété** [67].

Le gain de force transféré au membre non entraîné serait proportionnel au gain de force obtenu du membre controlatéral soumis à un entraînement [68]. Cette donnée peut être intéressante en clinique pour estimer indirectement le potentiel gain du membre atteint par une évaluation du membre sain.

On constate à travers ces méta analyses que l'entraînement, quel que soit le régime de contraction sollicité, a entraîné une augmentation de la force du membre controlatéral non entraîné à travers l'éducation croisée.

En regardant de plus près, on peut constater que le gain de force semble être optimisé lors d'un mode de contraction spécifique. Alors qu'un entraînement isométrique produirait une amélioration de force sur le membre non entraîné de 8,2 %, l'entraînement concentrique permettrait un gain de 11,3 %, l'entraînement isotonique-dynamique de 15,9 % et **l'entraînement excentrique de 17,7 %** selon la méta analyse de Manca et al. [66].

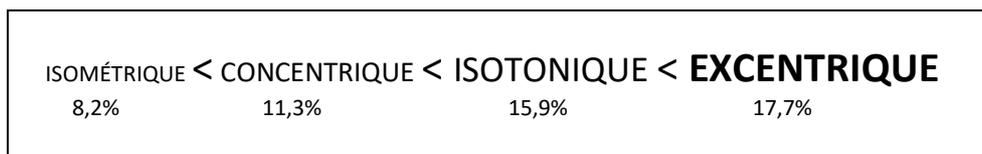


Figure 13 : Régime de contraction sensible au phénomène d'EC selon Manca and al. [66]

**L'entraînement excentrique engendre donc des gains plus importants de force croisée** par rapport à n'importe quel autre mode de contraction. Même si les conditions optimales du renforcement pour rechercher l'effet croisé ne sont pas aussi évidentes que le renforcement standard, à charge d'entraînement et population équivalente le rapport entre les gains suite à l'entraînement excentrique seraient doublés par rapport au concentrique que ce soit le membre supérieur entraîné ou non entraîné [69].

La spécificité de l'entraînement utilisé s'avère donc cruciale pour optimiser l'effet et les résultats d'un traitement qui dans notre cas correspond au plus grand transfert de force possible vers un membre sous utilisé/sollicité.

#### 1.5.4 Objectif de la revue de littérature

À notre connaissance aucune revue depuis 2017/2018 n'a été réalisée concernant l'effet de l'éducation croisée et plus spécifiquement du renforcement unilatéral excentrique des extenseurs du genou et des gains possibles sur les couples de force concentrique, excentrique et isométrique.

Concernant les méta analyses citées plus tôt, elles font un état des lieux de l'effet de l'éducation croisée sur un ensemble d'articulations du membre inférieur et du membre supérieur. De plus nous notons que les études utilisées peuvent dater pour la plus ancienne de plus de 50 ans, et qui peut justifier la pertinence de cette revue.

Parmi ces 31 études, on en dénombre onze portées sur les extenseurs de genoux. Parmi ces onze études seulement quatre analysent les effets du travail excentrique lors du cross education dont deux datant de 1995 et 1999.

Depuis d'autres études ont vu le jour. Il nous a semblé judicieux d'établir une revue de littérature avec des études plus récentes, de moins de dix ans, concernant **l'effet du travail excentrique des extenseurs de genou sur le gain de force des muscles homologues controlatéraux non entraîné grâce au phénomène connu d'éducation croisée.**

## 2. Méthodologie

### 2.1 Critères d'éligibilité des études de la revue

Le but de cette revue de littérature est de mettre en avant l'effet de l'éducation croisée sur les gains de force générés des extenseurs de genou d'un membre inférieur non entraîné après un travail de renforcement excentrique controlatéral. Cette revue traitera donc une question d'ordre **thérapeutique**.

Le schéma d'étude le plus adapté pour une question thérapeutique traitant de l'efficacité d'un traitement ou d'une méthode par exemple est l'**essai clinique randomisé** (ECR).

- **Population**

Les études sélectionnées dans cette revue de littérature portent sur un échantillon de jeunes adultes, hommes et femmes en bonne santé. La sélection de la population devra suivre une intervention. Il sera représenté par un groupe dit expérimental.

Seront exclus les participants(es) présentant des antécédents de chirurgie ou de blessures durant les six derniers mois au niveau des membres inférieurs.

- **Intervention**

Dans cette revue de littérature, l'intervention correspond au suivi d'un programme d'**entraînement unilatéral excentrique** en force ciblant les **extenseurs du genou** de manière répétée et sur plusieurs semaines par le groupe dit expérimental.

- **Comparateur**

Le comparateur de cette revue sera l'absence d'entraînement de renforcement des extenseurs du genou, représenté par un groupe contrôle afin d'évaluer les effets du cross education après un programme excentrique.

- **Outcome** ou critères de jugement

Les critères de jugement porteront sur l'augmentation du **couple de force maximale concentrique, excentrique et isométrique** des **extenseurs du genou du membre non entraîné** évalué sur dynamomètre isocinétique.

## 2.2 Méthodologie de recherche

### 2.2.1 Sources documentaires

L'élaboration de cette revue de littérature a impliqué l'utilisation de divers moteurs de recherche. Parmi les bases de données exploitées nous retrouvons :

- **Pubmed** : Principal outil de recherche de données bibliographiques en médecine et en biologie.
- **Cochrane Library** : Bibliothèque comportant plusieurs bases de données spécialisées dans les domaines de la médecine et de la santé.
- **PEDro** : Bases de données des essais cliniques de Physiothérapie.
- **Google scholar** : Outil de recherche d'articles et de publications scientifiques non spécialisé dans le domaine de la santé

D'autres sources ont également été exploitées, telles que les références citées dans certains articles et la littérature grise, y compris d'autres mémoires ou thèses de fin d'études provenant de la base de données DUMAS.

### 2.2.2 Équation de recherche

La création d'une équation de recherche est essentielle pour cibler de manière optimale les études les plus pertinentes. Pour élaborer cette équation, nous utiliserons le **modèle PICO**. Cet acronyme guide la définition des termes nécessaires pour formuler une question clinique :

- P : Population
- I : Intervention
- C : Comparateur
- O : Outcomes

Il permet de déterminer les quatre éléments importants de la question clinique, facilitant ainsi une recherche précise dans la littérature. La liste des mots importants et synonymes employés pour l'équation de recherche de cette revue sont explicités dans le tableau suivant :

Mots clés	Français	Anglais
P	Jeunes adultes	Young adults
I	Éducation croisée Exercice croisé Transfert croisé Entraînement unilatéral Excentrique	Cross education Contralateral effect Inter limb Cross exercise Cross transfer Unilateral training Eccentric
C	Groupe contrôle	Control group
O	Force	Strength

Tableau 1 : PICO

Ensuite l'équation de recherche est élaborée à partir des mots ou groupes de mots-clés et leurs synonymes raccordés par des opérateurs booléens "OR" pour "OU" et "AND" pour "ET". Ils sont

employés spécifiquement pour la base de données PubMed et Cochrane Library. Pour les autres bases de données, on utilise une équation simplifiée. Voici les équations de recherche implémentées dans les bases de données PubMed, Cochrane Library, PEDro et Google Scholar et les résultats recueillis :

Bases de données	Équation de recherche	Résultats 24/11/2023
<b>PubMed</b>	(((((("cross education"[All Fields]) OR ("contralateral effect*")) OR ("inter limb"[All Fields])) OR ("cross exercise"[All Fields])) OR ("cross transfer"[All Fields])) OR ("unilateral training"[All Fields])) OR ("unilateral exercise"[All Fields])) AND ("eccentric"[All Fields])) AND ("strength"[All Fields]) AND (2013:2023[pdat])	<b>36</b>
<b>Cochrane Library</b>	in Title Abstract Keyword "cross education" OR "cross exercise" OR "unilateral training" AND "eccentric" AND "strength" AND 2013 to 2023	<b>97</b>
<b>PEDro</b>	in Abstract & Title "cross education" Published Since 2013	<b>49</b>
<b>Google Scholar</b>	in Title Keyword "cross education" AND "eccentric"	<b>10</b>

Tableau II : Équation de recherche

## 2.3 Méthode d'extraction et d'analyse des données

### 2.3.1 Méthode de sélection des études

L'application de cette équation a conduit à l'identification de **192 articles** en rapport avec notre sujet. Pour affiner la sélection de ces études pour la revue, des critères d'inclusion et d'exclusion ont été établis. Voici en détail les différentes étapes qui ont été opérées :

	Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
1 <sup>ère</sup> Étape : Étude des articles par titre	<ul style="list-style-type: none"> <li>Notion d'éducation croisée ou des termes en lien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Présence d'une pathologie explicitée</li> </ul>
2 <sup>ème</sup> Étape : Étude des articles par résumé/abstract	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protocole de renforcement excentrique des extenseurs genou</li> <li>Population jeune et saine</li> <li>Articles publiés en Anglais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zone anatomique différente</li> <li>Doublons</li> <li>Études avant 2013</li> <li>Autres langues</li> </ul>
3 <sup>ème</sup> Étape : Étude complète des articles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Essai clinique randomisé</li> <li>Couple de force maximal évalué sur isocinétisme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autres schémas d'études</li> <li>Autres outils de mesure</li> </ul>

Tableau III : Critères d'inclusion et d'exclusion

### 2.3.2 *Évaluation de la qualité méthodologique des études sélectionnées*

Il est essentiel de procéder à une analyse critique des articles scientifiques choisis avant de pouvoir tirer des conclusions sur leurs résultats. L'évaluation de la validité interne des essais cliniques randomisés peut être réalisée à l'aide de la grille de lecture critique appelée **échelle PEDro**, constituée de 11 critères méthodologiques.

Cet outil offre une méthode structurée pour évaluer la qualité méthodologique des études et contribue ainsi à une interprétation plus éclairée de leurs résultats.

À l'issue de l'analyse critique, une note entre 0 et 10 est assignée. Un score plus bas indique une probabilité accrue de difficultés d'interprétation en raison d'un risque élevé de biais. En revanche, un score plus élevé suggère une qualité méthodologique correcte dans la conception de l'étude.

### 2.3.3 *Extraction des données*

Afin de condenser de manière optimale les informations essentielles des articles, les données seront extraites à l'aide de tableau de sept colonnes. Les informations incluses dans ce tableau comprendront notamment :

1. Article : Présentation du titre, auteurs, date de publication et du schéma d'étude
2. Objectif : Un résumé de l'objet de l'étude et de son score PEDro.
3. Population : Les différentes caractéristiques des participants (nombre, âge, sexe), les groupes formés ainsi que les critères d'inclusion.
4. Intervention : Présentation du protocole d'entraînement excentrique avec la durée, le nombre de séances, séries, répétitions ainsi que l'intensité de la charge et/ou amplitude de travail.
5. Comparateur : Détails des groupes formés par l'étude incluant ou non la mise en place d'un protocole d'entraînement.
6. Outcomes : Détails des différents critères de jugements de l'étude.
7. Résultats : Les résultats obtenus par les auteurs concernant nos critères de jugement.

### 2.3.4 *Méthode de synthèse des résultats*

Les différentes phases de sélection des études sont présentées dans la partie suivante « résultats ». Les détails sur le choix d'exclure des études seront spécifiés. Concernant les études incluses, nous utiliserons des tableaux synthétisant les caractéristiques ainsi que les risques de biais associés.

L'objectif de cette revue de littérature est d'évaluer les gains concernant les couples de force maximale des extenseurs du genou d'un membre inférieur non entraîné suite à un entraînement musculaire excentrique controlatéral grâce au phénomène de Cross education. Si possible de les comparer aux groupes contrôles, pour ce faire les données recueillies comprendront si possible :

- L'intervalle de confiance 95% (IC95).
- Le p value (p).
- Les moyennes, écarts-types ainsi que la taille d'effet.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1 Sélection des études

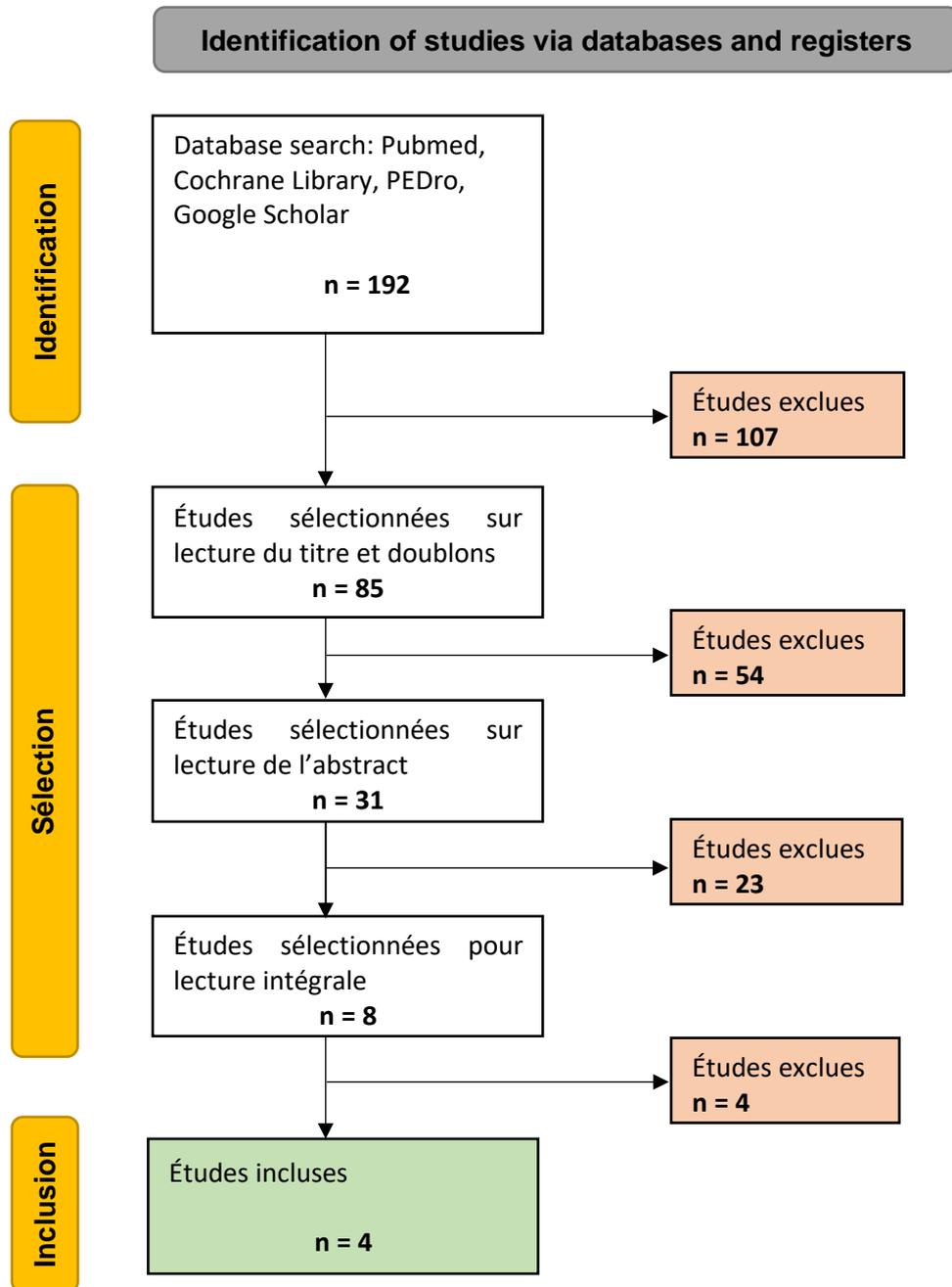


Figure 14 : Diagramme de flux

### 3.2 Études exclues

Études	Exclusions
<i>Francisco Javier Núñez and al. (2018)</i> [70]	Le critère de jugement de la force n'est pas évalué dans cette étude.
<i>Ethan C. Hill and al. (2020)</i> [71]	Le groupe expérimental excentrique est toujours associé à une technique de BFR (Blood flow restriction).
<i>Hashish R Magdi and al. (2021)</i> [72]	Évaluation de l'éducation croisée d'un membre inférieur vers un membre supérieur.
<i>Sergio Maroto-Izquierdo and al. (2022)</i> [73]	Le critère de jugement de la force n'est pas évalué par dynamomètre isocinétique.

Tableau IV : Études exclues

### 3.3 Études incluses

Suite à la sélection réalisée à partir du diagramme de flux présenté plus haut et selon nos critères d'inclusion et d'exclusion, voici les 4 études retenues dans notre revue de littérature :

Études incluses
<p align="center"><b>« Cross-Education Strength and Activation After Eccentric Exercise »</b></p> <p align="center"><i>Lepley et al. (2014)</i> [74]</p>
<p align="center"><b>« Cross-education effect after unilateral eccentric-only isokinetic vs dynamic constant external resistance training »</b></p> <p align="center"><i>Coratella et al. (2015)</i> [75]</p>
<p align="center"><b>« Effects of Cross-Education After 6 Weeks of Eccentric Single-Leg Decline Squats Performed With Different Execution Times »</b></p> <p align="center"><i>Martinez and al. (2021)</i> [76]</p>
<p align="center"><b>« The Eccentric Phase in Unilateral Resistance Training Enhances and Preserves the Contralateral Knee Extensors Strength Gains After Detraining in Women »</b></p> <p align="center"><i>Coratella and al. (2022)</i> [77]</p>

Tableau V : Études incluses

Titres, auteur, date, schéma d'étude	Objectifs de l'étude	Population	Intervention	Comparator	Outcomes	Résultats
<p>« <b>Cross-Education Strength and Activation After Eccentric Exercise</b> »</p> <p>A Randomized Controlled trial</p> <p>à 2 bras parallèles</p> <p><b>Lepley et al. (Sept. Oct. 2014)</b></p>	<p>Déterminer les effets du travail excentrique du quadriceps sur les gains de force et d'activation du membre non entraîné.</p> <p>Score PEDro de notre revue : 5/10</p>	<p>18 participants, 7 femmes et 11 hommes en bonne santé, ont été randomisés pour former 2 groupes de 9 personnes :</p> <p>- exercice excentrique (EX)</p> <p>- contrôle (CNTRL)</p> <p>Age :</p> <p>EX 23,3 ± 2,4</p> <p>CNTRL 22,6 ± 3,6</p> <p>Participants sans antécédents de chirurgie du genou, de blessure aux membres inférieurs dans les 6 derniers mois, de douleurs au genou, avec une maladie cardiaque. Les femmes enceintes ont également été écartées.</p>	<p>3 séances par semaine pendant 8 semaines (T=24)</p> <p><b>Groupe EX (n=9 : 4F et 5H) :</b></p> <p>4 séries de 10 répétitions maximales excentrique isocinétique à 60°/s</p> <p>Amplitude jusqu'à 90° flexion de genou</p> <p>Échauffement standardisé</p> <p>Récupération de 2 minutes entre les séries</p>	<p><u>Groupe CNTRL (n=9 : 6F et 3H) :</u></p> <p>Sans programme de renforcement</p>	<p><b>Couple maximale moyen concentrique et excentrique à 30 et 60°/s</b></p> <p><u>Évaluation :</u></p> <p>PREINTERVENTION</p> <p>MIDINTERVENTION</p> <p>POSTINTERVENTION</p>	<p>Résultat intra groupe de l'étude :</p> <p>concentrique 60°/s</p> <p>excentrique 60°/s</p> <p>Groupe EX :</p> <p>1,15 N.m/kg [0,15 ; 2,15]</p> <p>1,01 N.m/kg [0,03 ; 1,99]</p>

Tableau VI : Lepley and al. 2014

<p>« <b>Cross-education effect after unilateral eccentric-only isokinetic vs dynamic constant external resistance training</b> »</p>	<p>Évaluer les effets du travail excentrique unilatéral en utilisant une vitesse constante ou une charge externe constante sur le membre non entraîné</p>	<p>49 participants, hommes étudiants et en bonne santé, ont été randomisés pour former 3 groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- isokinetic (IK)</li> <li>- dynamic constant external resistance (DCER)</li> <li>- control (CON)</li> </ul>	<p>2 séances par semaine pendant 6 semaines (T=12)</p>	<p><u>Groupe CON (n=16) :</u></p>	<p><b>Couple maximal concentrique, excentrique 60°/s et isométrique 60°.</b></p>	<p>Résultat intra groupe de l'étude : concentrique 60°/s excentrique 60°/s isométrique 60°</p>	
<p>A Randomized Controlled trial (3 bras parallèles)</p>	<p>Score PEDro de notre revue : 6/10</p>	<p>Age : 20,5 ± 2,3</p>	<p><u>Groupe IK (n=16) :</u> 5 séries de 8 répétitions (extensions genou excentriques isocinétiques unilatérales maximales) isocinétique 60°/s (Cybex)</p>	<p>Sans programme de renforcement</p>	<p>1RM à l'aide d'un dispositif à charge constante.</p>	<p>Groupe IK +8,4 N.m [0 ; 16,4] +28,5 N.m [11 ; 46] +15,4 N.m [0,7 ; 30]</p>	
<p><b>Coratella et al. (Sept. 2015)</b></p>	<p>Score PEDro de notre revue : 6/10</p>	<p>Athlètes récréatifs, avec aucun entraînement en résistance durant les 6 mois précédents. Ils devaient s'abstenir de toute autre forme d'activité physique intense. Les personnes présentant un trouble du genou que ce soit ligamentaire, méniscal ou blessures musculaires ont été exclus.</p>	<p><u>Groupe DCER (n=16) :</u> 5 séries de 8 répétitions (extensions genou excentriques unilatérales sur Leg Extension, Technogym)</p>	<p>Adaptations de l'architecture musculaire et de la masse musculaire.</p>	<p>Adaptations de l'architecture musculaire et de la masse musculaire.</p>	<p>Groupe DCER +9,8 N.m [0,6 ; 19,2] +21,1 N.m [15,1 ; 37] +13,9 N.m [0,3 ; 27,5]</p>	
				<p>Charge fixée à 120 % du DCER concentrique 1RM / IK. Durée de contraction 1,5 s = temps moyen à IK.</p>	<p><u>Évaluation :</u></p>		
				<p>Réajustement de la charge à la 4<sup>ème</sup> semaine</p>	<p>Week 1 : PRE-TRAINING MEASUREMENT</p>		
				<p>Amplitude de travail sur 85°</p>	<p>Week 8 : POST-TRAINING MEASUREMENT</p>		
				<p>Échauffement standardisé : 3x10 répétitions BW squat</p>			

Tableau VII : Coratella and al. 2015

<p><b>« Effects of Cross-Education After 6 Weeks of Eccentric Single-Leg Decline Squats Performed With Different Execution Times »</b></p>	<p>La durée de contraction musculaire améliorerait les propriétés structurelles et fonctionnelles du membre controlatéral non entraîné lors d'un renforcement excentrique unilatéral répété durant 6 semaines.</p>	<p>36 participants, hommes, ont été randomisés pour former 3 groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- experimental 1 (EG6s)</li> <li>- experimental 2 (EGS3s)</li> <li>- contrôle (CG)</li> </ul>	<p>SLDSe* programme 3 séances par semaine pendant 6 semaines (T=18)</p> <p><b><u>Groupe expérimental 1 EG6s (n=11) :</u></b></p> <p>3 séries de 8 répétitions (80% 1RM) Travail excentrique de 6 secondes</p>	<p><u>Groupe contrôle CG (n=13) :</u></p> <p>Sans programme de renfo</p>	<p><b>Couple maximal concentrique, excentrique à 60 et 180°/s et isométrique 90°.</b></p> <p>Test excentrique 5 RM (converti en 1 RM)</p> <p>Caractéristiques anthropométrique</p>	<p>Résultat intra groupe de l'étude :</p> <p>concentrique 60°/s excentrique 60°/s isométrique 90°</p> <p>Groupe EG6s</p> <p>54,54 N.m [28,1 ; 80,9] 69,15 N.m [29,3 ; 107] 48,64 N.m [24,4 ; 72,9]</p>
<p>A Randomized Controlled trial</p>	<p>Niveau de preuve : 2 Pubmed</p>	<p>Age : 21 ± 3</p>	<p><b><u>Groupe expérimental 2 EG3s (n=12) :</u></b></p> <p>3 séries 8 répétitions (80% 1RM) Travail excentrique de 3 secondes</p>	<p>Propriétés morphologiques et élastiques du TP</p> <p>Propriétés contractiles de la VL</p>	<p>Propriétés morphologiques et élastiques du TP</p> <p>Propriétés contractiles de la VL</p>	<p>Groupe EG3s</p> <p>37,11 N.m [11,8 ; 62,4] 43,34 N.m [6,1 ; 80,6] 34,81 N.m [11,6 ; 58]</p>
<p><b>Martinez and al. (June 2021)</b></p>	<p>Score PEDro de notre revue : 7/10</p>	<p>Sujets sans antécédents de blessure antérieure à la hanche, genou ou cheville. Sujets modérément actifs (3 à 6 heures d'activité sportive par semaine). Aucun des sujets n'avait participé à une formation systématique au cours des 6 mois précédents.</p>	<p>Pour les deux groupes, expérimental 1 et 2, la récupération lors des exercices était respectivement de : 6 secondes entre les répétitions et 2 minutes entre les séries</p> <p>SLDSe*</p> <p>Single Leg Decline Squat eccentric</p>	<p><u>Évaluation :</u></p> <p>PRE = Semaine0 POST 1 = Semaine7 POST 2 = Semaine14</p>	<p><u>Évaluation :</u></p> <p>PRE = Semaine0 POST 1 = Semaine7 POST 2 = Semaine14</p>	<p></p>

Tableau VIII : Martinez and al. 2021

<p><b>« The Eccentric Phase in Unilateral Resistance Training Enhances and Preserves the Contralateral Knee Extensors Strength Gains After Detraining in Women »</b></p>	<p>Déterminer si lors d'un travail unilatéral des muscles extenseurs du genou, l'entraînement excentrique favorise une plus grande augmentation de force controlatérale par rapport aux autres protocoles et si cette augmentation persiste après l'arrêt de l'entraînement.</p>	<p>60 participants, femmes modérément actives, ont été randomisées en 4 groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- concentric-only (CONC)</li> <li>- eccentric-only (ECC)</li> <li>- concentric-eccentric (TRAD)</li> <li>- control (CON)</li> </ul> <p>Age : 22 ± 4</p>	<p>1 séance la première semaine puis 2 séances par semaine pendant 7 semaines (T=15)</p> <p><b><u>Group eccentric-only (ECC n = 15):</u></b></p> <p>5 séries de 6 répétitions (120% 1RM) Leg extension Technogym</p> <p>Durée de contraction 1,5 s</p> <p>Amplitude du mouvement 85° pour tous les groupes</p> <p>Récupération de 3 minutes entre les séries et 3 jours entre les séances pour tous les groupes ECC, CONC et TRAD</p> <p>Pour uniformiser la charge d'entraînement inter groupes des adaptations entres séries et répétitions ont été réalisées.</p>	<p>1 séance la première semaine puis 2 séances par semaine pendant 7 semaines (T=15)</p> <p><b><u>Group concentric-only (CONC n = 15):</u></b></p> <p>6 séries de 7 répétitions (85% 1RM)</p> <p>Durée de contraction 1,5 s</p> <p><b><u>Group concentric-eccentric (TRAD n = 15) :</u></b></p> <p>4 séries de 5 répétitions (90% 1RM)</p> <p>Durée de contraction 3 s</p> <p><b><u>Group control (CON n = 15) :</u></b></p> <p>Sans programme de renforcement</p>	<p><b>Couple maximale moyen concentrique et excentrique à 60°/s et isométrique à 60°.</b></p> <p>Épaisseur du vaste latéral.</p> <p>durée des effets</p> <p><b><u>Évaluation :</u></b></p> <p>pre-training post-training post detraining</p>	<p>Résultat intra groupe de l'étude : concentrique 60°/s excentrique 60°/s isométrique 60°</p> <p>Groupe ECC</p> <p>+11% [7,7; 14,2] +15% [11,4 ; 20,7] +11,3% [5,8 ; 16,8]</p>
<p>A Randomized Controlled trial à 4 bras parallèles</p>						
<p><b>Coratella and al. (March 2022)</b></p>	<p>Score PEDro de notre revue : 7/10</p>					

Tableau IX : Coratella and al. 2022

### 3.4 Risques de biais des études incluses

#### 3.4.1 Grille d'analyse étudiée

Comme cité plus tôt, il est important de réaliser une analyse critique des articles scientifiques choisis avant de pouvoir tirer des conclusions sur leurs résultats.

L'évaluation de la validité interne des essais cliniques randomisés peut être réalisée à l'aide de la grille de lecture critique appelée **échelle PEDro**, constituée de 11 critères méthodologiques (*annexe 1*).

Cet outil offre une méthode structurée pour évaluer la qualité méthodologique des études et contribue ainsi à une interprétation plus éclairée de leurs résultats.

Études	Items PEDro											Total
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
<i>Lepley (2014)</i>	✓	✓	X	✓	X	X	X	X	✓	✓	✓	5/10
<i>Coratella (2015)</i>	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X	✓	✓	6/10
<i>Martinez (2021)</i>	✓	✓	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	7/10
<i>Coratella (2022)</i>	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	✓	✓	✓	7/10

Tableau X : Échelle PEDro des articles inclus

### 3.4.2 Synthèse de biais

Études	Principaux biais
<i>Lepley et al. (2014)</i> [74]	<p><u>Sélection (III)</u> : L'étude n'a pas respecté l'assignation secrète.</p> <p><u>Évaluation (V,VI,VII)</u> : La mise en aveugle ne s'est faite auprès d'aucun des acteurs de l'étude sujets, intervenants, examinateurs.</p> <p><u>Suivi (VIII)</u> : Pas de précision sur d'éventuels perdus de vue ou du nombre des effectifs de chaque groupe lors des résultats finaux.</p>
<i>Coratella et al. (2015)</i> [75]	<p><u>Évaluation (V,VI)</u> : La mise en aveugle ne s'est pas faite auprès des sujets et intervenants.</p> <p><u>Suivi (VIII)</u> : Pas de précision sur d'éventuels perdus de vue ou du nombre des effectifs de chaque groupe lors des résultats finaux.</p> <p><u>Attrition (IX)</u> : l'article ne mentionne pas explicitement que tous les sujets ont suivi l'intervention.</p>
<i>Martinez and al. (2021)</i> [76]	<p><u>Sélection (III)</u> : L'étude n'a pas respecté l'assignation secrète.</p> <p><u>Évaluation (V,VI)</u> : La mise en aveugle ne s'est pas faite auprès des sujets et intervenants.</p>
<i>Coratella and al. (2022)</i> [77]	<p><u>Évaluation (V,VI)</u> : La mise en aveugle ne s'est pas faite auprès des sujets et intervenants.</p> <p><u>Suivi (VIII)</u> : Pas de précision sur d'éventuels perdus de vue ou du nombre des effectifs de chaque groupe lors des résultats finaux.</p>

Tableau XI : Synthèse des biais des articles inclus n°1

Études	Sélection	Performance	Détection	Suivi	Attrition	Mesure
<i>Lepley et al. (2014)</i>	X	X	X	X		
<i>Coratella et al. (2015)</i>		X		X	X	
<i>Martinez and al. (2021)</i>	X	X				
<i>Coratella and al. (2022)</i>		X		X		

Tableau XII : Synthèse des biais des articles inclus n°2

### 3.5 Effets de l'intervention

#### 3.5.1 Critères de jugement

L'objectif de cette revue de littérature est d'évaluer les **gains de force des extenseurs de genou d'un membre inférieur non entraîné** suite à un entraînement musculaire excentrique controlatéral grâce au phénomène de Cross education et les comparer aux groupes contrôles.

L'ensemble des spectres de la force seront traités et comprendront le **couple de force maximal concentrique, excentrique et isométrique**.

Les critères de jugement seront évalués sur un dynamomètre isocinétique. Il représente le « gold standard » de l'évaluation des couples de force musculaire.

L'ensemble des 4 études incluses dans notre revue a utilisé cet outil réduisant ainsi la présence d'un biais de mesure :

- *Lepley and al. 2014* : isokinetic dynamometer, Humac® Norm™
- *Coratella and al. 2015* : isokinetic dynamometer, Cybex®
- *Martinez and al. 2021* : isokinetic dynamometer Biodex™ system 3
- *Coratella and al. 2022* : isokinetic dynamometer, Cybex®

L'isocinétisme permet de réaliser des mesures à différentes vitesses angulaires. Ce réglage peut permettre une évaluation musculaire en force, puissance ou explosivité.

Pour la suite de cette revue, il semble justifié de prendre en considération des modalités de test des couples de force maximal comparables entre les études sélectionnées :

- *Lepley and al. 2014* : Concentric 60 et 30°/s ; Eccentric 60 et 30°/s
- *Coratella and al. 2015* : Concentric 60°/s ; Eccentric 60°/s ; Isometric 60°
- *Martinez and al. 2021* : Concentric 60 et 180°/s ; Eccentric 60 et 180°/s ; Isometric 90°
- *Coratella and al. 2022* : Concentric 60°/s ; Eccentric 60°/s ; Isometric 60°

Pour notre revue nous ne retiendrons que **les couples de force maximale concentrique et excentrique évalué à 60°/s** ainsi que le **couple de force maximale isométrique évalué à 60° et 90°**.



Groupe	Critère de jugement	p value	Moyenne ± écart type en N.m/kg		IC 95 intra groupe
			Pre	Post	
EX (n=9)	C60°/s	/	1,51 ± 0,6	2,26 ± 0,8	<b>0,75 [0,04 ; 1,46]</b>
	E60°/s		2,26 ± 0,7	3,31 ± 1,3	<b>1,05 [0,01 ; 2,09]</b>
CNTRL (n=9)	C60°/s	/	1,87 ± 0,7	2,06 ± 0,7	<b>0,19 [-0,51 ; 0,89]</b>
	E60°/s		2,91 ± 0,6	2,84 ± 0,5	<b>-0,07 [-0,62 ; 0,48]</b>

Tableau XIV : Différence intra groupe extraite à partir des données de Lepley and al. 2014

À partir de cet IC95 et avec l'aide d'un second tableur Excel, les écarts types ont été trouvés pour nous permettre le calcul de la taille d'effet inter groupe avec le logiciel Review manager.

L'article présente une unité de mesure en N.m/kg, dans cette revue l'ensemble des résultats des autres articles obtenus on été mesuré en N.m. Il semble judicieux de convertir le résultat de l'étude de Lepley and al. 2014 afin de la comparer à l'ensemble des autres résultats.

L'étude précise le poids moyen de chaque groupe, à partir de cette information nous avons donc calculé les différences inter groupe des deux critères de jugement.

Critère de jugement	Groupe	p value	Moyenne IC95 intra groupe (N.m/kg)	Moyenne ± écart type obtenu	Moyenne ± écart type obtenu (N.m)	Différence N.m inter-groupe (IC à 95%)
C60°/s	EX	/	0,75 [0,04 ; 1,46]	0,75 ± 0,92	52,95 ± 64,95	<b>40,24 [-17,92 ; 98,4]</b>
	CNTRL		0,19 [-0,51 ; 0,89]	0,19 ± 0,91	12,71 ± 60,88	
E60°/s	EX	/	1,05 [0,01 ; 2,09]	1,05 ± 1,35	74,13 ± 95,31	<b>78,81 [9,04 ; 148,58]</b>
	CNTRL		-0,07 [-0,62 ; 0,48]	-0,07 ± 0,72	-4,68 ± 48,168	

Tableau XV : Différence inter groupe EX/CNTRL extraite à partir du Tableau IX

- Moyenne des couples de force maximale concentrique 60°/s: La différence inter groupe entre EX et CNTRL est de 40,24 N.m. L'augmentation de cette force est plus importante sur le groupe EX réalisant le protocole d'entraînement excentrique que le groupe CNTRL. L'IC95% inter groupe de [-17,92 ; 98,4] traverse la valeur 0 qui se traduit comme un résultat statistiquement non significatif.
- Moyenne des couples de force maximale excentrique 60°/s: La différence inter groupe entre EX et CNTRL est de 78,81 N.m. L'augmentation de cette force est plus importante sur le groupe EX réalisant le protocole d'entraînement excentrique que le groupe CNTRL. Cette fois, l'intervalle de confiance est de [9,04 ; 148,58] ne traverse pas 0, mais p value inconnu ce résultat est statistiquement non significatif.



une diminution pour Ept 60° entre le pre et post intervention. Les moyennes des couples de force sont similaires entre DCER/CON, alors qu'une différence qui nous semble non significative mais tout de même présente entre IK/CON avec un groupe expérimental légèrement moins fort sur l'ensemble des critères évalués en pre intervention pouvant réduire les effets sur les résultats.

Différence inter groupe IK / CON :

Critère de jugement	Groupe IK / CON	p value	Moyenne ± écart type (N.m)	Différence inter-groupe (IC à 95%)
Cpt	IK	> 0,05	229,9 ± 32,0	<b>-2,4 [-31,36 ; 26,56]</b>
	CON		232,3 ± 49,7	
Ept	IK	< 0,05	297,4 ± 43,9	<b>23,4 [-15,22 ; 62,02]</b>
	CON		274,0 ± 66,0	
lpt	IK	< 0,05	256,7 ± 47,1	<b>-1 [-36,59 ; 34,59]</b>
	CON		257,7 ± 55,3	

*Tableau XVII : Différence inter groupe IK/CON à partir des données de Coratella and al. 2015*

- **Couples de force maximale concentrique 60°/s (Cpt)** : La taille d'effet inter groupe entre IK et CON est de -2,4 N.m. L'IC95% est de [-31,36 ; 26,56]. L'ensemble de ces informations présente un résultat statistiquement non significatif.
- **Couples de force maximale excentrique 60°/s (Ept)** : Cette différence est de 23,4 N.m avec un intervalle de confiance compris entre [-15,22; 62,02]. Ce résultat est statistiquement non significatif
- **Couples de force maximale isométrique à 60° (lpt)** : La différence inter groupe est de -1 N.m avec un IC95% entre [-36,59 ; 34,59]. La plus petite valeur traverse 0 ce qui en fait un résultat statistiquement non significatif.

Différence inter groupe DCER / CON :

Critère de jugement	Groupe DCER / CON	p value	Moyenne ± écart type (N.m)	Différence inter-groupe (IC à 95%)
Cpt	DCER	> 0,05	241,9 ± 43,1	<b>9,6 [-22,63 ; 41,83]</b>
	CON		232,3 ± 49,7	
Ept	DCER	< 0,05	305,4 ± 62,9	<b>31,4 [-13,27 ; 76,07]</b>
	CON		274,0 ± 66,0	
lpt	DCER	< 0,05	277,7 ± 46,4	<b>20 [-15,37 ; 55,37]</b>
	CON		257,7 ± 55,3	

*Tableau XVIII : Différence inter groupe DCER/CON à partir des données de Coratella and al. 2015*

- **Cpt 60°/s** : La taille d'effet inter groupe DCER/CON est de 9,6 N.m avec un IC de [-22,63 ; 41,83]. La plus petite valeur passe par zéro, ce résultat est statistiquement non significatif.
- **Ept 60°/s** : Cette différence entre ces deux groupes est de 31,4 N.m. L'IC est compris entre [-13,27 ; 76,07]. Résultat qui est statistiquement non significatif.
- **lpt 60°** : La différence inter groupe pour lpt est de 20 N.m avec un IC 95% situé entre [-15,37 ; 55,37]. La plus petite valeur minimale passe par 0 ce qui en fait un résultat statistiquement non significatif.



Les différences inter groupe ont été calculés grâce au logiciel Review manager entre les groupes EG3s/CG et EG6s/CG à partir des résultats post intervention.

Différence inter groupe EG3s / CG :

Critère de jugement	Groupe EG3s / CG	p value	Moyenne ± écart type (N.m)	Différence inter-groupe (IC à 95%)
<b>Cpt 60°/s</b>	EG3s	> 0,05	211,38 ± 53,63	<b>6,66 [-33,18 ; 46,50]</b>
	CG		204,72 ± 47,48	
<b>Ept 60°/s</b>	EG3s	> 0,05	268,69 ± 62,03	<b>46,27 [-13,26 ; 105,80]</b>
	CG		222,42 ± 88,45	
<b>lpt 90°</b>	EG3s	> 0,05	291,71 ± 66,44	<b>37,26 [-12,07 ; 86,59]</b>
	CG		254,45 ± 58,80	

*Tableau XX : Différence inter groupe EG3s/CG à partir des données de Martinez and al. 2021*

- **Cpt 60°/s** : La taille d'effet inter groupe entre EG3s et CG est de 6,66 N.m. L'intervalle de confiance 95% inter groupe est situé entre [-33,18 ; 46,50] qui traverse donc la valeur 0. Cela signifie que le résultat est statistiquement non significatif.
- **Ept 60°/s** : La différence inter groupe est de 46,27 N.m. L'IC 95% qui est associé est de [-13,26 ; 105,80]. La valeur inférieure traverse 0, ce qui en fait un résultat statistiquement non significatif.
- **lpt 90°** : Cette différence inter groupe est de 37,26 N.m avec un IC à 95% compris entre de [-12,07 ; 86,59]. La valeur la plus basse passe par 0, donc le résultat obtenu est statistiquement non significatif.

Différence inter groupe EG6s / CG :

Critère de jugement	Groupe EG6s / CG	p value	Moyenne ± écart type (N.m)	Différence inter-groupe (IC à 95%)
<b>Cpt 60°/s</b>	EG6s	> 0,05	242,67 ± 51,68	<b>37,95 [-2,04 ; 77,94]</b>
	CG		204,72 ± 47,48	
<b>Ept 60°/s</b>	EG6s	< 0,05	312,53 ± 55,46	<b>90,11 [31,92 ; 148,30]</b>
	CG		222,42 ± 88,45	
<b>lpt 90°</b>	EG6s	< 0,05	322,19 ± 69,93	<b>67,74 [15,50 ; 119,98]</b>
	CG		254,45 ± 58,80	

*Tableau XXI : Différence inter groupe EG6s/CG à partir des données de Martinez and al. 2021*

- **Cpt 60°/s** : La différence inter groupe entre EG6s et le groupe contrôle est de 37,95 N.m. L'intervalle de confiance 95% inter groupe se situe entre [-2,04 ; 77,94]. La valeur minimale passe par 0 et signifie que le résultat est statistiquement non significatif.
- **Ept 60°/s** : La différence inter groupe est de 90,11 N.m avec un IC 95% compris entre les valeurs [31,92 ; 148,30] ce qui en fait un résultat statistiquement significatif.
- **lpt à 90°** : La différence inter groupe EG6s/CG est de 67,74 N.m avec un IC à 95% compris entre de [15,50 ; 119,98]. L'ensemble des valeurs sont supérieur au 0, le résultat obtenu est statistiquement significatif.

L'étude de Coratella and al. 2022 a comparé les effets de l'éducation croisée sur les extenseurs de genou et les gains de force du membre controlatéral non entraîné après un entraînement unilatéral avec des modalités de contraction différentes. L'étude présente analyse également si le gain de force est maintenu après une période de désentraînement. L'étude était formée de 4 groupes. Un groupe **contrôle (CON)**, un groupe qui a suivi un entraînement unilatéral en concentrique uniquement (CONC), un groupe en **excentrique uniquement (ECC)** et un dernier groupe concentrique et excentrique (TRAD).

Le groupe ECC, qui nous intéresse dans le cadre de cette revue, a suivi un entraînement excentrique du membre inférieur dominant pour une durée de 8 semaines à raison de 2 séances par semaine sauf la première semaine où une seule séance a été réalisée (T=15).

L'entraînement de ECC a été effectué sur un Leg extension avec une contraction excentrique maintenue de 1,5 secondes (feedback visuel) sur une amplitude du genou de 85° (5° à 90°) avec une charge 120% RM1 concentrique.

Séance : Échauffement → Non spécifié  
Corps → 5x6 répétitions excentriques maximales 120% RM1  
3 minutes de récupération passive entre les séries

La mesure du critère de jugement de la force a été effectuée à 3 reprises sur isokinetic dynamometer (Cybex, Lumex). La première mesure s'est faite avant le protocole d'entraînement, la deuxième après le protocole (post-training) et la dernière après la période de désentraînement (post-detraining).

Les auteurs expriment avoir relevé le couple maximal de force de chaque modalité de contraction, valeur donnée en N.m.

#### ▪ Résultats

- Le groupe expérimental ECC a présenté un taux de conformité au protocole de 92,3 %.

- La fiabilité test-retest était "excellente" concernant l'évaluation de la force. En effet, le coefficient de corrélation intra-classe du couple de force maximal était de 0,932 en concentrique (Cpt), 0,910 en excentrique (Ept) et 0,928 isométrique (lpt).

- L'auteur de l'étude, Coratella G. a été contacté pour nous transmettre les valeurs moyennes avec écart types pre et post-training (\*) des différents groupes car l'étude présentait ces valeurs sous forme de graphique rendant difficile l'interprétation des données.

Extenseurs genou membre non dominant et non entraîné	Critère de jugements	p value	Moyenne ± écart type en N.m (*)		Différence % intra- groupe (IC à 95%)
			Pre	Post	
ECC (n=15)	Cpt 60°/s	< 0,001	149,07 ± 24,393	<b>169,36 ± 26,567</b>	11% (7,7 to 14,2)
	Ept 60°/s		206,43 ± 36,687	<b>246,50 ± 38,258</b>	15% (11,4 to 20,7)
	lpt 60°		176,93 ± 38,346	<b>209,36 ± 36,708</b>	11,3% (5,8 to 16,8)
CON (n=15)	Cpt 60°/s	> 0,05	157,08 ± 32,399	<b>156,08 ± 30,560</b>	/
	Ept 60°/s		209,08 ± 44,931	<b>211,42 ± 46,159</b>	Non significative
	lpt 60°		194,50 ± 32,671	<b>193,75 ± 32,111</b>	/

Tableau XXII : Données de l'étude de Coratella and al. 2022

Dans cet article l'ensemble des critères de jugement sont intéressants pour la revue. On constate que le groupe ECC a obtenu des gains de force concentrique, excentrique et isométrique entre le pre et post intervention. À contrario, le groupe CON semble ne pas avoir eu d'amélioration durant cette période. Les deux groupes montrent des valeurs de force sensiblement différentes en pre intervention avec un groupe CON qui présente des couples de force concentrique et surtout isométrique supérieurs. Différences que nous avons jugé non significatives.

À l'aide du logiciel Review manager , les données post intervention des deux groupes ont aidé au calcul de la différence inter groupe.

Critère de jugement	Groupe ECC / CON	p value	Moyenne ± écart type (N.m)	Différence inter-groupe (IC à 95%)
<b>Cpt 60°/s</b>	ECC	< 0,05	169,36 ± 26,567	<b>13,28 [-7,21 ; 33,77]</b>
	CON		156,08 ± 30,560	
<b>Ept 60°/s</b>	ECC	< 0,05	246,50 ± 38,258	<b>35,08 [4,74 ; 65,42]</b>
	CON		211,42 ± 46,159	
<b>Ipt 60°</b>	ECC	< 0,05	209,36 ± 36,708	<b>15,61 [-9,07 ; 40,29]</b>
	CON		193,75 ± 32,111	

Tableau XXIII : Différence inter groupe ECC/CON à partir des données de Coratella and al. 2022

- **Cpt 60°/s** : La taille d'effet inter groupe entre ECC et CON est de 13,28 N.m. L'IC 95% est de [-7,21 ; 33,77] avec une valeur qui passe par 0, se traduisant comme résultat statistiquement non significatif.
- **Ept 60°/s** : La taille d'effet inter groupe est de 35,08 N.m avec un IC compris entre [4,74 ; 65,42]. Aucune des valeurs ne passe par 0, ce résultat peut être considéré comme statistiquement significatif.
- **Ipt 60°** : La différence inter groupe est de 15,61 N.m avec un intervalle de confiance situé entre [-9,07 ; 40,29]. La plus petite valeur traverse 0 ce qui en fait un résultat statistiquement non significatif.

## 4. DISCUSSION

### 4.1 Analyse des principaux résultats

L'objectif de cette revue est d'évaluer le gain de la force des extenseurs du genou sur un membre sain non entraîné à la suite d'un entraînement excentrique controlatéral grâce au phénomène d'éducation croisée. Pour ce faire, cette revue a sélectionné quatre articles qui étaient constitués d'au moins un groupe expérimental réalisant un protocole d'entraînement excentrique de force des extenseurs de genou ainsi que d'un groupe contrôle.

Nous supposons ainsi qu'un travail excentrique permettra un gain plus important de la force du membre non entraîné par rapport à un groupe contrôle ne réalisant pas ce protocole. Si cette force présente une amélioration, est-il possible de la quantifier et quelle qualité de force (concentrique/isométrique/excentrique) est la plus sensible au phénomène d'éducation croisée.

Les études incluses dans cette revue de littérature présentent des points communs et des différences que nous allons exposer ci-dessous.

#### 4.1.1 Analyses des participants

Cette revue de littérature à travers les quatre articles cités compte 132 participants. L'échantillon total expérimental est composé de 19 femmes et de 60 hommes. L'échantillon total contrôle compte 21 femmes et 32 hommes. On remarque que les populations sont de jeunes adultes en bonne santé avec des données anthropométriques relativement semblables. La randomisation a été effectuée sur l'ensemble des quatre articles.

Concernant les **effectifs** des différents articles, nous constatons que les six groupes qui ont suivi un protocole d'entraînement excentrique étaient composés de 9 à 16 participants. Ce qui peut paraître insuffisant pour interpréter les résultats. Néanmoins, un aspect ressort concernant le sexe des participants. On remarque que *Lepley and al.* est la seule étude à présenter un groupe mixte d'hommes et de femmes. *Coratella and al. 2015* ainsi que *Martinez and al.* ont réalisé leurs études sur des sujets uniquement masculins. Contrairement à ces derniers, *Coratella and al. 2022* a cette fois-ci étudié une population uniquement féminine.

Même si l'éducation croisée ne présente pas de limite concernant le sexe d'une population [61], une différence des effets de l'éducation croisée peut être présente entre les hommes et les femmes. Ceci pourrait représenter un biais potentiel sur le résultat de cette revue.

Trois des études présentent des **proportions de groupe** égales entre les groupes expérimentaux et contrôle. Seule l'étude de *Martinez and al.* ne respecte pas cette égalité inter groupe entre EG3s, EG6s et CG qui compte respectivement 12, 11 et 13 participants. Il précise que trois participants n'ont pas complété l'étude et leurs données n'ont pas été prises en compte.

Au sujet des couples de force maximale de force inter groupe évaluées en **pré intervention**, seulement l'étude de *Lepley and al.* présente des différences de plus de 20% entre son groupe expérimental et contrôle. Nous avons donc décidé de prendre en compte les valeurs pré et post intervention afin de déterminer la différence intergroupe concernant cette étude. Concernant les autres études, des différences sont présentes mais que nous avons jugé non significatives mais pouvant induire un biais. Le groupe IK de l'étude de *Coratella and al. 2015* présente des valeurs inférieures sur l'ensemble des critères de force par rapport au CON. Le groupe EG6s de l'étude de *Martinez and al.* présente des valeurs supérieures en excentrique et isométrique comparativement au CG. Le groupe ECC de l'étude de *Coratella and al. 2022* présente des valeurs inférieures en isométrique par rapport au CON.

Concernant la **conduite à tenir des participants**, trois des quatre études précisent avoir informé les sujets à ne participer à aucun autre programme d'entraînement durant l'intégralité de l'intervention. Seul *Lepley and al. 2014* ne donne pas d'indication à ce sujet.

Parmi les quatre études, seulement *Coratella and al. 2022* précise qu'aucune blessure n'est survenue durant toute la durée du protocole.

#### 4.1.2 Analyses des interventions

L'ensemble des articles sont en accord en précisant que les participants des groupes expérimentaux excentriques ont réalisé le protocole d'entraînement sur leur **membre dominant**. Concernant le **membre non dominant et non entraîné**, seulement deux des quatre études donnent des informations à ce sujet. *Coratella and al. 2022* a demandé à ses participants de relâcher le membre non entraîné durant l'exécution des exercices. *Lepley and al.* précise que le membre non entraîné était libre.

À propos de la **charge d'entraînement**. On s'aperçoit que la durée du protocole, nombre, intensité, fréquence hebdomadaire des séances peuvent varier. La **durée de protocole** est de 6 semaines pour l'étude de *Coratella and al. 2015* et de 8 semaines pour les autres études. La **fréquence d'entraînement** était de deux séances par semaine pour les groupes de *Coratella and al. 2015* et *2022* et de trois séances par semaine pour les groupes de *Lepley and al.* et *Martinez and al.* Le **volume total d'entraînements** effectués par les groupes expérimentaux excentriques représentés 12 séances pour *Coratella and al. 2015*, 15 séances pour *Coratella and al. 2022*, 18 séances pour *Martinez and al.* et 24 séances pour *Lepley and al.* Les **séries et répétitions** demandées auprès des groupes expérimentaux étaient les suivants. *Martinez and al.* a proposé 3 séries de 8 répétitions (T=24), *Coratella and al. 2022* a demandé 5 séries de 6 répétitions (T=30), *Coratella and al. 2015* préconisé 5 séries de 8 répétitions (T=40) et pour finir, *Lepley and al.* a suggéré 4 séries de 10 répétitions (T=40). La **récupération** entre les séances était de deux à trois jours, seule l'étude de *Lepley and al.* ne donne pas de précision à ce sujet. Le temps de récupération entre les séries est compris entre 2 et 3 minutes. Seule *Martinez and al.* a mis en place un repos de 6 secondes après chaque répétition.

L'ensemble de ces informations sur les modalités en termes de quantité, répétitivité et récupération dans le temps peuvent induire un biais sur le résultat.

L'**intensité de la charge** entre les études est située entre **80% et 120% RM1** qui correspond à des charges pour un développement de la force. Comme détaillé dans l'introduction, les quatre articles ici utilisent des différents niveaux de charges. *Martinez and al.* a proposé une résistance infra maximale pour ses participants alors que *Lepley and al.*, *Coratella and al. 2015* et *2022* ont choisi une résistance maximale et supra maximale. De plus, les études de *Coratella and al. 2015* et *Martinez and al. 2021* précisent avoir réalisé un **réajustement de la charge** au cours de l'intervention sur leurs groupes DCER (5%), EG3s et EG6s.

Ce travail à différents niveaux de charge peut présenter un biais, d'après l'étude de *Pelet and al.* [78] au plus l'intensité est grande au plus le phénomène d'éducation croisée serait important.

Nous constatons également que le **temps sous tension** (ou temps de contraction) varie entre **1,5 et 6 secondes**. Trois des quatre articles ont réalisé des temps sous tension de 1,5 secondes ou 60°/s qui équivaut à 1,5 secondes sur une amplitude de 90°. Seule l'étude de *Martinez and al.* a réalisé sur ces deux groupes EG3s et EG6s des temps sous tension de 3 et 6 secondes.

Cette information peut induire un biais sur la qualité du résultat de cette revue. Toutefois il est bon de rappeler que *Martinez and al.* réalise son protocole de renforcement sur un mouvement plus fonctionnel et complexe avec une charge infra maximale de 80% RM1.

Le **type d'exercice** réalisé lors du travail de renforcement peut varier. En effet, alors que *Lepley and al.*, *Coratella and al. 2015* et *2022* ont proposé d'évaluer les effets de l'éducation en sélectionnant un exercice très spécifique en position assise sur un mouvement de leg extension (phase excentrique), **analytique** à l'articulation du genou et au quadriceps. *Martinez and al.* a choisi un mouvement de renforcement plus **global** et fonctionnel, le single leg decline squat (Slds), qui implique plusieurs articulations dont notamment la cheville, la hanche ou le rachis et donc une chaîne musculaire différente.

Plusieurs hypothèses peuvent être prises en compte sur la différence entre ces deux exercices et leurs effets sur l'éducation croisée entraînant un biais supplémentaire à cette revue. La première, sur le principe du travail analytique face à un travail global. La seconde, d'un exercice réalisé en chaîne cinétique ouverte (CCO) par rapport chaîne cinétique fermée (CCF).

Au delà de l'exercice réalisé, des différences se présentent parmi ces quatre articles concernant le **matériel et la résistance utilisée** sur les groupes expérimentaux durant les protocoles d'entraînements. Le groupe EX dans l'étude de *Lepley and al.* ainsi qu'un des deux groupes de l'étude de *Coratella and al. 2015*, IK ont réalisé leurs exercices sur **isocinétisme**. Le second groupe DCER de *Coratella and al. 2015* et ECC de *Coratella and al. 2022* ont effectué leurs protocoles sur une machine de **leg extension** standard. Et l'étude de *Martinez and al.*, avec ses deux groupes EG6s et EG3s, se sont entraînés sur une **machine multipower**.

Ces informations concernant le type de résistance utilisé peuvent nous interroger sur la possibilité de différent effet sur l'éducation croisée à la suite d'entraînements réalisés uniquement sur isocinétisme par rapport à des résistances standard comme le traite l'article de *Coratella and al. 2015* présent dans notre revue.

Le **secteur angulaire** concernant l'amplitude réalisée par le genou lors des exercices excentriques a été globalement explicitée par les articles. Même si toutefois l'étude de *Martinez and al.* précise cette modalité lors des tests, elle ne reprecise pas le secteur de travail du genou lors de l'intervention. Les articles ont proposé des amplitudes de contraction excentrique similaire du genou autour de **85 – 90°**.

Trois des quatre articles précisent l'absence d'un potentiel **conflit d'intérêt** ou de source de financement. Seule l'étude de *Lepley and al.* ne donne aucune information à ce sujet.

#### 4.1.3 *Analyses des modalités de l'évaluation des critères de jugement*

Avant la mise en place du protocole d'entraînement, trois des quatre articles ont consacré auprès de leurs groupes une période ou séance en amont dite de « **familiarisation** ». C'est à dire qu'ils ont éduqué leurs participants aux spécificités de l'isocinétisme ainsi que du travail excentrique la semaine qui précédait le protocole sur une ou deux sessions. Ceci a pour but de réduire un gain de force relevé lors d'un test qui serait simplement dû à l'apprentissage de ce dernier et donc limiter un biais de mesure sur un test initial. Seule l'étude de *Lepley and al.* précise que cette familiarisation a été réalisée le jour même du test lors de l'échauffement.

Cette donnée semble importante car la familiarisation pourrait surestimer l'effet de l'éducation croisée d'environ 4% d'après l'étude de Carroll and al. [68]. On pourrait éventuellement s'interroger sur les gains induits autres que le phénomène d'éducation croisée pour les groupes ayant effectué le protocole d'entraînement sur le même outil que celui du test.

Le **dynamomètre isocinétique** est l'outil de mesure utilisé sur l'ensemble des études, il représente le gold standard dans l'évaluation des couples de force musculaire. Les **appareils** utilisés peuvent varier d'une étude à l'autre, par exemple *Coratella and al. 2015* et *2022* ont réalisé leurs tests sur une machine Cybex®, *Lepley and al.* sur Humac®Norm™ alors que *Martinez and al.* sur Biodex™.

Le **positionnement** des participants lors de l'évaluation des critères de jugement est détaillé par l'ensemble de quatre études. Chaque sujet est assis sur le dynamomètre isocinétique, le tronc en appui et fixé contre le dossier avec un angle de flexion de hanche compris entre 85° et 90°. Concernant les membres supérieurs, seul *Martinez and al.* stipule avoir donné l'instruction de s'agripper afin d'aider à la stabilisation du tronc. Puis, contrairement aux études de *Lepley and al.* et *Martinez and al.*, les études de *Coratella and al. 2015* et *2022* décrivent qu'un levier de stabilisation a été utilisé pour le membre inférieur non testé.

Les **vitesse étudiées** dans notre revue concernant les tests du **couple de force maximale dynamique** concentrique et excentrique à **60° secondes** sont évaluées sur l'ensemble des articles. À propos des tests du **couple de force maximal isométrique**, ils ont été évalués dans trois des quatre études. *Coratella and al. 2015* et *2022* ont réalisé cette mesure à un angle de **60°** de flexion du genou alors que *Martinez and al.* à **90°**. La différence entre les positions d'évaluation du genou peut générer un biais entre ces articles. Seule l'étude de *Lepley and al.* n'étudie pas ce critère de force isométrique.

Les **modalités de test** du couple maximal de force peuvent comprendre trois séries de 1 à 3 essais. La récupération pour les tests dynamiques (concentrique/excentrique) est de 1 à 2 minutes, et pour les tests statiques un repos de 30 secondes à 2 minutes. Seule l'étude de *Coratella and al. 2015* ne présente aucune information sur le nombre d'essais réalisés ainsi que la récupération utilisée.

Lors de l'évaluation des critères de jugement principal, nous constatons que deux des quatre études énoncent avoir utilisé une **stimulation verbale** afin d'encourager les participants durant la réalisation de l'effort maximal. Alors que *Coratella and al. 2015* précise que des encouragements standardisés ont été appliqués sans plus de détails, *Coratella and al. 2022* déclare avoir utilisé de forts encouragements standardisés lors de chaque répétition.

Une stimulation verbale effectuée lors de la réalisation d'un effort maximal peut potentiellement avoir un impact sur le pic du couple de force maximale développé lors d'un test isocinétique [79].

La **répétitivité des mesures** a été réalisée à deux reprises en pré et post intervention sur les études de *Coratella and al. 2015, 2022* ainsi que *Martinez and al.* À contrario, *Lepley and al.* comptabilise trois mesures des couples de force sur les 8 semaines de protocole en pré, mid et post intervention. À cela, l'auteur précise que des mesures de force ont été réalisées auprès du groupe expérimental EX à chaque fin de semaines. Soit un nombre de 8 sessions de tests maximal réalisées sur le membre non entraîné pouvant induire un biais de résultat important.

#### 4.1.4 Analyses des résultats des critères de jugement

Nous rappelons que l'intérêt de cette revue de littérature était d'évaluer le gain de force obtenu grâce à l'éducation croisée concernant les extenseurs du genou suite à un entraînement excentrique répété. La force est le critère principal de cette revue et peut s'exprimer à travers différents modes de contraction. L'analyse réalisée, à partir des 4 articles sélectionnés, aura donc pour but d'exposer le gain ou non des couples de force maximaux concentrique, excentrique et isométrique évalué sur dynamomètre isocinétique.

Un Forest plot a été réalisé pour chaque critère de jugement du couple de force maximal à partir du logiciel Review Manager (RevMan) permettant une représentation synthétique des résultats.

Concernant les articles de *Coratella and al. 2015* et *Martinez and al. 2021*, les groupes contrôle ont été comparés à deux reprises.

#### 4.1.4.1 Effet du travail excentrique sur le couple de force maximal concentrique

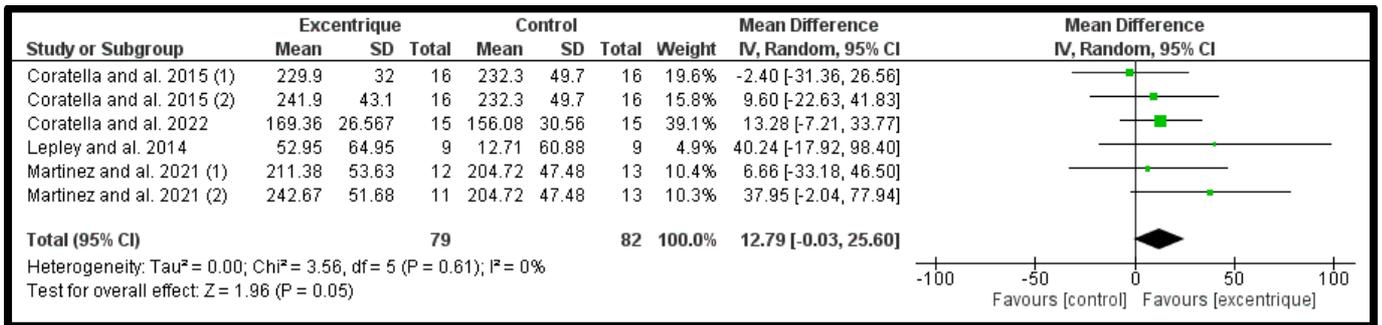


Figure 15 : Forest plot du couple de force maximal concentrique

- \*Coratella and al. 2015 (1) = IK
- \*Coratella and al. 2015 (2) = DCER
- \*Coratella and al. 2022 = ECC
- \*Lepley and al. 2014 = EX
- \*Martinez and al. 2021 (1) = EG3s
- \*Martinez and al. 2021 (2) = EG6s

La lecture de ce premier forest plot nous permet de voir que l'ensemble des études sélectionnées sont statistiquement non significatives.

On remarque que le poids de certaines études a plus d'impact sur le résultat obtenu. En effet, plus de 80% est représenté par les trois groupes expérimentaux des deux études de *Coratella and al. 2015* et *2022* avec ses groupes IK (19,6%), DCER (15,8%) et ECC (39,1%). Notons quand même que ces résultats sont calculés à partir du nombre de participants par groupe ainsi que de la précision des écarts types. Comme cité plus tôt, le groupe IK semblé sensiblement plus faible que le groupe contrôle en pré intervention, différence que nous avons jugée non significative. Au vu du poids que représente le groupe IK dans les résultats présentés par ce Forest plot, nous pouvons supposer que cette différence peut induire une légère sous estimation du résultat.

La p value calculée par le logiciel nous indique **p = 0,05**. L'hétérogénéité des études est nulle, I<sup>2</sup> = 0%.

L'ensemble des quatre études présente un résultat non significatif. La taille d'effet obtenu est de **12,79 [-0,03 ; 25,60]**, qui traduit une augmentation de 12,79 N.m avec un intervalle de confiance compris entre -0,03 et 25,60 N.m. Il nous semble correct de pouvoir avancer que ce résultat est également non significatif cliniquement.

**En résumé, l'effet d'un entraînement excentrique unilatéral en force réalisé de manière répétée n'augmente pas statistiquement et cliniquement les gains du couple maximal de force concentrique controlatéral.**

#### 4.1.4.2 Effet du travail excentrique sur le couple de force maximal excentrique

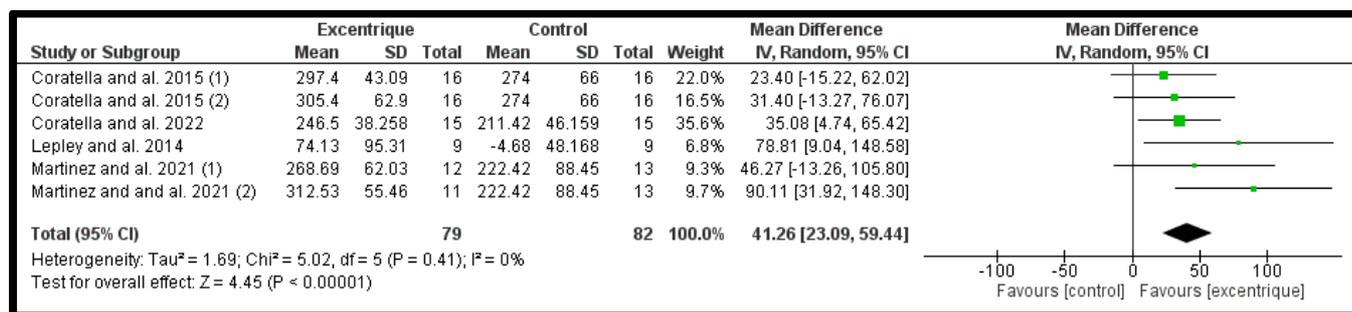


Figure 16 : Forest plot du couple de force maximal excentrique

Ce second forest plot nous permet de visualiser que les deux groupes de l'étude de *Coratella and al. 2015* (IK et DCER) et un groupe de *Martinez and al.* (EG3s) sont statistiquement non significatifs. À contrario, les groupes de l'étude de *Lepley and al.* (EX), *Coratella and al. 2022* (ECC) et le second groupe de *Martinez and al.* (EG6s) présentent des résultats statistiquement significatifs.

Le poids des études est représenté à plus de 70% par les mêmes études de *Coratella and al. 2015 et 2022* avec les groupes IK (22%), DCER (16,5%) et ECC (35,6%).

Le poids du groupe IK dans ce second Forest plot peut potentiellement induire une légère sous estimation du résultat. Comme cité plus tôt, le groupe EG6s de *Martinez and al.* présenté des valeurs Ept supérieurs qui nous ont semblé non significatives par rapport au groupe contrôle. Le poids sur la représentation du groupe EG6s dans ce Forest plot est de 9,7%. On pourrait croire qu'il ne puisse surestimé que faiblement le résultat final de ce graphique.

La p value calculée par le logiciel nous indique **p < 0,00001**. On remarque que l'hétérogénéité est nulle (I<sup>2</sup> = 0%).

La taille d'effet général est de **41,26 [23,09 ; 59,44]**, qui implique une amélioration de 41,26 N.m avec un intervalle de confiance situé entre 23,09 et 59,44 N.m. Ce résultat semble cliniquement significatif.

**En résumé, l'effet d'un entraînement excentrique unilatéral en force réalisé de manière répétée augmente statistiquement et cliniquement les gains du couple maximal de force excentrique controlatéral.**

#### 4.1.4.3 Effet du travail excentrique sur le couple de force maximal isométrique

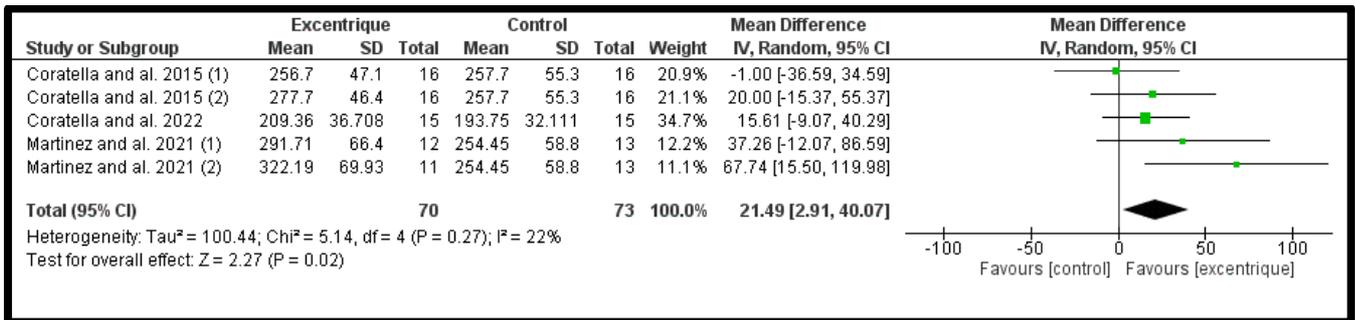


Figure 17 : Forest plot du couple de force maximal isométrique

Ce troisième et dernier Forest plot comprend trois études car *Lepley and al.* n'évalue pas le couple de force maximal isométrique.

On constate que les résultats des groupes des études de *Coratella and al. 2015* et *2022* ainsi qu'un groupe de *Martinez and al.* sont statistiquement non significatifs. Seules les données du groupe EG6s de *Martinez and al.* semblent statistiquement significatives. Rappelons que sur ce critère, l'étude de *Martinez and al.* a évalué le couple de force maximal isométrique à 90° alors que les études de *Coratella and al. 2015* et *2022* l'ont évalué à 60°.

Les études de *Coratella and al. 2015* et *2022* constituent plus de 75% du poids de la revue avec les groupes IK (20,9%), DCER (21,1%) et ECC (34,7%).

Les mêmes biais peuvent apparaître en isométrique sur les groupe IK et EG6s qui peuvent sous ou surestimer le résultat de ce Forest plot au vu des informations citées plus tôt. Concernant le groupe ECC, qui présenté des valeurs inférieures en pré intervention par rapport au groupe contrôle et qui est le plus représenté dans ce Forest plot, peut potentiellement induire une sous estimation du résultat.

La p value calculée par le logiciel pour l'Ipt nous indique **p = 0,02** avec une hétérogénéité des études faible, I<sup>2</sup> = 22%.

La taille d'effet global est de **21,49 [2,91 ; 40,07]**, ce qui signifie une augmentation de force de 21,49 N.m avec un intervalle de confiance compris entre 2,91 et 40,07 N.m. Ce résultat semble cliniquement significatif.

**En résumé, l'effet d'un entraînement excentrique unilatéral en force réalisé de manière répétée augmente statistiquement et cliniquement les gains du couple maximal de force isométrique controlatéral.**

Ces trois Forest plot nous présentent des informations que nous allons essayer de mettre en corrélation avec les différences entre les **interventions** développées plus tôt. Pour commencer, le couple de force maximale excentrique présente des valeurs supérieures au couple de force maximale isométrique qui sont eux supérieures au couple de force maximal concentrique. Cette différence peut être d'autant plus marquée en excentrique, car les protocoles étaient exclusivement des entraînements sous ce régime de contraction qui est très spécifique. Prendre en compte le phénomène de **familiarisation**, détaillé plus tôt, semble être un critère non négligeable.

Si nous essayons de prendre en considération les critères qui nous semblent cohérents, et qui pourraient impacter cette différence de résultat, commençons par parler du **volume d'entraînement**. Deux études, à savoir *Lepley and al.* et *Martinez and al.*, ont un protocole de 3 séances par semaine. Les études de *Coratella and al.* 2015 et 2022 se limitent à deux séances. Sur ce principe de volume d'entraînement et en regard des Forest plot, il est probable que l'éducation croisée répond davantage à un volume plus important de **3 séances**. Cependant n'oublions pas un biais important cité plus tôt concernant l'étude de *Lepley and al.* qui a réalisé des sessions tests du membre non entraîné à chaque fin de semaine (=8) pouvant induire des gains de force sur ce membre.

Les **appareils** sur lesquels ont été réalisés les différents protocoles comprenaient des résistances **isocinétiques** utilisés pour les études de *Lepley and al.* et *Coratella and al.* 2015 sur les groupes EX et IK. Des **résistances standards** ont été mises en place sur les études de *Coratella and al.* 2015 et 2022 sur les groupes DCER, ECC. Les groupes EG3s et EG6s de l'étude de *Martinez and al.* est la seule étude à avoir utilisé une machine plus fonctionnelle. Il est difficile dans cette revue d'établir quel type de résistance engendre le plus de bénéfice.

Concernant l'**intensité** des protocoles, seule l'étude de *Martinez and al.* a mis en place des résistances **infra maximales égales** à 80% RM1 sur un **mouvement fonctionnel**. Toutes les autres études réalisent leur protocole avec des charges **supra maximales** sur un **mouvement analytique**. Pourtant au regard des Forest plot, *Martinez and al.* et *Lepley and al.* obtiennent les valeurs les plus élevées. Le biais concernant l'étude de *Lepley and al.* peut toujours être en cause. Sur trois des quatre groupes utilisant des charges standards des études de *Coratella and al.* 2015 et *Martinez and al.*, DCER, EG3s et EG6s, ont appliqué un réajustement de la charge en cours de protocole pour permettre le maintien de l'intensité. Le **temps sous tension** pourrait être un élément important. Seulement les groupes EG3s et EG6s de l'étude de *Martinez and al.* sont doublés (3 sec) voire quadruplés (6 sec) par rapport aux autres protocoles qui ont choisi des temps sous tensions basés sur la vitesse isocinétique de 60°/s soit un temps sous tension de 1,5 secondes.

En regard des différentes modalités, il est difficile de déterminer avec certitude quel entraînement est le plus efficace pour favoriser le plus grand transfert de force. Néanmoins, il semble que **l'intensité de la charge choisie devra être corrélée à la difficulté de l'exercice à effectuer**, deux critères essentiels dans le phénomène d'éducation croisée [52][54].

Suite à un protocole d'entraînement excentrique unilatéral des extenseurs du genou, des gains de force sont observés sur les muscles homologues controlatéraux non entraînés. Les augmentations statistiquement et cliniquement significatives concerne d'abord le couple de force maximale excentrique puis le couple de force maximale isométrique. Le couple de force maximale concentrique présente une amélioration qui est non significative. Dans notre revue, de nombreux facteurs peuvent influencer la qualité des résultats obtenus. Malgré la tendance générale qui émerge dans la méthode d'entraînement, chaque étude présente des modalités dans ses interventions ainsi que des biais multiples. Bien que les données calculées concernant nos critères de jugement tels que la taille de l'effet, l'hétérogénéité des groupes ou encore la p value puissent sembler intéressantes, il est difficile de pouvoir affirmer quel type d'entraînement confère les meilleurs résultats sur le transfert de force vers le membre controlatéral non entraîné.

## 4.2 Applicabilité des résultats en pratique clinique

La finalité de cette revue est **l'évaluation des gains de force obtenus par éducation croisée à la suite d'un programme d'entraînement excentrique controlatéral des extenseurs du genou**. Elle vise donc avec ses limites à orienter les praticiens sur les modalités d'entraînement qui semblent être favorables pour rechercher ce phénomène d'éducation croisée.

### Population :

Même si la population étudiée dans cette revue est composée de sujets jeunes, il semblerait que l'éducation croisée ne présente pas de limite concernant l'âge d'une population comme le conclut la méta analyse de Green and al. [61]. Notre revue se limite également à des sujets en bonne santé.

### Intervention :

- **Coût du traitement :** Certains groupes expérimentaux ont effectué leurs protocoles d'entraînement sur isocinétisme. Ce matériel représente un coût important et n'est donc pas toujours accessible chez les praticiens. Toutefois, nous observons à travers cette revue qu'un entraînement réalisé avec des résistances standards, leg extension plus courant, permettrait également d'obtenir des effets sur le gain de force comparable. Une piste supplémentaire apparaît, mais seulement évaluée par un des quatre auteurs et concerne l'application d'un exercice plus fonctionnel, le single leg decline squat, également sensible à de l'éducation croisée.
- **Volume :** Le nombre de séances réalisées semble être un facteur important pour optimiser l'effet de l'éducation croisée. Alors que deux séances par semaine sur une durée de six semaines présenterait des gains de force controlatérale, l'ajout d'une troisième séance semblerait augmenter davantage les effets tout en préservant une récupération adaptée de deux jours (DOMS).
- **Intensité :** L'entraînement en force excentrique avec des charges comprises entre 80% et 120% RM1 semblent être intéressants pour rechercher ce phénomène d'éducation croisée. Les interventions réalisées en supra maximal ou 120% de RM1 étaient analytiques à l'articulation du genou sur un exercice de leg extension (phase négative). L'unique protocole réalisé en infra maximal à 80% de RM1 a été effectué sur un mouvement fonctionnel de single leg decline squat.

**À partir des résultats obtenus des différents articles, réaliser 2 à 3 séances par semaine sur une durée de 6 semaines avec des charges de 80 à 120% de RM1 sur des mouvements analytiques ou globaux semble efficace pour obtenir un changement plus ou moins significatif des différentes modalités de la force.**

### 4.3 Qualité des preuves

La pertinence d'une revue de littérature est corrélée à la qualité des études qu'elles incluent. En 2013, l'HAS a défini un guide de recommandations établi sur le **niveau de preuve et la gradation des recommandations** ainsi que le **système GRADE**.

- Niveau de preuve

Il détermine la faculté de l'étude à répondre à une question de recherche basée sur plusieurs critères qui sont :

- La compatibilité du protocole à la question de recherche.
- L'existence de biais majeur.
- L'ajustement de l'analyse statistique en fonction des objectifs.
- La puissance de l'étude et particulièrement la taille d'échantillon.

La HAS présente trois niveaux de preuve (*annexe 2*).

Notre revue de littérature est composée uniquement d'**essai clinique randomisé** dit ECR. C'est le schéma d'étude le plus approprié pour répondre à une question thérapeutique

- GRADE et recommandations

Le système GRADE rassemble les différentes recommandations de l'HAS (*annexe 3*) classées sous forme de grade :

- **GRADE A : « preuve scientifique établie par des études de fort niveau de preuve (Niveau 1) »**
- **GRADE B : « présomption scientifique basée sur des études de niveau intermédiaire de preuve (Niveau 2) »**
- **GRADE C : « études de moindre niveau de preuve (Niveau 3 et 4) »**

	Type d'étude	PEDro scale	GRADE	Niveau de preuve
<i>Lepley and al. 2014</i>	Essai clinique randomisé	5/10	B	Intermédiaire
<i>Coratella and al. 2015</i>	Essai clinique randomisé	6/10	B	Intermédiaire
<i>Martinez and al. 2021</i>	Essai clinique randomisé	7/10	B	Intermédiaire
<i>Coratella and al. 2022</i>	Essai clinique randomisé	7/10	B	Intermédiaire

Tableau XXIV : Qualité des preuves des études incluses

#### 4.4 Biais potentiel de la revue

- Limites de la revue

Pour commencer, il est nécessaire de rappeler que le cross education est un phénomène complexe qui nécessite encore des recherches afin d'en améliorer sa compréhension sur ses avantages ainsi que ses limites afin d'en optimiser les effets.

Les quatre articles inclus dans cette revue représentent un nombre trop faible d'études pour établir une base de données importante. Même si la qualité de ces études semble modérée, cela n'est pas suffisant pour pouvoir interpréter les résultats et leurs significativités.

La population représente une limite importante car l'ensemble des participants des groupes expérimentaux et contrôles étaient jeunes et en bonne santé donc difficilement transposable sur des patients avec des atteintes. Les quatre études incluses présentent également une taille d'échantillon faible, ce qui affecte son niveau de preuve.

Chaque étude présente des modalités différentes concernant leurs interventions. Il est donc difficile de pouvoir affirmer quel entraînement confère le plus de résultats d'un gain de force controlatéral même si toutefois des pistes semblent apparaître.

- Biais potentiel de la revue

La grille AMSTAR-2 [80] (*annexe 4*) a été utilisée pour observer les biais potentiels de notre revue. Élaboré en 2007, cette grille a fait l'objet d'une mise à jour. Elle permet l'évaluation de la qualité méthodologique des revues systématiques sur 16 items :

	Items	Cotation	Justification
1	"Did the research questions and inclusion criteria for the review include the components of PICO?"	Oui	2.2.2 Équation de recherche
2	"Did the report of the review contain an explicit statement that the review methods were established prior to the conduct of the review and did the report justify any significant deviations from the protocol?"	Non	/
3	"Did the review authors explain their selection of the study designs for inclusion in the review?"	Oui	2.1 Critères d'éligibilité des études de la revue
4	"Did the review authors use a comprehensive literature search strategy?"	Oui partiellement	2.2.2 Équation de recherche
5	"Did the review authors perform study selection in duplicate?"	Non	seulement un examinateur
6	"Did the review authors perform data extraction in duplicate?"	Non	seulement un examinateur

7	“Did the review authors provide a list of excluded studies and justify the exclusions?”	Oui	3.2 Études exclues
8	“Did the review authors describe the included studies in adequate detail?”	Oui	3.3 Études incluses
9	“Did the review authors use a satisfactory technique for assessing the risk of bias (RoB) in individual studies that were included in the review?”	Oui	3.4 Risques de biais des études incluses (PEDro scale)
10	“Did the review authors report on the sources of funding for the studies included in the review?”	Non	/
11	“If meta-analysis was performed did the review authors use appropriate methods for statistical combination of results?”	Oui partiellement	4.1.6 Analyses des résultats des critères de jugement
12	“If meta-analysis was performed, did the review authors assess the potential impact of RoB in individual studies on the results of the meta-analysis or other evidence synthesis?”	Oui partiellement	4.1.6 Analyses des résultats des critères de jugement
13	“Did the review authors account for RoB in individual studies when interpreting/ discussing the results of the review?”	Oui partiellement	4. DISCUSSION
14	“Did the review authors provide a satisfactory explanation for, and discussion of, any heterogeneity observed in the results of the review?”	Oui partiellement	4. DISCUSSION
15	“If they performed quantitative synthesis did the review authors carry out an adequate investigation of publication bias (small study bias) and discuss its likely impact on the results of the review?”	Non	/
16	“Did the review authors report any potential sources of conflict of interest, including any funding they received for conducting the review?”	Oui	<b>Cette revue a été réalisée sans aucune source de financement ou conflit d'intérêt</b>

Tableau XXV : Grille AMSTAR-2 de notre revue

## 5. CONCLUSION

L'objectif final de notre revue de littérature était d'évaluer les gains de force obtenus par **éducation croisée des extenseurs du genou** vers le membre non entraîné à la suite d'un **protocole excentrique unilatéral**, chez une population de jeunes adultes en bonne santé. Le travail excentrique a été démontré comme le régime de contraction induisant le plus grand transfert de force par éducation croisée selon la méta analyse de Manca et al. [66] en 2017. Cependant, il est important de rappeler que les effets de l'éducation croisée restent sensibles aux autres régimes de contraction, réalisés de manière isolée ou combinée.

Le travail excentrique présente de nombreux avantages mais également certains inconvénients. Le fait de pouvoir travailler musculairement avec une charge maximale, supra-maximale de manière répétée entraîne des réactions physiologiques (DOMS) nécessitant une récupération adaptée. Le travail exclusif excentrique réalisé à charge lourde peut être difficile à mettre en place dans la pratique. En effet, comme cités dans les articles de cette revue, les exercices effectués avec des charges standards (hors isocinétisme) ont nécessité la présence d'une tierce personne afin de repositionner la charge.

Le choix de mettre en place un protocole excentrique devra prendre en compte différents facteurs comme l'âge, l'état de santé, la pathologie, le niveau sportif ainsi que les objectifs de chaque patient. L'individualisation est un principe important afin de permettre une évolution et éviter toute surcharge.

Notre revue de littérature comporte 4 articles avec un niveau de preuve intermédiaire. Les résultats obtenus présentent des limites mais indiquent que la mise en place d'un protocole d'entraînement excentrique des extenseurs du genou pourrait présenter des résultats intéressants sur les gains de force controlatérale. En effet, des augmentations de certains couples de force maximale ont été observés par rapport aux groupes contrôle. Les améliorations trouvées ont été plus importantes et statistiquement significative sur le couple de force maximal excentrique (+41,26 N.m [23,09; 59,44] ;  $p < 0.00001$ ) puis le couple de force maximale isométrique (+21,49 [2,91 ; 40,07] ;  $p = 0,02$ ). Le couple de force maximale concentrique quant à lui semble moins sensible à la suite du protocole excentrique et présente des limites statistiques (+12,79 N.m [-0,03 ; 25,60] ;  $p = 0,05$ ).

Cette revue permet, à travers les différentes interventions réalisées des quatre articles, de proposer des pistes de **recherches futures**. L'étude de *Martinez and al.* est intéressante dans cette revue. Au delà du fait que les participants ont réalisé un protocole avec des **charges infra maximales**, l'exercice demandé était fonctionnel et avec des temps de contraction plus importants que les autres. De cette seule étude, émanent plusieurs hypothèses qui pourraient ouvrir des pistes à de prochaines recherches. Comme la sensibilité de l'éducation croisée à la suite d'un protocole réalisé avec des exercices **analytique ou global**. Des effets entre un travail réalisé en **chaîne cinétique ouverte ou chaîne cinétique fermée**, ou encore de cibler quel est le **temps sous tension** musculaire optimal dans l'effet de l'éducation croisée.

Alors que cette revue se limite à des vitesses de 60°/s concernant les couples de force maximale dynamiques, il serait intéressant d'évaluer comme le font *Lepley and al.* et *Martinez and al.* les gains à des **vitesses angulaires** plus ou moins élevées. Étudié dans deux des articles de notre revue, *Martinez and al. 2021* et *Coratella and al. 2022* ont réalisé une autre évaluation du couple de force musculaire après une période de **désentraînement** qui suivait leur intervention. Cette donnée pourrait être essentielle lors d'une prise en charge afin d'estimer la durée des effets dans le temps de l'éducation croisée.

La mise en lumière d'un protocole pouvant stimuler la force du quadriceps d'un membre atteint paraît être un enjeu important. Des techniques de rééducation alternatives capables d'améliorer, maintenir ou limiter une perte de la force du quadriceps sont nécessaires et à mettre en place dès que possible.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] HOOTMAN JM, MACERA CA, AINSWORTH BE, ADDY CL, MARTIN M, BLAIR SN. Epidemiology of musculoskeletal injuries among sedentary and physically active adults. *Med Sci Sport Exerc* 2002;34:838–44. <https://doi.org/10.1097/00005768-200205000-00017>.
- [2] Campbell M, Varley-Campbell J, Fulford J, Taylor B, Mileva KN, Bowtell JL. Effect of Immobilisation on Neuromuscular Function In Vivo in Humans: A Systematic Review. *Sports Med* 2019;49:931. <https://doi.org/10.1007/S40279-019-01088-8>.
- [3] Yin L, Li N, Jia W, Wang N, Liang M, Yang X, et al. Skeletal muscle atrophy: From mechanisms to treatments. *Pharmacol Res* 2021;172:105807. <https://doi.org/10.1016/J.PHRS.2021.105807>.
- [4] Ahmadiyahangar A, Javadian Y, Babaei M, Heidari B, Hosseini S, Aminzadeh M. The role of quadriceps muscle strength in the development of falls in the elderly people, a cross-sectional study. *Chiropr Man Ther* 2018;26:1–6. <https://doi.org/10.1186/S12998-018-0195-X/TABLES/2>.
- [5] Murakami R, Fukai A, Yoshitomi H, Honda E, Sanada T, Iwaso H. Quadriceps strength is an early indicator of return to competitive sports 1 year after anterior cruciate ligament reconstruction in adult amateur athletes. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2023;33:361–6. <https://doi.org/10.1007/S00590-021-03195-7>.
- [6] Suchomel TJ, Nimphius S, Stone MH. The Importance of Muscular Strength in Athletic Performance. *Sports Med* 2016;46:1419–49. <https://doi.org/10.1007/S40279-016-0486-0>.
- [7] García-Hermoso A, Cavero-Redondo I, Ramírez-Vélez R, Ruiz JR, Ortega FB, Lee DC, et al. Muscular Strength as a Predictor of All-Cause Mortality in an Apparently Healthy Population: A Systematic Review and Meta-Analysis of Data From Approximately 2 Million Men and Women. *Arch Phys Med Rehabil* 2018;99:2100-2113.e5. <https://doi.org/10.1016/J.APMR.2018.01.008>.
- [8] Ludwig PE, Reddy V, Varacallo M. Neuroanatomy, Central Nervous System (CNS). *StatPearls* 2022.
- [9] Smerdu V, Karsch-Mizrachi I, Campione M, Leinwand L, Schiaffino S. Type IIx myosin heavy chain transcripts are expressed in type IIb fibers of human skeletal muscle. *Am J Physiol* 1994;267. <https://doi.org/10.1152/AJPCELL.1994.267.6.C1723>.
- [10] Scott W, Stevens J, Binder-Macleod SA. Human Skeletal Muscle Fiber Type Classifications. *Phys Ther* 2001;81:1810–6. <https://doi.org/10.1093/PTJ/81.11.1810>.
- [11] Karp JR. Muscle Fiber Types and Training. *Strength Cond J* 2001;23:21–6. <https://doi.org/10.1519/00126548-200110000-00004>.
- [12] Kraemer WJ, Patton JF, Gordon SE, Harman EA, Deschenes MR, Reynolds K, et al. Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. <https://doi.org/10.1152/JAPPL.1995.78.3.976> 1995;78:976–89.
- [13] ESBJÖRNSSON M, HELLSTEN-WESTING Y, BALSOM PD, SJÖDIN B, JANSSON E. Muscle fibre type changes with sprint training: effect of training pattern. *Acta Physiol Scand* 1993;149:245–6. <https://doi.org/10.1111/J.1748-1716.1993.TB09618.X>.
- [14] The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc R Soc London Ser B - Biol Sci* 1938;126:136–95. <https://doi.org/10.1098/RSPB.1938.0050>.
- [15] Schott GD. Penfield's homunculus: a note on cerebral cartography. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1993;56:329–33. <https://doi.org/10.1136/JNRP.56.4.329>.
- [16] AbuHasan Q, Munakomi S. Neuroanatomy, Pyramidal Tract. *StatPearls* 2023.
- [17] Rassier DE. Sarcomere mechanics in striated muscles: from molecules to sarcomeres to cells. *Am J Physiol Cell Physiol* 2017;313:C134–45. <https://doi.org/10.1152/AJPCELL.00050.2017>.
- [18] Lowey S, Waller GS, Trybuss KM. THE JOURNAL OF BIOLOGICAL CHEMISTRY Function of Skeletal Muscle Myosin Heavy and Light Chain Isoforms by an in Vitro Motility Assay". *J Biol Chem* 1993;268:20414–8. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(20\)80744-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(20)80744-3).

- [19] Gash MC, Kandle PF, Murray I V., Varacallo M. Physiology, Muscle Contraction. StatPearls 2023.
- [20] Granchi C, Bertini S, Macchia M, Minutolo F. Inhibitors of lactate dehydrogenase isoforms and their therapeutic potentials. *Curr Med Chem* 2010;17:672–97. <https://doi.org/10.2174/092986710790416263>.
- [21] Chaudhry R, Varacallo M. Biochemistry, Glycolysis. StatPearls 2023.
- [22] Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, et al. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med* 2009;43:556–68. <https://doi.org/10.1136/BJSM.2008.051417>.
- [23] Lindstedt SL, LaStayo PC, Reich TE. When active muscles lengthen: Properties and consequences of eccentric contractions. *News Physiol Sci* 2001;16:256–61. <https://doi.org/10.1152/PHYSIOLOGYONLINE.2001.16.6.256>.
- [24] Herzog W. Why are muscles strong, and why do they require little energy in eccentric action? *J Sport Heal Sci* 2018;7:255–64. <https://doi.org/10.1016/J.JSHS.2018.05.005>.
- [25] Hollander DB, Kraemer RR, Kilpatrick MW, Ramadan ZG, Reeves G V., Francois M, et al. Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *J Strength Cond Res* 2007;21:37–40. <https://doi.org/10.1519/R-18725.1>.
- [26] Lieber RL, Ward SR. Skeletal muscle design to meet functional demands. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 2011;366:1466. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2010.0316>.
- [27] Tinwala F, Cronin J, Haemmerle E, Ross A. Eccentric strength training: A review of the available technology. *Strength Cond J* 2017;39:32–47. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000262>.
- [28] Franchi M V., Reeves ND, Narici M V. Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations. *Front Physiol* 2017;8. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00447>.
- [29] Linari M, Bottinelli R, Pellegrino MA, Reconditi M, Reggiani C, Lombardi V. The mechanism of the force response to stretch in human skinned muscle fibres with different myosin isoforms. *J Physiol* 2004;554:335. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.2003.051748>.
- [30] Hessel AL, Lindstedt SL, Nishikawa KC. Physiological Mechanisms of Eccentric Contraction and Its Applications: A Role for the Giant Titin Protein. *Front Physiol* 2017;8. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00070>.
- [31] Nishikawa K, Lindstedt SL, Hoppeler HH. Eccentric contraction: unraveling mechanisms of force enhancement and energy conservation. *J Exp Biol* 2016;219:189–96. <https://doi.org/10.1242/JEB.124057>.
- [32] Duchateau J, Baudry S. Insights into the neural control of eccentric contractions. *J Appl Physiol* 2014;116:1418–25. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00002.2013/ASSET/IMAGES/LARGE/ZDG008130544004.JPEG>.
- [33] Duchateau J, Enoka RM. Neural control of lengthening contractions. *J Exp Biol* 2016;219:197–204. <https://doi.org/10.1242/JEB.123158>.
- [34] Aagaard P. Training-Induced Changes in Neural Function : Exercise and Sport Sciences Reviews. *Exerc Sport Sci Rev* 2003;61–7. [https://journals.lww.com/acsm-essr/fulltext/2003/04000/training\\_induced\\_changes\\_in\\_neural\\_function.2.aspx](https://journals.lww.com/acsm-essr/fulltext/2003/04000/training_induced_changes_in_neural_function.2.aspx) (accessed November 5, 2023).
- [35] Kidgell DJ, Frazer AK, Rantalainen T, Ruotsalainen I, Ahtiainen J, Avela J, et al. Increased cross-education of muscle strength and reduced corticospinal inhibition following eccentric strength training. *Neuroscience* 2015;300:566–75. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROSCIENCE.2015.05.057>.
- [36] Franchi M V., Mitchell KW, Hoppeler H, Narici M V. Editorial: Physiology and clinical potential of eccentric exercise. *Front Physiol* 2017;8:314449. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00891/BIBTEX>.
- [37] Reynolds JM, Gordon TJ, Robergs RA. Prediction of one repetition maximum strength from multiple repetition maximum testing and anthropometry. *J Strength Cond Res* 2006;20:584–

92. <https://doi.org/10.1519/R-15304.1>.
- [38] Stotz A, Maghames E, Mason J, Groll A, Zech A. Maximum isometric torque at individually-adjusted joint angles exceeds eccentric and concentric torque in lower extremity joint actions. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2022;14:1–8. <https://doi.org/10.1186/S13102-022-00401-9/TABLES/2>.
- [39] Mike J, Kerksick CM, Kravitz L. How to incorporate eccentric training into a resistance training program. *Strength Cond J* 2015;37:5–17. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000114>.
- [40] Beato M, Dello Iacono A. Implementing Flywheel (Isoinertial) Exercise in Strength Training: Current Evidence, Practical Recommendations, and Future Directions. *Front Physiol* 2020;11. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2020.00569>.
- [41] Merrigan JJ, Jones MT, Padecky J, Malecek J, Omcirik D, Scott BR, et al. Impact of Rest-Redistribution on Fatigue During Maximal Eccentric Knee Extensions. *J Hum Kinet* 2020;74:205. <https://doi.org/10.2478/HUKIN-2020-0028>.
- [42] Chan R, Newton M, Nosaka K. Effects of set-repetition configuration in eccentric exercise on muscle damage and the repeated bout effect. *Eur J Appl Physiol* 2012;112:2653–61. <https://doi.org/10.1007/S00421-011-2247-Y/METRICS>.
- [43] Hody S, Croisier JL, Bury T, Rogister B, Leprince P. Eccentric Muscle Contractions: Risks and Benefits. *Front Physiol* 2019;10. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2019.00536>.
- [44] Marshall J, Bishop C, Turner A, Haff GG. Optimal Training Sequences to Develop Lower Body Force, Velocity, Power, and Jump Height: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sport Med* 2021;51:1245–71. <https://doi.org/10.1007/S40279-021-01430-Z>.
- [45] Harris-Love MO, Seamon BA, Gonzales TI, Hernandez HJ, Pennington D, Hoover BM. Eccentric Exercise Program Design: A Periodization Model for Rehabilitation Applications. *Front Physiol* 2017;8. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00112>.
- [46] Herzog W. The role of titin in eccentric muscle contraction. *J Exp Biol* 2014;217:2825–33. <https://doi.org/10.1242/JEB.099127>.
- [47] Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Eccentric Exercise: Physiological Characteristics and Acute Responses. *Sport Med* 2017;47:663–75. <https://doi.org/10.1007/S40279-016-0624-8>.
- [48] Frazer AK, Pearce AJ, Howatson G, Thomas K, Goodall S, Kidgell DJ. Determining the potential sites of neural adaptation to cross-education: implications for the cross-education of muscle strength. *Eur J Appl Physiol* 2018;118:1751–72. <https://doi.org/10.1007/s00421-018-3937-5>.
- [49] Barsz TS, Pearcey GEP, Zehr EP. Focus: The Aging Brain: Cross-education of strength and skill: an old idea with applications in the aging nervous system. *Yale J Biol Med* 2016;89:81.
- [50] Ruddy KL, Carson RG. Neural pathways mediating cross education of motor function. *Front Hum Neurosci* 2013;7. <https://doi.org/10.3389/FNHUM.2013.00397>.
- [51] Lee M, Hinder MR, Gandevia SC, Carroll TJ. The ipsilateral motor cortex contributes to cross-limb transfer of performance gains after ballistic motor practice. *J Physiol* 2010;588:201–12. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.2009.183855>.
- [52] Perez MA, Cohen LG. Mechanisms underlying functional changes in the primary motor cortex ipsilateral to an active hand. *J Neurosci* 2008;28:5631–40. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0093-08.2008>.
- [53] Anguera JA, Russell CA, Noll DC, Seidler RD. Neural correlates associated with intermanual transfer of sensorimotor adaptation. *Brain Res* 2007;1185:136–51. <https://doi.org/10.1016/J.BRAINRES.2007.09.088>.
- [54] Farthing JP. Cross-education of strength depends on limb dominance: implications for theory and application. *Exerc Sport Sci Rev* 2009;37:179–87. <https://doi.org/10.1097/JES.0B013E3181B7E882>.
- [55] Hortobágyi T, Dempsey L, Fraser D, Zheng D, Hamilton G, Lambert J, et al. Changes in muscle strength, muscle fibre size and myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J Physiol* 2000;524:293. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7793.2000.00293.X>.
- [56] Farthing JP, Krentz JR, Magnus CRA. Strength training the free limb attenuates strength loss during unilateral immobilization. *J Appl Physiol* 2009;106:730–6.

- <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.91331.2008>.
- [57] Magnus CRA, Barss TS, Lanovaz JL, Farthing JP. Effects of cross-education on the muscle after a period of unilateral limb immobilization using a shoulder sling and swathe. *J Appl Physiol* 2010;109:1887–94. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00597.2010>.
- [58] Pearce AJ, Hendy A, Bowen WA, Kidgell DJ. Corticospinal adaptations and strength maintenance in the immobilized arm following 3 weeks unilateral strength training. *Scand J Med Sci Sports* 2013;23:740–8. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0838.2012.01453.X>.
- [59] Farthing JP, Zehr EP. Restoring symmetry: clinical applications of cross-education. *Exerc Sport Sci Rev* 2014;42:70–5. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000009>.
- [60] Hendy AM, Spittle M, Kidgell DJ. Cross education and immobilisation: mechanisms and implications for injury rehabilitation. *J Sci Med Sport* 2012;15:94–101. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMS.2011.07.007>.
- [61] Green LA, Gabriel DA. The effect of unilateral training on contralateral limb strength in young, older, and patient populations: a meta-analysis of cross education. *Phys Ther Rev* 2018;23:238–49. <https://doi.org/10.1080/10833196.2018.1499272>.
- [62] Harput G, Ulusoy B, Yildiz TI, Demirci S, Eraslan L, Turhan E, et al. Cross-education improves quadriceps strength recovery after ACL reconstruction: a randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2019;27:68–75. <https://doi.org/10.1007/S00167-018-5040-1>.
- [63] Dragert K, Zehr EP. High-intensity unilateral dorsiflexor resistance training results in bilateral neuromuscular plasticity after stroke. *Exp Brain Res* 2013;225:93–104. <https://doi.org/10.1007/S00221-012-3351-X>.
- [64] Urbin MA, Harris-Love ML, Carter AR, Lang CE. High-Intensity, Unilateral Resistance Training of a Non-Paretic Muscle Group Increases Active Range of Motion in a Severely Paretic Upper Extremity Muscle Group after Stroke. *Front Neurol* 2015;6. <https://doi.org/10.3389/FNEUR.2015.00119>.
- [65] Manca A, Cabboi MP, Ortu E, Ginatempo F, Dragone D, Zarbo IR, et al. Effect of Contralateral Strength Training on Muscle Weakness in People With Multiple Sclerosis: Proof-of-Concept Case Series. *Phys Ther* 2016;96:828–38. <https://doi.org/10.2522/PTJ.20150299>.
- [66] Manca A, Dragone D, Dvir Z, Deriu F. Cross-education of muscular strength following unilateral resistance training: a meta-analysis. *Eur J Appl Physiol* 2017;117:2335–54. <https://doi.org/10.1007/S00421-017-3720-Z>.
- [67] Manca A, Hortobágyi T, Rothwell J, Deriu F. Neurophysiological adaptations in the untrained side in conjunction with cross-education of muscle strength: a systematic review and meta-analysis. *J Appl Physiol* 2018;124:1502–18. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.01016.2017>.
- [68] Carroll TJ, Herbert RD, Munn J, Lee M, Gandevia SC. Contralateral effects of unilateral strength training: evidence and possible mechanisms. *J Appl Physiol* 2006;101:1514–22. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00531.2006>.
- [69] Tseng WC, Nosaka K, Tseng KW, Chou TY, Chen TC. Contralateral Effects by Unilateral Eccentric versus Concentric Resistance Training. *Med Sci Sports Exerc* 2020;52:474–83. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002155>.
- [70] Núñez FJ, Santalla A, Carrasquila I, Asian JA, Reina JI, Suarez-Arrones LJ. The effects of unilateral and bilateral eccentric overload training on hypertrophy, muscle power and COD performance, and its determinants, in team sport players. *PLoS One* 2018;13. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0193841>.
- [71] Hill EC. Eccentric, but not concentric blood flow restriction resistance training increases muscle strength in the untrained limb. *Phys Ther Sport* 2020;43:1–7. <https://doi.org/10.1016/J.PTSP.2020.01.013>.
- [72] Magdi HR, Maroto-Izquierdo S, de Paz JA. Ipsilateral Lower-to-Upper Limb Cross-Transfer Effect on Muscle Strength, Mechanical Power, and Lean Tissue Mass after Accentuated Eccentric Loading. *Medicina (B Aires)* 2021;57. <https://doi.org/10.3390/MEDICINA57050445>.
- [73] Maroto-Izquierdo S, Nosaka K, Blazevich AJ, González-Gallego J, de Paz JA. Cross-education

- effects of unilateral accentuated eccentric isoinertial resistance training on lean mass and function. *Scand J Med Sci Sport* 2022;32:672–84. <https://doi.org/10.1111/SMS.14108>.
- [74] Lepley LK, Palmieri-Smith RM. Cross-Education Strength and Activation After Eccentric Exercise. *J Athl Train* 2014;49:582. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.24>.
- [75] Coratella G, Milanese C, Schena F. Cross-education effect after unilateral eccentric-only isokinetic vs dynamic constant external resistance training. *Sport Sci Health* 2015;11:329–35. <https://doi.org/10.1007/s11332-015-0244-y>.
- [76] Martínez F, Abián P, Jiménez F, Abián-Vicén J. Effects of Cross-Education After 6 Weeks of Eccentric Single-Leg Decline Squats Performed With Different Execution Times: A Randomized Controlled Trial. *Sports Health* 2021;13:594. <https://doi.org/10.1177/19417381211016353>.
- [77] Coratella G, Galas A, Campa F, Pedrinolla A, Schena F, Venturelli M. The Eccentric Phase in Unilateral Resistance Training Enhances and Preserves the Contralateral Knee Extensors Strength Gains After Detraining in Women: A Randomized Controlled Trial. *Front Physiol* 2022;13:788473. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2022.788473/BIBTEX>.
- [78] Pelet DCS, Orsatti FL. Effects of resistance training at different intensities of load on cross-education of muscle strength. <https://doi.org/10.1139/APNM-2021-0088> 2021;46:1279–89. <https://doi.org/10.1139/APNM-2021-0088>.
- [79] Rendos NK, Harriell K, Qazi S, Regis RC, Alipio TC, Signorile JF. Variations in verbal encouragement modify isokinetic performance. *J Strength Cond Res* 2019;33:708–16. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002998>.
- [80] Shea BJ, Reeves BC, Wells G, Thuku M, Hamel C, Moran J, et al. AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ* 2017;358:4008. <https://doi.org/10.1136/BMJ.J4008>.

## 7. ANNEXE

Annexe 1 : PEDro scale.....	57
Annexe 2 : Grille du niveau de preuve HAS .....	59
Annexe 3 : Grille grade des recommandations.....	59
Annexe 4 : AMSTAR-2.....	60

**Échelle PEDro – Français**

1. les critères d'éligibilité ont été précisés	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
2. les sujets ont été répartis aléatoirement dans les groupes (pour un essai croisé, l'ordre des traitements reçus par les sujets a été attribué aléatoirement)	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
3. la répartition a respecté une assignation secrète	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
4. les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
5. tous les sujets étaient "en aveugle"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
6. tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
7. tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
8. les mesures, pour au moins un des critères de jugement essentiels, ont été obtenues pour plus de 85% des sujets initialement répartis dans les groupes	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
9. tous les sujets pour lesquels les résultats étaient disponibles ont reçu le traitement ou ont suivi l'intervention contrôle conformément à leur répartition ou, quand cela n'a pas été le cas, les données d'au moins un des critères de jugement essentiels ont été analysées "en intention de traiter"	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
10. les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:
11. pour au moins un des critères de jugement essentiels, l'étude indique à la fois l'estimation des effets et l'estimation de leur variabilité	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	où:

L'échelle PEDro est basée sur la liste Delphi développée par Verhagen et ses collègues au département d'épidémiologie de l'Université de Maastricht (Verhagen AP et al (1998). *The Delphi list: a criteria list for quality assessment of randomised clinical trials for conducting systematic reviews developed by Delphi consensus. Journal of Clinical Epidemiology, 51(12):1235-41*). Cette liste est basée sur un "consensus d'experts" et non, pour la majeure partie, sur des données empiriques. Deux items supplémentaires à la liste Delphi (critères 8 et 10 de l'échelle PEDro) ont été inclus dans l'échelle PEDro. Si plus de données empiriques apparaissent, il deviendra éventuellement possible de pondérer certains critères de manière à ce que le score de PEDro reflète l'importance de chacun des items.

L'objectif de l'échelle PEDro est d'aider l'utilisateur de la base de données PEDro à rapidement identifier quels sont les essais cliniques réellement ou potentiellement randomisés indexés dans PEDro (c'est-à-dire les essais contrôlés randomisés et les essais cliniques contrôlés, sans précision) qui sont susceptibles d'avoir une bonne validité interne (critères 2 à 9), et peuvent avoir suffisamment d'informations statistiques pour rendre leurs résultats interprétables (critères 10 à 11). Un critère supplémentaire (critère 1) qui est relatif à la validité "externe" (c'est "la généralisabilité" de l'essai ou son "applicabilité") a été retenu dans l'échelle PEDro pour prendre en compte toute la liste Delphi, mais ce critère n'est pas comptabilisé pour calculer le score PEDro cité sur le site Internet de PEDro.

L'échelle PEDro ne doit pas être utilisée pour mesurer la "validité" des conclusions d'une étude. En particulier, nous mettons en garde les utilisateurs de l'échelle PEDro sur le fait que les études qui montrent des effets significatifs du traitement et qui ont un score élevé sur l'échelle PEDro, ne signifie pas nécessairement que le traitement est cliniquement utile. Il faut considérer aussi si la taille de l'effet du traitement est suffisamment grande pour que cela vaille la peine cliniquement d'appliquer le traitement. De même, il faut évaluer si le rapport entre les effets positifs du traitement et ses effets négatifs est favorable. Enfin, la dimension coût/efficacité du traitement est à prendre compte pour effectuer un choix. L'échelle ne devrait pas être utilisée pour comparer la "qualité" des essais réalisés dans différents domaines de la physiothérapie, essentiellement parce qu'il n'est pas possible de satisfaire à tous les items de cette échelle dans certains domaines de la pratique kinésithérapique.

Dernière modification le 21 juin 1999. Traduction française le 1 juillet 2010

### Précisions pour l'utilisation de l'échelle PEDro:

Tous les critères **Les points sont attribués uniquement si le critère est clairement respecté.** Si, lors de la lecture de l'étude, on ne retrouve pas le critère explicitement rédigé, le point ne doit pas être attribué à ce critère.

- Critère 1 Ce critère est respecté si l'article décrit la source de recrutement des sujets et une liste de critères utilisée pour déterminer qui était éligible pour participer à l'étude.
- Critère 2 Une étude est considérée avoir utilisé une *répartition aléatoire* si l'article mentionne que la répartition entre les groupes a été faite au hasard. La méthode précise de répartition aléatoire n'a pas lieu d'être détaillée. Des procédures comme pile ou face ou le lancé de dés sont considérées comme des méthodes de répartition aléatoire. Les procédures quasi-aléatoires, telles que la répartition selon le numéro de dossier hospitalier ou la date de naissance, ou le fait de répartir alternativement les sujets dans les groupes, ne remplissent pas le critère.
- Critère 3 Une *assignation secrète* signifie que la personne qui a déterminé si un sujet répondait aux critères d'inclusion de l'étude ne devait pas, lorsque cette décision a été prise, savoir dans quel groupe le sujet serait admis. Un point est attribué pour ce critère, même s'il n'est pas précisé que l'assignation est secrète, lorsque l'article mentionne que la répartition a été réalisée par enveloppes opaques cachetées ou que la répartition a été réalisée par table de tirage au sort en contactant une personne à distance.
- Critère 4 Au minimum, lors d'études concernant des interventions thérapeutiques, l'article doit décrire au moins une mesure de la gravité de l'affection traitée et au moins une mesure (différente) sur l'un des critères de jugement essentiels en début d'étude. L'évaluateur de l'article doit s'assurer que les résultats des groupes n'ont pas de raison de différer de manière cliniquement significative du seul fait des différences observées au début de l'étude sur les variables pronostiques. Ce critère est respecté, même si les données au début de l'étude ne sont présentées que pour les sujets qui ont terminé l'étude.
- Critères 4, 7-11 Les *critères de jugement* essentiels sont ceux dont les résultats fournissent la principale mesure de l'efficacité (ou du manque d'efficacité) du traitement. Dans la plupart des études, plus d'une variable est utilisée pour mesurer les résultats.
- Critères 5-7 Être "*en aveugle*" signifie que la personne en question (sujet, thérapeute ou évaluateur) ne savait pas dans quel groupe le sujet avait été réparti. De plus, les sujets et les thérapeutes sont considérés être "*en aveugle*" uniquement s'il peut être attendu qu'ils ne sont pas à même de faire la distinction entre les traitements appliqués aux différents groupes. Dans les essais dans lesquels les critères de jugement essentiels sont autoévalués par le sujet (ex. échelle visuelle analogique, recueil journalier de la douleur), l'évaluateur est considéré être "*en aveugle*" si le sujet l'est aussi.
- Critère 8 Ce critère est respecté uniquement si l'article mentionne explicitement *à la fois* le nombre de sujets initialement répartis dans les groupes *et* le nombre de sujets auprès de qui les mesures ont été obtenues pour les critères de jugement essentiels. Pour les essais dans lesquels les résultats sont mesurés à plusieurs reprises dans le temps, un critère de jugement essentiel doit avoir été mesuré pour plus de 85% des sujets à l'une de ces reprises.
- Critère 9 Une *analyse en intention* de traiter signifie que, lorsque les sujets n'ont pas reçu le traitement (ou n'ont pas suivi l'intervention contrôle) qui leur avait été attribué, et lorsque leurs résultats sont disponibles, l'analyse est effectuée comme si les sujets avaient reçu le traitement (ou avaient suivi l'intervention contrôle) comme attribué. Ce critère est respecté, même sans mention d'une analyse en intention de traiter si l'article mentionne explicitement que tous les sujets ont reçu le traitement ou ont suivi l'intervention contrôle comme attribué.
- Critère 10 Une comparaison statistique *intergroupe* implique une comparaison statistique d'un groupe par rapport à un autre. Selon le plan expérimental de l'étude, cela peut impliquer la comparaison de deux traitements ou plus, ou la comparaison d'un traitement avec une intervention contrôle. L'analyse peut être une simple comparaison des résultats mesurés après administration des traitements, ou une comparaison du changement dans un groupe au changement dans un autre (quand une analyse factorielle de variance a été utilisée pour analyser les données, ceci est souvent indiqué sous la forme d'une interaction groupe x temps). La comparaison peut prendre la forme d'un test sous hypothèses (qui produit une valeur "p", décrivant la probabilité que les groupes diffèrent uniquement du fait du hasard) ou prendre la forme d'une estimation (par exemple: différence de moyennes ou de médianes, différence entre proportions, nombre nécessaire de sujets à traiter, risque relatif ou rapport de risque instantané dit "hazard ratio") et de son intervalle de confiance.
- Critère 11 Une *estimation de l'effet* est une mesure de la taille de l'effet du traitement. L'effet du traitement peut être décrit soit par une différence entre les groupes, soit par le résultat au sein (de chacun) de tous les groupes. Les *estimations de la variabilité* incluent les écarts-types, les erreurs standards, les intervalles de confiance, les intervalles interquartiles (ou autres quantiles) et les étendues. Les estimations de l'effet et/ou de la variabilité peuvent être fournies sous forme graphique (par exemple, les écarts-types peuvent être représentés sous forme de barres d'erreurs dans une figure) à la condition expresse que le graphique soit clairement légendé (par exemple, qu'il soit explicite que ces barres d'erreurs représentent des écarts-type ou des erreurs-standard). S'il s'agit de résultats classés par catégories, ce critère est considéré respecté si le nombre de sujets de chaque catégorie est précisé pour chacun des groupes.

Annexe 2 : Grille du niveau de preuve HAS

Niveau de preuve	Description
Fort	<ul style="list-style-type: none"> <li>- le protocole est adapté pour répondre au mieux à la question posée ;</li> <li>- la réalisation est effectuée sans biais majeur ;</li> <li>- l'analyse statistique est adaptée aux objectifs ;</li> <li>- la puissance est suffisante.</li> </ul>
Intermédiaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- le protocole est adapté pour répondre au mieux à la question posée ;</li> <li>- puissance nettement insuffisante (effectif insuffisant ou puissance <i>a posteriori</i> insuffisante) ;</li> </ul>
	- et/ou des anomalies mineures.
Faible	Autres types d'études.

Annexe 3 : Grille grade des recommandations

Grade des recommandations	Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature
A Preuve scientifique établie	<p>Niveau 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- essais comparatifs randomisés de forte puissance ;</li> <li>- méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ;</li> <li>- analyse de décision fondée sur des études bien menées.</li> </ul>
B Présomption scientifique	<p>Niveau 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- essais comparatifs randomisés de faible puissance ;</li> <li>- études comparatives non randomisées bien menées ;</li> <li>- études de cohortes.</li> </ul>
C Faible niveau de preuve scientifique	<p>Niveau 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- études cas-témoins.</li> </ul>
	<p>Niveau 4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- études comparatives comportant des biais importants ;</li> <li>- études rétrospectives ;</li> <li>- séries de cas ;</li> <li>- études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale).</li> </ul>

## Annexe 4 : AMSTAR-2

AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both

<b>1. Did the research questions and inclusion criteria for the review include the components of PICO?</b>		
For Yes: <input type="checkbox"/> Population <input type="checkbox"/> Intervention <input type="checkbox"/> Comparator group <input type="checkbox"/> Outcome	Optional (recommended) <input type="checkbox"/> Timeframe for follow-up	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No
<b>2. Did the report of the review contain an explicit statement that the review methods were established prior to the conduct of the review and did the report justify any significant deviations from the protocol?</b>		
For Partial Yes: The authors state that they had a written protocol or guide that included ALL the following:  <input type="checkbox"/> review question(s) <input type="checkbox"/> a search strategy <input type="checkbox"/> inclusion/exclusion criteria <input type="checkbox"/> a risk of bias assessment	For Yes: As for partial yes, plus the protocol should be registered and should also have specified:  <input type="checkbox"/> a meta-analysis/synthesis plan, if appropriate, <i>and</i> <input type="checkbox"/> a plan for investigating causes of heterogeneity <input type="checkbox"/> justification for any deviations from the protocol	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> Partial Yes <input type="checkbox"/> No
<b>3. Did the review authors explain their selection of the study designs for inclusion in the review?</b>		
For Yes, the review should satisfy ONE of the following:		
<input type="checkbox"/> <i>Explanation for</i> including only RCTs <input type="checkbox"/> <i>OR Explanation for</i> including only NRSI <input type="checkbox"/> <i>OR Explanation for</i> including both RCTs and NRSI		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No
<b>4. Did the review authors use a comprehensive literature search strategy?</b>		
For Partial Yes (all the following):  <input type="checkbox"/> searched at least 2 databases (relevant to research question) <input type="checkbox"/> provided key word and/or search strategy <input type="checkbox"/> justified publication restrictions (e.g. language)	For Yes, should also have (all the following):  <input type="checkbox"/> searched the reference lists / bibliographies of included studies <input type="checkbox"/> searched trial/study registries <input type="checkbox"/> included/consulted content experts in the field <input type="checkbox"/> where relevant, searched for grey literature <input type="checkbox"/> conducted search within 24 months of completion of the review	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> Partial Yes <input type="checkbox"/> No
<b>5. Did the review authors perform study selection in duplicate?</b>		
For Yes, either ONE of the following:		
<input type="checkbox"/> at least two reviewers independently agreed on selection of eligible studies and achieved consensus on which studies to include <input type="checkbox"/> <i>OR</i> two reviewers selected a sample of eligible studies <u>and</u> achieved good agreement (at least 80 percent), with the remainder selected by one reviewer.		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No
<b>6. Did the review authors perform data extraction in duplicate?</b>		
For Yes, either ONE of the following:		
<input type="checkbox"/> at least two reviewers achieved consensus on which data to extract from included studies <input type="checkbox"/> <i>OR</i> two reviewers extracted data from a sample of eligible studies <u>and</u> achieved good agreement (at least 80 percent), with the remainder extracted by one reviewer.		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No
<b>7. Did the review authors provide a list of excluded studies and justify the exclusions?</b>		
For Partial Yes: <input type="checkbox"/> provided a list of all potentially relevant studies that were read in full-text form but excluded from the review	For Yes, must also have: <input type="checkbox"/> Justified the exclusion from the review of each potentially relevant study	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> Partial Yes <input type="checkbox"/> No
<b>8. Did the review authors describe the included studies in adequate detail?</b>		
For Partial Yes (ALL the following):  <input type="checkbox"/> described populations <input type="checkbox"/> described interventions <input type="checkbox"/> described comparators <input type="checkbox"/> described outcomes <input type="checkbox"/> described research designs	For Yes, should also have ALL the following:  <input type="checkbox"/> described population in detail <input type="checkbox"/> described intervention in detail (including doses where relevant) <input type="checkbox"/> described comparator in detail (including doses where relevant) <input type="checkbox"/> described study's setting <input type="checkbox"/> timeframe for follow-up	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> Partial Yes <input type="checkbox"/> No

**9. Did the review authors use a satisfactory technique for assessing the risk of bias (RoB) in individual studies that were included in the review?**

<b>RCTs</b>		
For Partial Yes, must have assessed RoB from	For Yes, must also have assessed RoB from:	
<input type="checkbox"/> unconcealed allocation, <i>and</i>	<input type="checkbox"/> allocation sequence that was not truly random, <i>and</i>	<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> lack of blinding of patients and assessors when assessing outcomes (unnecessary for objective outcomes such as all-cause mortality)	<input type="checkbox"/> selection of the reported result from among multiple measurements or analyses of a specified outcome	<input type="checkbox"/> Partial Yes
		<input type="checkbox"/> No
		<input type="checkbox"/> Includes only NRSI
<b>NRSI</b>		
For Partial Yes, must have assessed RoB:	For Yes, must also have assessed RoB:	
<input type="checkbox"/> from confounding, <i>and</i>	<input type="checkbox"/> methods used to ascertain exposures and outcomes, <i>and</i>	<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> from selection bias	<input type="checkbox"/> selection of the reported result from among multiple measurements or analyses of a specified outcome	<input type="checkbox"/> Partial Yes
		<input type="checkbox"/> No
		<input type="checkbox"/> Includes only RCTs

**10. Did the review authors report on the sources of funding for the studies included in the review?**

For Yes

Must have reported on the sources of funding for individual studies included in the review. Note: Reporting that the reviewers looked for this information but it was not reported by study authors also qualifies  Yes

No

**11. If meta-analysis was performed did the review authors use appropriate methods for statistical combination of results?**

<b>RCTs</b>		
For Yes:		
<input type="checkbox"/> The authors justified combining the data in a meta-analysis		<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> AND they used an appropriate weighted technique to combine study results and adjusted for heterogeneity if present.		<input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> AND investigated the causes of any heterogeneity		<input type="checkbox"/> No meta-analysis conducted
<b>For NRSI</b>		
For Yes:		
<input type="checkbox"/> The authors justified combining the data in a meta-analysis		<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> AND they used an appropriate weighted technique to combine study results, adjusting for heterogeneity if present		<input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> AND they statistically combined effect estimates from NRSI that were adjusted for confounding, rather than combining raw data, or justified combining raw data when adjusted effect estimates were not available		<input type="checkbox"/> No meta-analysis conducted
<input type="checkbox"/> AND they reported separate summary estimates for RCTs and NRSI separately when both were included in the review		

**12. If meta-analysis was performed, did the review authors assess the potential impact of RoB in individual studies on the results of the meta-analysis or other evidence synthesis?**

For Yes:

included only low risk of bias RCTs  Yes

OR, if the pooled estimate was based on RCTs and/or NRSI at variable RoB, the authors performed analyses to investigate possible impact of RoB on summary estimates of effect.  No

No meta-analysis conducted

**13. Did the review authors account for RoB in individual studies when interpreting/ discussing the results of the review?**

For Yes:

included only low risk of bias RCTs  Yes

OR, if RCTs with moderate or high RoB, or NRSI were included the review provided a discussion of the likely impact of RoB on the results  No

**14. Did the review authors provide a satisfactory explanation for, and discussion of, any heterogeneity observed in the results of the review?**

For Yes:

There was no significant heterogeneity in the results  Yes

OR if heterogeneity was present the authors performed an investigation of sources of any heterogeneity in the results and discussed the impact of this on the results of the review  No

**15. If they performed quantitative synthesis did the review authors carry out an adequate investigation of publication bias (small study bias) and discuss its likely impact on the results of the review?**

For Yes:

performed graphical or statistical tests for publication bias and discussed the likelihood and magnitude of impact of publication bias  Yes

No

No meta-analysis conducted

**16. Did the review authors report any potential sources of conflict of interest, including any funding they received for conducting the review?**

For Yes:

The authors reported no competing interests OR  Yes

The authors described their funding sources and how they managed potential conflicts of interest  No

**To cite this tool:** Shea BJ, Reeves BC, Wells G, Thuku M, Hamel C, Moran J, Moher D, Tugwell P, Welch V, Kristjansson E, Henry DA. AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ*. 2017 Sep 21;358:j4008.

- CROSS EDUCATION : EFFETS DU TRAVAIL EXCENTRIQUE UNILATERAL DES EXTENSEURS DU GENOU SUR LE GAIN DE FORCE CONTROLATERAL
- CROSS EDUCATION : EFFECTS OF UNILATERAL ECCENTRIC TRAINING OF KNEE EXTENSORS ON CONTRALATERAL STRENGTH GAIN

Nombre de pages: 63

Directeur de mémoire: Mr FORASACCO Jérémy

#### Résumé:

**Introduction** : L'éducation croisée est un phénomène neurophysiologique complexe qui décrit l'augmentation de la force d'un membre suite à un entraînement unilatéral du membre opposé. Le travail excentrique a été démontré comme le régime de contraction induisant le plus grand transfert de force par éducation croisée.

**Objectif** : Évaluer le gain de force obtenu par éducation croisée des extenseurs du genou à la suite d'un protocole excentrique unilatéral.

**Méthodologie** : Quatre bases de données ont été consultées de 2013 à novembre 2023. L'ensemble des essais cliniques randomisés sélectionnés ciblent l'entraînement excentrique unilatéral des extenseurs du genou sur de jeunes adultes en bonne santé.

**Résultats** : Quatre études ont été incluses dans cette revue. Les données de 132 participants ont été assemblées et analysées. La différence inter groupe globale (expérimental/contrôle) de chaque couple de force maximale a présenté les résultats suivants. L'augmentation du couple de force maximale excentrique présente les gains les plus importants avec +41,26 N.m [23,09 ; 59,44] ( $p < 0,00001$ ) du membre non entraîné. Le couple de force maximale isométrique présente une amélioration de +21,49 N.m [2,91 ; 40,07] ( $p = 0,02$ ). Et quant au couple de force maximale concentrique, il semble le moins sensible à la suite du protocole excentrique avec une amélioration non significative de +12,79 N.m [-0,03 ; 25,60] ( $p = 0,05$ ).

**Discussion** : Les biais présents dans cette revue peuvent limiter l'interprétation des résultats. Toutefois, l'entraînement excentrique unilatéral des extenseurs du genou semble apporter des gains de force du membre controlatéral. Même si les modalités d'entraînement sont connues, des recherches sont encore nécessaires afin d'optimiser les effets. Des techniques de rééducation alternatives comme l'éducation croisée pourraient être intéressantes afin d'améliorer, maintenir ou limiter une perte de la force des extenseurs du genou.

#### Abstract:

**Background** : Cross-education is a complex neurophysiological phenomenon that describes the increase in strength of one limb following unilateral training of the opposite limb. Eccentric work has been demonstrated to be the contraction regime inducing the greatest transfer of force through cross-education.

**Objective**: To evaluate the strength gain obtained by cross-education of the knee extensors following a unilateral eccentric protocol.

**Methods** : Four databases were consulted from 2013 to November 2023. All selected randomized clinical trials included unilateral eccentric training of knee extensors in healthy young adults.

**Results** : Four studies were included in this review. Data from 132 participants were assembled and analyzed. The difference between overall group (experimental/control) of each maximal force couple presented the following results. The increase in maximum eccentric force torque presents the largest gains with +41,26 N.m [23,09; 59,44] ( $p < 0.00001$ ) of the untrained limb. The maximum isometric force torque presents a value of +21,49 N.m [2,91 ; 40,07] ( $p = 0,02$ ). And as for the maximum concentric force torque, it seems the least sensitive following the eccentric protocol with a non-significant amount of +12,79 N.m [-0,03 ; 25,60] ( $p = 0,05$ ).

**Discussion** : The biases present in this review may limit the interpretation of the results. However, unilateral eccentric training of the knee extensors appears to provide strength gains in the contralateral limb. Even if the training methods are known, research is still necessary to optimize the effects. Alternative rehabilitation techniques such as cross-education could be interesting in order to improve, maintain or limit a loss of knee extensor strength.

**Mots clés** : Education croisée, force, excentrique, quadriceps, extenseurs du genou

**Key words** : Cross education, strength, eccentric, quadriceps, knee extensors