



**HAL**  
open science

# Bénéfices du travail excentrique dans le phénomène d'éducation croisée

Émeline Bernaudon

► **To cite this version:**

Émeline Bernaudon. Bénéfices du travail excentrique dans le phénomène d'éducation croisée. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. dumas-04155949

**HAL Id: dumas-04155949**

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04155949v1>

Submitted on 7 Jul 2023

**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

**BÉNÉFICES DU TRAVAIL EXCENTRIQUE  
DANS LE PHÉNOMÈNE D'ÉDUCATION  
CROISÉE**

**BERNAUDON Emeline**  
**Directeur de mémoire : M.BLACHERE Adrien**

## REMERCIEMENTS

J'aimerais adresser dans un premier temps mes remerciements à mon directeur de mémoire, Monsieur BLACHÈRE Adrien, pour m'avoir accompagnée avec écoute et bienveillance tout au long de ce projet.

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant participé à mon apprentissage et mon développement professionnel, qu'ils soient professeurs, professionnels de santé, ou patients.

Dans le cadre de l'élaboration de ce mémoire, je tiens à remercier Jean-Baptiste pour son implication et ses précieux conseils, ainsi que Jean-Luc, mon cher relecteur, pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Je remercie également Lison et mes amis les plus proches, pour leur soutien indéfectible et leur aide dans la rédaction de ce mémoire. Je les remercie également pour les merveilleux moments passés ensemble.

Enfin, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à ma famille, pour leur amour inconditionnel. Merci à mes grands-parents, pour votre présence à mes côtés depuis toujours, pour m'avoir transmis vos valeurs, et pour votre soutien à toute épreuve.

Merci à ma petite sœur, pour ta capacité à m'épauler et à m'encourager à chaque étape de ma vie, avec une profonde bienveillance.

Tout particulièrement, je tiens à remercier ma maman, qui m'a tout donné et tout appris. Merci pour ta patience, ta confiance, et tous les efforts que tu as fournis pour que j'en arrive là où j'en suis aujourd'hui.

Je remercie également Romain, pour son amour et la confiance qu'il m'apporte chaque jour.

Pour terminer, je souhaite remercier mon papa, pour tout ce qu'il m'a apporté jusqu'ici, en espérant qu'il est fier de moi.

A toutes ces personnes, et toutes celles que je n'ai pu citer, je vous suis infiniment reconnaissante.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1	Prodrôme.....	1
1.2	Tissu musculaire.....	1
1.2.1	Typologie.....	1
1.2.2	Structure de la fibre musculaire.....	2
1.2.3	Mécanisme de contraction musculaire.....	5
1.3	Mode de contraction.....	7
1.4	Éducation croisée.....	10
1.4.1	Définition.....	10
1.4.2	Entraînement en résistance.....	10
1.4.3	Mécanismes.....	11
<b>2</b>	<b>Méthode.....</b>	<b>15</b>
2.1	Critères d'éligibilité des études pour cette revue.....	15
2.1.1	Schéma d'étude.....	15
2.1.2	Population.....	15
2.1.3	Intervention.....	16
2.1.4	Comparateur.....	16
2.1.5	Critère de jugement.....	16
2.2	Méthodologie de recherche des études.....	16
2.2.1	Sources documentaires investiguées.....	16
2.2.2	Équations de recherche utilisées.....	16
2.3	Méthode d'extraction et d'analyse des données.....	18
2.3.1	Sélection des études.....	18
2.3.2	Évaluation de la qualité méthodologique des études sélectionnées.....	19
2.3.3	Extraction des données.....	19
2.4	Méthode de synthèse des résultats.....	20
<b>3</b>	<b>Résultats.....</b>	<b>21</b>
3.1	Description des études.....	21
3.1.1	Diagramme de flux.....	21
3.1.2	Études exclues.....	22
3.1.3	Études incluses.....	22
3.2	Risque de biais des études incluses.....	28
3.3	Effets de l'intervention sur le critère de jugement.....	30
3.3.1	Critère de jugement principal : la force volontaire maximale isométrique MVIC.....	30
3.3.1.1	Étude numéro 1 : TSENG et al.....	31
3.3.1.2	Étude numéro 2 : Valdès et al.....	32
3.3.1.3	Étude numéro 3 : Sato et al.....	33
3.3.1.4	Étude numéro 4 : Coratella et al.....	35

<b>4</b>	<b><i>Discussion</i></b> .....	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Analyse des principaux résultats</b> .....	<b>37</b>
4.1.1	Analyse des populations.....	37
4.1.2	Analyse des interventions .....	38
4.1.3	Analyse des comparateurs .....	38
4.1.4	Analyse des critères de jugement .....	39
4.1.5	Analyse des résultats.....	39
4.1.5.1	Bénéfices du travail musculaire excentrique versus concentrique. ....	39
4.1.5.2	Bénéfices du travail musculaire excentrique versus concentrique/excentrique couplé.....	41
4.1.6	Qualité de preuve.....	44
<b>4.2</b>	<b>Applicabilité des résultats en pratique clinique</b> .....	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>Biais potentiel de la revue</b> .....	<b>46</b>
<b>5</b>	<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Implication pour la pratique clinique</b> .....	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Implications pour la recherche</b> .....	<b>49</b>
<b>6</b>	<b><i>Bibliographie</i></b> .....	<b>50</b>
<b>7</b>	<b><i>Annexes</i></b> .....	<b>54</b>

Liste des abréviations :

**ECR** : *randomized controlled trial*, essai clinique randomisé.

**IC** : intervalle de confiance.

**MVIC** : *maximal voluntary isometric contraction*, force maximale de contraction volontaire isométrique.

**HAS** : Haute Autorité de Santé.

**EIMD** : dommages musculaires induits par l'exercice.

**DOMS** : douleurs musculaires d'apparition retardée.

# 1 Introduction

## 1.1 Prodrome

Après une blessure musculosquelettique, une immobilisation ou une limitation de mouvement est parfois imposée. Même si elle s'effectue sur une période courte, l'immobilisation entraîne une réduction de force et une atrophie musculaire, impactant considérablement les performances physiques du patient. En tant que kinésithérapeute, limiter la diminution de force musculaire du membre sous sollicité est un enjeu clé de la prise en charge de ces patients.

L'éducation croisée est un phénomène complexe, qui peut faire partie des outils thérapeutiques à disposition du kinésithérapeute. Elle consiste à réaliser un entraînement en résistance unilatéral avec le membre sain, qui entraîne un transfert de force vers le muscle controlatéral inactif. Elle permet de prévenir la perte de force du membre pathologique, par des adaptations neuronales. Ce transfert de force représente ainsi l'opportunité d'améliorer la réadaptation après une blessure.

Les modalités de réalisation de l'entraînement unilatéral à l'origine de ce phénomène restent néanmoins floues, avec des données scientifiques qui se contredisent. Ce manque de clarté m'a amenée à me poser la question suivante : avec quelle modalité de contraction le transfert de force controlatéral est-il optimal ?

La technique d'éducation croisée m'était inconnue jusqu'à ce que je trouve un article pendant la recherche documentaire. Ce sujet m'a intrigué car, de manière brute, penser que l'exercice sur un groupe musculaire à droite puisse impacter la force musculaire du même groupe musculaire à gauche, semble absurde. Les hypothèses des mécanismes sous-jacents, parfois controversées, ont été intéressantes à comprendre.

La théorie est importante, mais pour ma pratique future, il m'a paru important de rechercher au-delà de ces éléments scientifiques. Je voulais connaître les conditions dans lesquelles cette technique offre les meilleurs résultats possibles.

## 1.2 Tissu musculaire

### 1.2.1 Typologie

Le tissu musculaire représente une part très importante de notre organisme. D'un point de vue fonctionnel, sa principale caractéristique est sa capacité à transformer une énergie chimique (ATP) en énergie mécanique. De par ses propriétés contractiles, le tissu musculaire est le véritable moteur de l'organisme. Il intervient dans de nombreux processus essentiels à la vie. [1]

Chez l'Homme, il existe trois types de muscles, avec des propriétés communes mais également des différences au niveau anatomique, topographique, et fonctionnel notamment à cause de leur innervation par les systèmes nerveux et endocriniens. [2]

Le tableau suivant synthétise les principales caractéristiques anatomiques et fonctionnelles des trois types de muscle rencontrés chez l'Homme. <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> <https://www.institut-myologie.org/enseignement/connaissances-sur-le-muscle/les-differents-types-de-muscles/>

	<b>Muscle lisse</b>	<b>Muscle strié cardiaque</b>	<b>Muscle strié squelettique</b>
<b>Fibres</b>	Allongées, disposées en couche mince	Striées	Striées
<b>Noyaux</b>	Unique et central	Unique et central	Multiplés et périphériques
<b>Myofibrilles</b>	Dans l'axe de la cellule (longitudinales)	Groupées, divisées dans le sens longitudinal en disques sombres et clairs alternés	Groupées, divisées dans le sens longitudinal en disques sombres et clairs alternés
<b>Contraction</b>	Involontaire, lente	Involontaire	<b>Volontaire</b> (avec contrôle conscient ou subconscient)
<b>Localisation</b>	Parois viscères creux, vaisseaux sanguins	Myocarde	Ensemble du squelette, fixés par l'intermédiaire de tendons

Tableau 1 : Les différents types de muscles du corps Humain et leurs caractéristiques anatomiques et fonctionnelles.

Le type de muscle le plus abondant chez l'Homme est le muscle strié squelettique.

Les muscles striés squelettiques sont les organes effecteurs de l'appareil locomoteur, ils assurent la motricité du corps dans son environnement. Chez un individu ayant un indice de masse corporelle dans la norme, ils constituent 40% du poids total, et sont représentés par plus de 400 muscles distincts. [3] Ils sont pourvus d'une contraction volontaire secondaire à une commande nerveuse. L'activité contractile peut être contrôlée consciemment, c'est le cas des muscles de mouvements, ou de manière subconsciente, pour les muscles posturaux ou le diaphragme.

L'entraînement en résistance unilatéral à l'origine du phénomène d'éducation croisée fait donc appel aux muscles striés squelettiques. C'est pourquoi, la suite de cette revue se concentrera uniquement sur cette catégorie musculaire.

### 1.2.2 Structure de la fibre musculaire [1] [4,5]

#### Sur le plan macroscopique.

La coupe transversale d'un muscle strié squelettique révèle un certain nombre de faisceaux musculaires, eux-mêmes constitués par un ensemble de fibres ou cellules musculaires striées appelées rhabdomyocytes.

Il y a une alternance de tissu musculaire et de tissu conjonctif. Les structures conjonctives constituent 10 à 15% du volume du muscle, et sont disposées sous forme de couches. Une couche conjonctive interne appelé endomysium entoure la fibre musculaire. À la périphérie, le pérимysium et l'épимysium enrobent respectivement les faisceaux de fibres musculaires puis le muscle. [5] Les éléments vasculaires et nerveux traversent des couches conjonctives pour arriver jusqu'aux fibres musculaires.

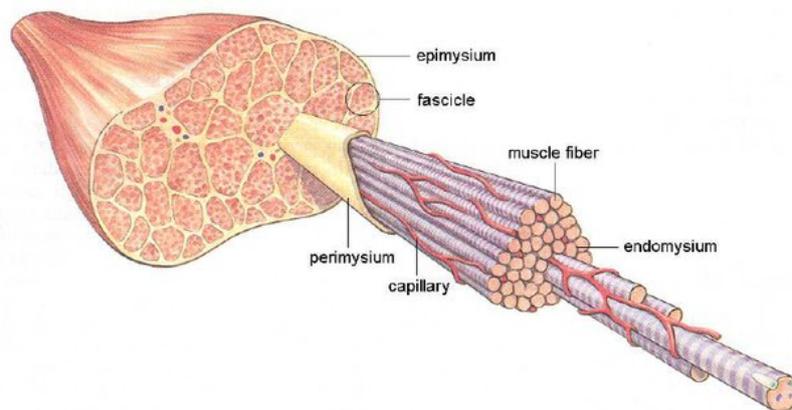


Figure 1 : Coupe transversale d'un muscle strié squelettique. <sup>2</sup>

### À l'échelle cellulaire.

La cellule composant le tissu musculaire strié squelettique est le myocyte, aussi appelée fibre musculaire en raison de sa forme allongée.

Au microscope optique, sur une coupe longitudinale, les myocytes apparaissent comme des cellules rubanées. On observe une striation transversale qui est un aspect caractéristique du cytoplasme. Ces cellules peuvent aller de 2 à 3 centimètres de longueur à 50 centimètres, et ont une épaisseur comprise entre 10 et 100 micromètres.

Les trois composants cellulaires classiques sont retrouvés dans la cellule musculaire striée squelettique avec :

- La membrane plasmique doublée d'une membrane basale, l'ensemble porte le nom de sarcolemme.
- La portion nucléaire, les myocytes étant des cellules multinucléées. Les noyaux, dont la taille et le nombre sont fonction de la taille cellulaire, occupent une position périphérique sous la membrane plasmique.
- Le cytoplasme, séparé d'un point de vue fonctionnel en deux compartiments. Le sarcoplasme contenant les organites intracellulaires, et le myoplasme qui contient des fibres protéiques minces et allongées, appelées myofibrilles. Les **myofibrilles** sont les **éléments contractiles**, elles sont parallèles au grand axe de la cellule, et représentent le pilier de la contraction musculaire.

Au microscope optique, sur une coupe transversale, les myofibrilles se regroupent en amas myofibrillaires qu'on appelle champs de Conheim.

<sup>2</sup>[https://www.researchgate.net/publication/255630898\\_Aetiology\\_of\\_pressure\\_ulcers\\_A\\_literature\\_review/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/255630898_Aetiology_of_pressure_ulcers_A_literature_review/figures?lo=1)

## À l'échelle moléculaire.

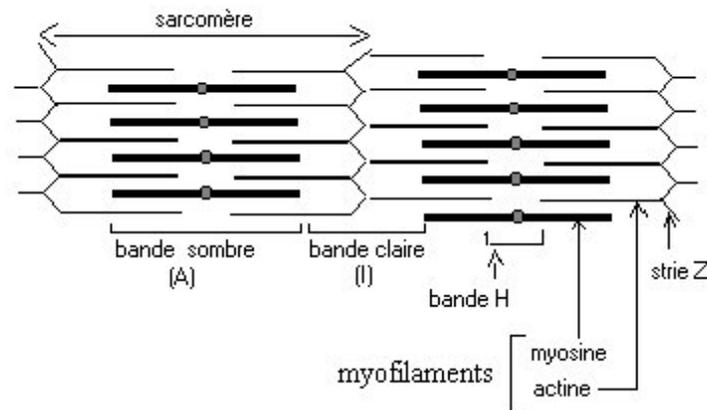


Figure 2 : Ultrastructure du sarcomère. <sup>3</sup>

Le sarcomère est l'unité fonctionnelle de la myofibrille. Chaque sarcomère est délimité par l'espace entre deux stries Z. Il est composé de filaments épais et de filaments fins. On distingue une interpénétration et une juxtaposition des myofilaments fins par rapport aux myofilaments épais.

La longueur des myofilaments épais délimite la bande sombre (A).

La partie du disque (A) ne comportant que des myofilaments épais est appelée bande H.

Entre la strie Z et le disque (A), se trouve un demi-disque (I).

Les **myofilaments épais** sont constitués des molécules de myosines, présentant six chaînes polypeptidiques dont deux chaînes lourdes et quatre chaînes légères. Les deux chaînes lourdes sont enroulées l'une autour de l'autre en hélice alpha pour former deux têtes et deux queues enroulées. Les chaînes légères sont localisées à la base des têtes globulaires de myosine. La myoméline permet de lier plusieurs molécules de myosines entre elles au sein d'un filament épais. Une protéine appelée « titine » permet l'accrochage de chaque myofilament épais à la strie Z. Au niveau des têtes de myosines se trouvent des sites de fixation pour l'actine et un site de fixation pour l'ATP avec une activité hydrolase qui est actine dépendante.

Les **myofilaments fins** sont composés d'actine, de troponine, de tropomyosine et d'autres protéines associées. Les monomères d'actine globulaire « G-actine » s'associent entre eux pour former un polymère d'actine filamenteuse « F-actine ». Deux chaînes de F-actine s'enroulent de manière hélicoïdale. Des protéines stabilisatrices coiffent les extrémités des 2 filaments fins pour empêcher toute polymérisation ou dépolymérisation et assurer une longueur stable du filament.

Les molécules de G-actine possèdent des sites de liaison à la myosine, qui sont masqués par la tropomyosine au repos. Cette protéine régulatrice empêche le contact entre la tête de myosine et l'actine. Une autre protéine est impliquée dans la régulation de la contraction musculaire, il s'agit de la troponine, constituée de 3 sous unités, une qui fixe les ions calcium, une qui fixe la tropomyosine et une qui permet d'inhiber le contact entre l'actine et la myosine.

La *figure 3* représente le complexe actine/troponine/tropomyosine. Au repos, les sites de fixation actine/myosine sont masqués par les deux protéines régulatrices. Lorsque le mécanisme de contraction (détaillé dans le *paragraphe 1.2.3*) se déclenche, le calcium libéré se fixe sur la sous-unité

<sup>3</sup>[https://www.researchgate.net/profile/SebastienHascoet/publication/265050144/figure/fig4/AS:667619355017241@1536184266719/Ultrastructure-du-sarcomere\\_W640.jpg](https://www.researchgate.net/profile/SebastienHascoet/publication/265050144/figure/fig4/AS:667619355017241@1536184266719/Ultrastructure-du-sarcomere_W640.jpg)

TnC de la troponine, induisant un changement de conformation de celle-ci et une libération des sites de fixation actine/myosine.

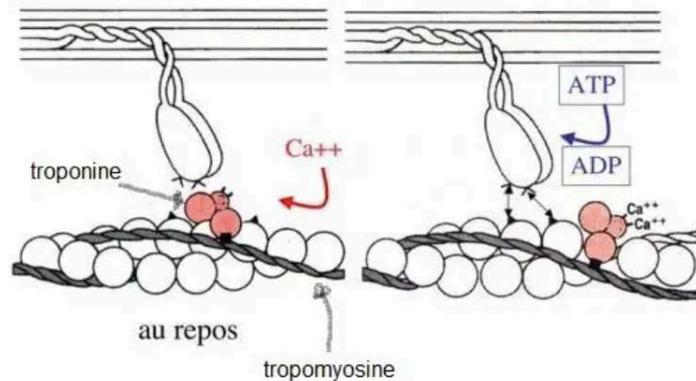


Figure 3 : Complexe F-actine, troponine et tropomyosine. <sup>4</sup>

Le **sarcolemme** présente des invaginations vers l'intérieur de la cellule musculaire, à intervalle régulier, formant les tubules transverses ou tubules T. Tout au long de cette invagination de membrane se trouvent des récepteurs voltages dépendants.

Les myofibrilles sont entourées par du réticulum endoplasmique lisse, appelé réticulum sarcoplasmique, spécialisé dans le stockage et la libération de calcium. Il se présente sous forme de citernes terminales transversales qui se disposent de chaque côté des tubules T.

Ainsi, les triades sont des complexes formés par un tubule T et deux citernes terminales transversales du réticulum sarcoplasmique.

#### Typologie des fibres :

Il est à noter que le tissu musculaire est très hétérogène, et possède un large éventail de fonctionnalités. Les cellules musculaires ne sont pas toutes identiques, et présentent parfois des divergences sur le plan métabolique et contractile. Plusieurs types de fibres ont été décrites (type I, IIA, IIB) en fonction de leur couleur, vitesse de contraction, capacité oxydative, fatigabilité et autres. Néanmoins ce facteur ne semble pas influencer le transfert de force par éducation croisée. [6]

#### 1.2.3 Mécanisme de contraction musculaire [4,5,7,8]

La contraction musculaire volontaire est déclenchée par un influx nerveux, qui chemine le long d'un motoneurone alpha situé dans la corne antérieure de la moelle épinière, ou dans les noyaux moteurs à l'origine des nerfs crâniens. La terminaison axonale se ramifie, afin d'innover plusieurs fibres musculaires. La plaque motrice, ou jonction neuro-musculaire, correspond au site d'échange entre le motoneurone et les fibres musculaires qu'il innerve. La terminaison axonale est la zone présynaptique, elle contient de nombreuses vésicules contenant le neurotransmetteur acétylcholine. La fente synaptique sépare l'axone de la cellule musculaire post-synaptique.

#### Couplage excitation-contraction

Au repos, le microenvironnement extérieur d'une cellule est positif alors que l'intérieur est négatif. L'ordre de contraction se traduit par un potentiel d'action qui descend le long de la membrane du motoneurone alpha, provoquant l'excitation des canaux calciques voltage dépendants, qui laissent

<sup>4</sup> CAU P, SEITE R. Cours de biologie cellulaire. 5ème édition. Ellipses; 2012.



Lorsque le calcium est libéré dans le cytoplasme de la cellule musculaire, celui-ci se lie à une sous-unité de la troponine, provoquant des changements conformationnels des autres unités. La troponine et la tropomyosine ayant un site de liaison commun, lorsque la troponine bascule elle entraîne avec elle la tropomyosine, ce qui libère les sites de fixation de l'actine à la myosine, préalablement masqués par la tropomyosine (cf figure 3). Ainsi, l'actine et la myosine entrent en contact, l'ATP se fixe sur la tête de myosine, et est hydrolysé en ADP + Pi. La dissociation et la libération des molécules entraînent une libération d'énergie, la tête de myosine se plie d'un angle de 90° à un angle de 45°, provoquant l'avancée des filaments d'actine. La contraction musculaire résulte de l'avancée des filaments fins le long des filaments épais, c'est un état d'interpénétration.

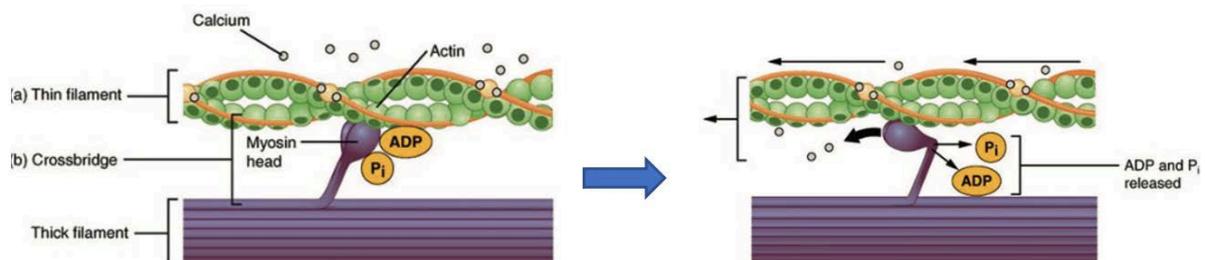


Figure 5 : Glissement des filaments au cours de la contraction musculaire. <sup>6</sup>

### 1.3 Mode de contraction. [9–11]

La fonction du muscle strié squelettique est d'assurer la motricité du corps dans son environnement. L'activation du muscle engendre une contraction. Le travail musculaire fourni peut être :

- **Statique**, sans déplacement angulaire. Le muscle procure une contraction isométrique.
- **Dynamique**, entraînant la mobilisation d'un segment par rapport à un autre. Le muscle procure une contraction anisométrique, avec un changement de longueur.

Plusieurs modes de contractions musculaires peuvent être décrits en fonction de leurs propriétés. Dans cette revue seront détaillés les modes de contraction isométrique, concentrique et excentrique.

Le mode de contraction **isométrique** n'entraîne pas de déplacement angulaire. Le muscle est activement maintenu à une longueur fixe. Les tendons s'allongent, et les fibres musculaires se raccourcissent. Ainsi, les moments moteurs et les moments résistants sont égaux, c'est-à-dire que la force développée par le muscle est égale à la résistance opposée au mouvement.

Le mode de contraction **concentrique** entraîne un rapprochement des points d'insertion du muscle. Le moment moteur est supérieur au moment résistant, il s'agit d'une activité musculaire mobilisatrice.

Le mode de contraction **excentrique** s'accompagne d'un allongement musculaire, les points d'insertion s'éloignent. La résistance opposée au mouvement est supérieure à la force développée par le muscle, le moment résistant est supérieur au moment moteur, on parle d'activité musculaire frénatrice.

<sup>6</sup> Fowler S, Roush R, Wise J. Concepts of biology. OpenStax. 2013.

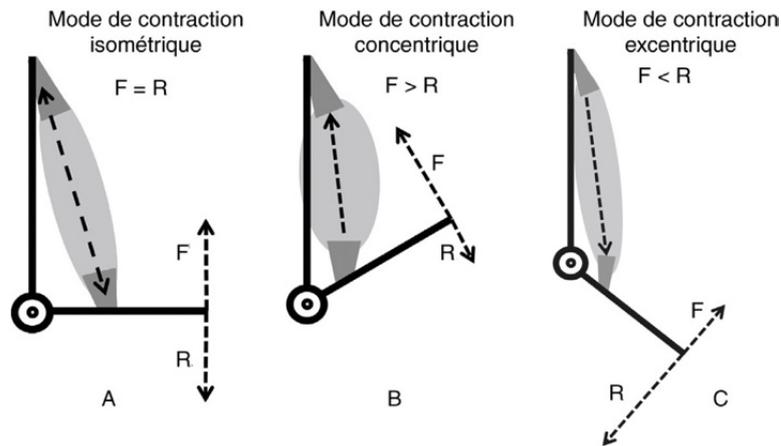


Figure 6 : Les trois modes de contraction du muscle strié squelettique. <sup>7</sup>

Dans la *figure 6*, « F » représente le moment moteur et « R » représente le moment résistant. Chaque mode de contraction présente des avantages et des inconvénients qui sont listés dans le tableau ci-dessous. En fonction des objectifs de rééducation, tel ou tel mode de contraction sera privilégié.

		Avantages	Inconvénients
ISOMÉTRIQUE		Permet l'activité musculaire même si la mobilité articulaire est limitée/interdite/douloureuse. Diminue les contraintes articulaires. Facilité de mise en place. Permet de développer une force à 100-110% de la Répétition Maximale (RM).	Gain de force spécifique à l'angulation de travail. Affecte très peu la vitesse de contraction. Peu fonctionnel, Peu de feed back. La force varie avec la position (notion de tension-longueur).
ANISOMÉTRIQUE	Généralités	Mobilise capsule et ligaments, Lubrification de l'articulation, favorise le schéma spatial et corporel. Fonctionnel. Amélioration de la force musculaire dans le secteur permis. Amélioration de la vitesse de contraction.	Le placement de la résistance en fonction du bras de levier peut augmenter les contraintes au niveau articulaire.
	Concentrique	Permet de développer une force à 100% de la RM. Temps de récupération court. Hypertrophie +++.	Peu d'actions sur les structures passives du muscle.
	Excentrique	Permet de développer une force supérieure à 120% de la RM.	Temps de récupération long car risque lésionnel accru.

Tableau II : Les différents mode de contraction du muscle strié squelettique.

La contraction isométrique est la moins fonctionnelle. Elle sera utilisée lorsque le travail musculaire ne peut pas être effectué dans l'amplitude complète, ou lorsqu'un déficit de force musculaire est observé dans une course musculaire spécifiquement.

La plupart des études impliquant le transfert de force par éducation croisée se basent sur un entraînement en résistance unilatéral à mode de contraction concentrique ou excentrique. La suite de cette revue sera focalisée uniquement sur ces deux types de contraction.

<sup>7</sup> Croisier J-L, Codine P. Exercice musculaire excentrique. 2009.

## Spécificités du travail musculaire excentrique et comparaison avec le travail musculaire concentrique :

### Au niveau moléculaire :

Les contractions excentriques développent une force supérieure aux contractions concentriques et isométriques. Sachant que la fibre musculaire génère une tension via l'action des ponts croisés actine/myosine, cette différence dans le développement de force peut être liée au nombre de ponts croisés engagés.

La théorie de glissement des filaments (énoncée précédemment *cf partie 1.2.3*), a été étudiée en fonction du mode de contraction. [11]. Il semblerait qu'au cours d'une contraction concentrique ou isométrique, une seule des têtes de myosine soit engagée. La tension mécanique accompagnant un exercice excentrique peut quant à elle faciliter l'activation de la deuxième tête de myosine. Le nombre de ponts croisés serait alors doublé pendant l'allongement actif.

La titine semble également jouer un rôle contractile important. Cette molécule permet l'ancrage des myofilaments épais aux stries Z. Au cours d'un exercice excentrique, l'allongement de fibres semble augmenter la force, la rigidité de ce filament. Cette molécule agit comme un ressort qui assure la stabilité des sarcomères. [12]

### Au niveau des adaptations mécaniques/musculaires :

La tension mécanique est plus importante au cours d'un exercice excentrique. Elle augmente le stress métabolique au niveau du muscle, et stimule ainsi la synthèse de protéines impliquées dans la croissance musculaire. L'excentrique implique également une activation plus importante des cellules satellites. Cela favorise l'hypertrophie musculaire. [10]

Les contractions excentriques nécessitent un coût métabolique plus faible par unité de travail. Cela peut s'expliquer par une consommation moindre d'oxygène. De plus, la force d'étirement extérieure conduit à la rupture précoce de certains ponts croisés d'actine/myosine, limitant l'hydrolyse de certaines molécules d'ATP.

La méta-analyse de *Roig et al.* [9] montre que quelle que soit la vitesse des tests et de l'entraînement, l'entraînement excentrique effectué à haute intensité est associé à de plus grandes améliorations de la force totale par rapport à l'entraînement concentrique.

### Au niveau neural :

La plus grande complexité de réalisation du mouvement et la stratégie de contrôle nécessaire à sa réalisation, expliquent que l'activation corticale est plus précoce au cours d'un exercice excentrique.

L'exercice excentrique recrute préférentiellement les unités motrices à contraction rapide. Les unités motrices sont d'autant plus stimulées qu'elles sont étirées par la force dynamique de l'étirement.

L'entraînement excentrique a la propriété de bloquer certaines voies inhibitrices. En réduisant l'inhibition réciproque, il facilite l'activation de certains motoneurones et permet également d'augmenter le niveau d'activation des muscles synergiques.

Malgré les bénéfices rapportés ci-dessus, l'entraînement excentrique est à utiliser avec prudence au vu des lésions musculaires qu'il peut occasionner. La myofibrille (principalement les stries Z), le tissu conjonctif, ainsi que les protéines de liaisons peuvent être dégradées par ce type d'entraînement. La répétition des contractions musculaires excentriques dans le respect des temps de cicatrisation

aboutira à une réduction de ces dommages tissulaires, et une meilleure résistance du tissu à l'allongement.

#### En résumé :

- Une force musculaire plus élevée peut être produite lors de contractions excentriques.
- Les contractions excentriques sont plus efficaces au niveau métabolique et sont moins soumises à la fatigue.
- Les contractions excentriques peuvent provoquer des lésions des éléments contractiles.
- L'entraînement excentrique à haute intensité est plus efficace que l'entraînement concentrique pour améliorer la force totale.

## 1.4 Éducation croisée

### 1.4.1 Définition

L'éducation croisée se définit comme « l'augmentation de la force du groupe musculaire homologue **controlatéral** non entraîné à la suite d'un **entraînement de résistance unilatéral** »

Ce phénomène a été décrit pour la première fois par *Edward Wheeler Scripture, Miss Theodate L. Smith et Miss Emily Brown en 1894*. [13] Les deux participantes à l'étude étaient les deux co-auteurs. Mlle Brown a effectué, pendant 10 jours, une tâche d'entraînement en force de préhension, avec une balle en mousse dans la main droite. Mlle Smith, a effectué une tâche d'entraînement en contrôle musculaire, avec une aiguille à passer dans des trous de diamètre de plus en plus réduit sans en toucher les rebords.

Au terme de cette expérience, la force et la précision du membre supérieur droit ont été augmentées de 70% et 40% respectivement. Ce sont les bénéfices de la « pratique ».

La force et la précision du membre supérieur controlatéral non entraîné ont été améliorées de 43% et 50% respectivement. Ces effets ont été attribués à la « pratique indirecte » C'est ainsi qu'est né le terme « éducation-croisée ». [14]

Depuis cette découverte, de nombreuses études ainsi que des méta analyses ont été menées sur le sujet. *Manca et al*, à travers leur méta analyse, ont estimé que l'effet de l'entraînement en résistance unilatéral sur la force volontaire maximale du membre controlatéral était de 11,9% en moyenne. [15]

*Munn et al* ont conclu qu'en moyenne, l'entraînement unilatéral augmente de 7,8% la force volontaire maximale du groupe musculaire homologue non entraîné. [16]

**Aucune preuve directe** des mécanismes d'adaptation sous-jacents à l'éducation croisée n'a pu être validée à ce jour. De nombreuses hypothèses ont été formulées, à partir d'études scientifiques, mais aucune théorie n'a pu être scientifiquement validée pour expliquer ce phénomène.

Certains articles suggèrent que l'ampleur de l'éducation croisée dépend aussi des modalités d'entraînement et du type de contractions. D'autres, estiment que les effets sont les mêmes quel que soit le type de contraction.

Il m'a donc semblé important de clarifier ce point, d'où l'intérêt de cette revue.

### 1.4.2 Entraînement en résistance

L'entraînement en résistance se définit comme la répétition de contractions musculaires contre résistance. Ce travail permet l'accroissement de la force musculaire. La charge exigée pour fournir un stimulus d'entraînement efficace doit être supérieure aux résistances potentiellement rencontrées

dans les activités de la vie quotidienne, elle est variable d'un individu à un autre, en fonction de ses capacités physiques, et de son âge. Des adaptations **musculaires** et **neuronales** découlent de ce type d'entraînement. [6]

L'adaptation **musculaire** squelettique secondaire à un entraînement en résistance est bien connue [17] elle se traduit par :

- Une hypertrophie musculaire
- Angiogenèse permettant de maintenir les débits d'oxygène nécessaires face à l'hypertrophie
- Augmentation des activités enzymatiques musculaires
- Changement de type et d'orientation des fibres musculaires
- Augmentation de la transcription de gènes codant pour les enzymes glycolytiques

Ces manifestations n'ont pas été retrouvées du côté controlatéral non entraîné. L'imagerie par résonance magnétique n'a observé aucun changement mesurable de la circonférence du membre non entraîné, il n'y a donc pas d'hypertrophie musculaire du côté non entraîné. La biopsie n'a révélé aucune augmentation des activités enzymatiques musculaires. [18]

Ainsi, le phénomène d'éducation croisée constitue une preuve, que des adaptations **neurales** se produisent par suite d'un entraînement en résistance, puisqu'un gain de force est objectivable dans le membre opposé non entraîné

#### 1.4.3 Mécanismes [6] [19,20]

Depuis la découverte de l'éducation croisée, de nombreux scientifiques ont essayé de comprendre les mécanismes neuronaux associés à ce phénomène, en vain. Les résultats des études vont parfois à l'encontre les uns des autres. Pour l'heure, la seule certitude est que ce phénomène résulte de nombreux changements au sein du système nerveux central. L'évaluation critique des rapports de littérature existants va nous permettre d'étudier les mécanismes et adaptations neurales importants impliqués dans ce phénomène.

##### La voie pyramidale

Rappelons dans un premier temps le fonctionnement de la voie pyramidale, qui est la voie motrice principale. Elle est aussi appelée voie cortico-spinale. Elle est responsable de la motricité volontaire, en transmettant la commande motrice du cortex jusqu'à la moelle épinière.

Elle prend naissance au niveau du cortex moteur primaire, dans le lobe frontal, en formant le faisceau pyramidal. Celui-ci descend vers le tronc cérébral et la moelle épinière en passant par la capsule interne. Dans cette traversée verticale, au niveau du dernier étage du tronc cérébral, environ 85% des fibres corticospinales vont croiser la ligne médiane, et terminer leur trajet du côté opposé à l'hémisphère cérébral d'origine. C'est la décussation pyramidale, on parle de faisceau pyramidal croisé. Ainsi, chaque hémicorps est majoritairement contrôlé par l'hémisphère cérébral controlatéral.

Le reste des fibres terminera son trajet du côté ipsilatéral, c'est le faisceau pyramidal direct.

Ainsi, cette faible portion de fibres corticospinales qui ne décussent pas, pourrait avoir une implication dans le phénomène d'éducation croisée. Ces fibres corticospinales communiquent avec le motoneurone effecteur ipsilatéral, modulant ainsi l'excitabilité de la voie ipsilatérale.

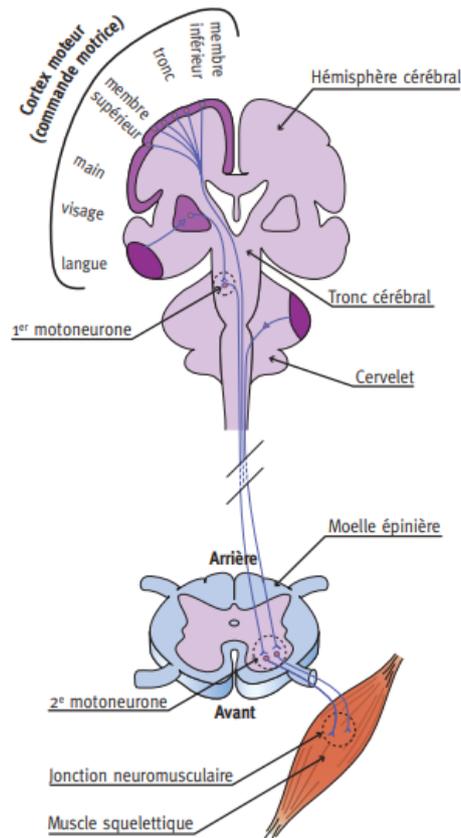


Figure 7 : Voie motrice cortico-spinale <sup>8</sup>

La neuroimagerie a montré qu'au cours d'un phénomène d'éducation croisée, la transmission neuronale le long du tractus corticospinal variait. Les mécanismes neuronaux mis en jeu au cours de l'éducation croisée ne sont pas clairement définis, les principales hypothèses étant les suivantes :

Hypothèse de l'activité corticale bilatérale, base structurelle.

La détection du flux sanguin dans les régions corticales, en réponse à une activité motrice, a prouvé que plusieurs régions cérébrales corticales étaient, structurellement et fonctionnellement, liées. Chaque structure corticale est connectée à son homologue dans l'hémisphère controlatéral, facilitant ainsi la transmission d'informations neuronales.

Pendant un entraînement unilatéral, le cortex moteur primaire s'active ainsi que le cortex prémoteur, l'aire motrice supplémentaire, l'aire motrice cingulaire. Les voies interhémisphériques sont stimulées. Cette communication inter-structurelle via la substance blanche peut être une stratégie neuronale spécifique pour le transfert de force du membre non entraîné.

*Farthing et al* ont appuyé cette hypothèse avec leur étude sur les schémas d'activation cérébrale après un entraînement en force unilatérale de 6 semaines. En plus d'une augmentation de force du membre non entraîné de 47%, ils ont mis en évidence une activation bilatérale du cortex moteur primaire dont les zones motrices supplémentaires. [21]

<sup>8</sup> [https://www.institut-myologie.org/wp-content/uploads/2015/02/systeme\\_nerveux.jpg](https://www.institut-myologie.org/wp-content/uploads/2015/02/systeme_nerveux.jpg)

### Hypothèse de réduction de l'inhibition intra corticale du cortex moteur primaire ipsilatéral.

La stimulation magnétique transcrânienne (TMS) est une technique non invasive, permettant de suivre l'activité synaptique excitatrice ou inhibitrice dans le cortex moteur primaire et le tractus corticospinal. L'excitation du cortex moteur primaire (M1) provoque un potentiel moteur évoqué (MEP). Deux éléments sont à recueillir :

- L'amplitude du MEP, qui permet de quantifier l'excitabilité corticale et l'efficacité de la conduction neuronale.
- La période de silence, qui correspond à un arrêt de l'activité électrique suite au MEP. Elle représente l'inhibition le long du tractus corticospinal.

Grâce à cette technique, plusieurs études s'accordent à dire qu'il y a une diminution de la période de silence corticospinale de quelques millisecondes. Cela signifie qu'il y a une réduction de l'inhibition intra corticale du cortex moteur primaire ipsilatéral. L'éducation croisée affecte les réseaux inhibiteurs physiologiques du cortex moteur primaire ipsilatéral, et donc du tractus cortico-spinal.

De plus, l'amplitude des MEP enregistrés été augmentée à court terme.

L'activation des motoneurones spinaux ipsilatéraux est facilitée, et la force musculaire ainsi augmentée.

### Hypothèse d'excitabilité corticospinale accrue ipsilatérale.

Certaines études ont rapporté une augmentation des MEP, ce qui signifie qu'après un entraînement en résistance, l'excitabilité corticospinale ipsilatérale serait augmentée.

D'autres chercheurs réfutent cette hypothèse, puisque leurs résultats n'ont montré aucun changement en termes d'excitabilité corticospinale ipsilatérale.

### Hypothèse de réduction de l'inhibition interhémisphérique

L'inhibition interhémisphérique est un mécanisme neurologique selon lequel un hémisphère cérébral a un pouvoir inhibiteur sur l'autre, via le corps calleux.

*Perez et Cohen* ont réalisé une étude dans laquelle des participants ont effectué 8 semaines d'entraînement unilatéral du muscle interosseux dorsal. A la fin du traitement, l'inhibition interhémisphérique du cortex moteur primaire entraîné s'est vue réduite de 31% par rapport au cortex moteur primaire non entraîné [22,23]. En revanche, d'autres études n'ont obtenu aucun effet sur l'IHI après plusieurs semaines d'entraînement unilatéral.

Il est donc impossible de conclure que l'inhibition interhémisphérique est responsable de l'éducation croisée. En revanche, si le pouvoir inhibiteur est réduit au niveau du cortex moteur primaire entraîné par rapport au cortex moteur primaire non entraîné, cela pourrait **moduler** les réponses à l'éducation croisée.

En résumé, la communication interhémisphérique (a) et les fibres corticospinales ipsilatérales (b) constituent des voies pour que la commande neurale stimule le muscle non entraîné. Le schéma ci-dessous illustre ces propos. Une activité corticospinale bilatérale se produit donc pendant un entraînement unilatéral.

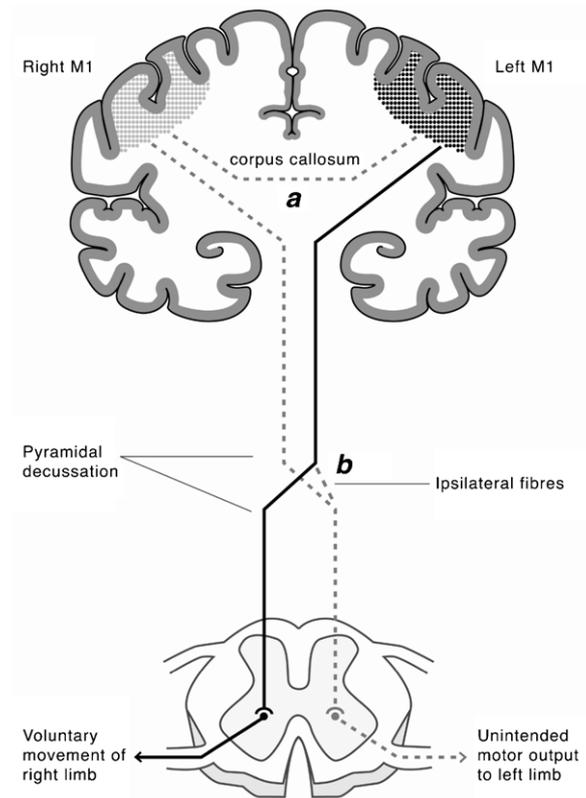


Figure 8 : représentation visuelle de l'irradiation motrice<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Hendy AM, Spittle M, Kidgell DJ. Cross education and immobilisation: mechanisms and implications for injury rehabilitation. J Sci Med Sport 2012;15:94–101.

## 2 Méthode

### 2.1 Critères d'éligibilité des études pour cette revue

#### 2.1.1 Schéma d'étude

Le schéma d'étude à sélectionner dépend essentiellement du type de question clinique. Pour rappel, les différents types de questions cliniques sont les suivants : étiologique en étudiant les facteurs de risque, thérapeutique, en étudiant l'efficacité d'une intervention ou un traitement, pronostique, en étudiant les facteurs pronostiques et enfin clinimétrique, en étudiant les outils de mesure.

Le but de cette revue est de déterminer avec quel type de contraction musculaire le transfert de force dû à l'éducation croisée est optimal. Il s'agit donc d'une revue de littérature axée sur une question thérapeutique.

Le schéma d'étude le plus approprié pour répondre à une question thérapeutique est l'essai clinique randomisé (essai contrôlé randomisé ECR), encore appelé « randomized clinical (or controlled) trial » (RCT) en anglais.

Les essais cliniques randomisés présentent un haut degré de fiabilité, ils ont pour but de comparer l'efficacité d'un traitement A par rapport à un traitement B, ou à un placebo, ou encore à l'absence de traitement, dans un échantillon de population sélectionné par des critères prédéfinis. Plusieurs groupes sont définis, en fonction du nombre de comparateurs de l'étude. L'attribution des participants dans un groupe se fait de manière aléatoire, c'est ce qu'on appelle la randomisation.

L'essai clinique randomisé peut être réalisé en double aveugle, lorsque ni le thérapeute ni le patient ne sait quel traitement est administré à quel groupe. On parle d'essai en triple aveugle lorsque l'examineur ne connaît pas non plus le traitement administré à chacun des groupes. Si tous les acteurs de l'étude sont conscients des traitements, on parle d'étude ouverte.

L'acronyme PICO, détaillé ci-dessous est utilisé en recherche pour formuler une question clinique de manière standardisée.

- P pour population : caractéristiques des participants à l'étude, critères d'inclusion ou d'exclusion.
- I pour intervention : élément/intervention dont on souhaite évaluer l'efficacité.
- C pour comparateur : description du ou des groupes de comparaison, de leurs spécificités par rapport au groupe interventionnel.
- O pour outcomes : critères de jugement dont les mesures seront utilisées pour évaluer l'efficacité de l'intervention.

#### 2.1.2 Population

La population étudiée dans cette revue est représentée par des adultes, hommes et femmes, volontaires et aptes à participer à plusieurs semaines d'entraînement musculaire **unilatéral**, d'un muscle ou groupe musculaire. Sont exclus les participants présentant des pathologies ou un entraînement intensif et récurrent du groupe musculaire étudié.

Les sujets s'engagent à ne pas réaliser d'entraînement en résistance sur les membres étudiés pendant toute la durée de l'étude. Le consentement aura été recueilli préalablement.

### 2.1.3 Intervention

L'intervention thérapeutique commune à tous les articles est l'entraînement en résistance unilatéral excentrique.

Avant que le programme d'entraînement débute, les thérapeutes ont désigné pour chaque participant quel côté serait entraîné, et quel côté serait au repos ou immobilisé en fonction des études.

Les spécificités du programme d'entraînement telles que la durée, la fréquence, le type de séance avec le nombre de répétitions, seront détaillées plus tard pour chaque étude.

### 2.1.4 Comparateur

Le but de ces études était de savoir avec quel type de contraction le transfert de force controlatéral était le plus important. Ainsi, certaines études ont comparé les effets d'éducation croisée après un programme d'entraînement excentrique (intervention) versus un programme d'entraînement réalisé par un autre mode de contraction. Certaines études ont introduit un groupe effectuant un programme de renforcement concentrique, d'autres concentrique/excentrique couplé. Certaines études incluaient également un groupe contrôle.

### 2.1.5 Critère de jugement

Le critère de jugement principal est la **force de contraction isométrique volontaire maximale : MVIC** (Maximum voluntary isometric contraction). Plusieurs outils de mesure permettent de mesurer cette force : dynamomètre portatif, dynamomètre isocinétique, cellule de charge.

## 2.2 Méthodologie de recherche des études

### 2.2.1 Sources documentaires investiguées

La recherche des articles a été investiguée dans les bases de données scientifiques suivantes : Pubmed, Cochrane Library, PEDro (Physiotherapy Evidence Database). L'interface de recherche de google appelée Google Scholar, avec ses publications du domaine des sciences médicales m'a également permis de trouver des articles pertinents pour la rédaction de cette revue de littérature. [24]

### 2.2.2 Équations de recherche utilisées

Comme énoncé précédemment, la question clinique « brute » doit être formulée de manière standardisée pour obtenir des résultats pertinents et précis. L'outil de formulation PICO (population, intervention, comparateur, outcome) est utilisé dans cette revue.

Population → Adultes, en bonne santé.

Intervention → **Entraînement en résistance unilatéral excentrique.**

Comparateur → Entraînement en résistance unilatéral réalisé avec un autre mode de contraction (**concentrique ou concentrique/excentrique couplé**).

Outcome → Force de contraction isométrique maximale (MVIC)

Pour établir l'équation de recherche, j'ai isolé de la question PICO les mots clés susceptibles de me donner les réponses les plus pertinentes. Dans un second temps, il a fallu identifier les termes MeSH correspondant à ces mots clés, afin de formuler une équation de recherche.

Mots clés en français	Mots clés traduits en anglais
Excentrique	Eccentric
Concentrique	Concentric
Entraînement en force unilatéral	Unilateral strength training

Tableau III: Mots clés de la question PICO et leur traduction anglaise.

Avec ces mots clés, les résultats étaient très insuffisants.

Cette revue vise à déterminer si l'exercice en résistance unilatéral effectué en excentrique induit un transfert de force **controlatéral** plus important que s'il était effectué avec un autre mode de contraction. Ce transfert de force vers le membre non entraîné est appelé **éducation croisée**.

Inclure ces mots clés dans l'équation de recherche était indispensable, pour obtenir des réponses plus ciblées.

En utilisant les traductions anglaises de ces différents termes, j'ai pu retenir un certain nombre d'articles intéressants, qui ne seraient pas apparus si je m'étais contentée des mots clés de la question PICO. Ainsi, les mots clés utilisés sont :

Mots clés en français	Mots clés traduits en anglais
Éducation croisée	Cross-education, contralateral effect
Excentrique	Eccentric, eccentric exercise
Concentrique	Concentric, concentric exercise
Entraînement en force unilatéral	Unilateral strength training

Tableau IV: Mots clés de la question de recherche et leur traduction anglaise.

Le choix de la syntaxe est très important pour la rédaction de l'équation de recherche, elle passe notamment par l'intermédiaire d'opérateurs booléens : AND (ET), OR (OU), NOT (SAUF).

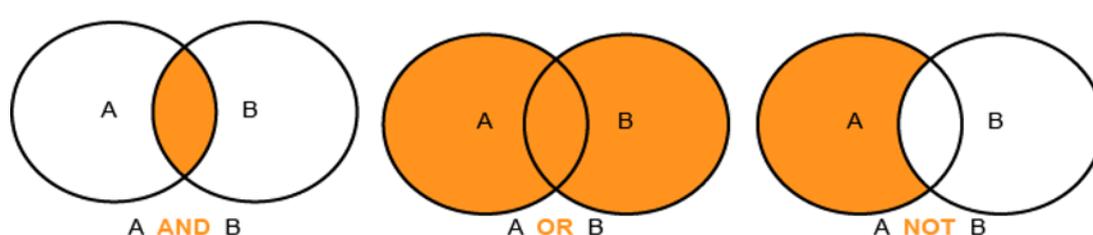


Figure 9 : Sens des mots clés avec l'utilisation des opérateurs booléens

L'agencement et l'ordre des mots avec l'utilisation des opérateurs booléens est soumise à des règles de priorité. Le premier mot mentionné est plus important que le suivant. AND est prioritaire sur OR, et NOT est prioritaire sur tout, autrement dit NOT>AND>OR.

Moteur de recherche	Équation de recherche avancée	Résultats
PubMed	((cross-education) OR (contralateral effect*)) AND ((eccentric) OR (concentric)) AND (strength)	105
Pedro	“cross-education” dans la case <i>Abstract &amp; Title</i> « strength training » dans la liste <i>therapy</i> “musculoskeletal” dans la liste <i>subdiscipline</i>	10
Cochrane	(cross-education) OR (contralateral effect) AND (strength) AND (eccentric concentric)	119

Tableau V: récapitulatif des équations de recherches utilisées

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

### 2.3.1 Sélection des études

Au total, 234 études ont été extraites via les équations de recherche. Une sélection, en plusieurs étapes permettra d'affiner la recherche.

Les différents moteurs de recherche peuvent proposer les mêmes articles. La première étape consiste donc à supprimer les doublons.

La lecture du titre ou de l'abstract permet d'effectuer un second tri, dans les articles restants. Ceux qui pourront potentiellement répondre à la problématique seront conservés.

Rien n'est figé dans le domaine des sciences médicales, chaque découverte peut potentiellement moduler les connaissances acquises jusque-là. Des articles trop anciens peuvent conclure à des résultats erronés à l'heure actuelle. J'ai ainsi décidé de ne sélectionner que des articles datant de moins de 15 ans. Une troisième étape dans la sélection des articles consistait donc à l'exclusion des articles parus avant 2007.

- **Critères d'inclusion :**

- La population étudiée est représentée par des adultes, en bonne santé.
- Le consentement libre et éclairé des participants a été recueilli, et ils s'engagent à ne pas pratiquer d'exercice physique en résistance autre que le programme d'entraînement unilatéral durant toute la durée de l'étude.
- Les études comparant un groupe expérimental dont le programme d'entraînement comprend des contractions musculaires excentriques à un autre groupe présentant toute autre modalité d'entraînement (concentrique, concentrique + excentrique).
- Le schéma d'étude est un essai clinique contrôlé randomisé, ou non randomisé.

- **Critères d'exclusion :**

- Une population mineure, ou présentant des pathologies du membre étudié.
- Des participants dont le membre étudié est impliqué dans des efforts en résistance fréquemment (sportifs, manutention).
- Tout type de traitement parallèle sur le groupe musculaire étudié.
- Les études datant de plus de 15 ans.
- Les études dont l'intégralité des données n'était pas disponible.
- Toute étude dont le score PEDro est inférieur à 3/10.
- Tout autre schéma d'étude.

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

Une lecture critique des articles scientifiques sélectionnés doit être effectuée avant de pouvoir interpréter leurs résultats. La grille de lecture critique des essais cliniques (randomisés ou non randomisés) est l'échelle PEDro. Elle permet d'évaluer la validité interne de l'étude.

Elle est composée de 11 critères méthodologiques.

1. Les critères d'éligibilité ont été précisés.
2. Répartition aléatoire dans les groupes, randomisation.
3. Assignment secrète.
4. Similarité des groupes au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants.
5. Sujets « en aveugle ».
6. Thérapeutes « en aveugle ».
7. Examineurs « en aveugle » pour au moins un des critères de jugement essentiels.
8. Suivi optimal des participants (Mesures obtenues pour au moins un des critères de jugement essentiels d'au moins 85% des sujets).
9. Analyse en intention de traiter.
10. Comparaisons statistiques intergroupes indiquées pour au moins un des critères de jugement essentiels.
11. Estimation des effets et estimation de leur validité pour au moins un des critères de jugement essentiels.

En *annexe 1*, se trouvent les détails de validation de ces critères méthodologiques.

À la fin de la lecture critique, une note allant de 0 à 10 est attribuée à l'article. Plus le score obtenu est faible, plus l'article est susceptible d'entraîner des difficultés d'interprétation à cause du haut risque de biais. Un score élevé signifie que la qualité de construction de l'étude est correcte, mais il ne permet pas d'affirmer avec certitude que la conclusion de l'étude est cliniquement pertinente.

### 2.3.3 Extraction des données

Pour synthétiser au mieux les informations clés de chaque article, l'extraction des données se fera sous forme de tableau, où seront mentionnées les informations suivantes :

- Article : titre, auteurs, date de publication de l'étude.
- Design de l'étude : schéma d'étude, but de l'étude, et score sur l'échelle PEDro.
- Population : Spécificités (sexe, âge), critères d'inclusion, nombre de participants inclus dans l'étude et leur répartition dans les différents groupes.

- Intervention : Spécificités du programme d'entraînement unilatéral excentrique (durée, nombre de séances, fréquence d'entraînement) et ses modalités d'application (séance type, nombre de répétitions, matériel).
- Comparateur(s) : type de traitement (entraînement/repos/immobilisation) et ses modalités d'application (durée, séance type, fréquence).
- Critères de jugements (principal et secondaires).
- Résultats de l'intervention sur le critère de jugement principal.

Lorsque les études n'avaient pas pour seul objectif de comparer les différentes modalités de contractions sur le transfert de force par éducation croisée, l'objectif secondaire a été mentionné à la suite des tableaux récapitulatifs. Certaines précisions ont été apportées pour optimiser la compréhension de chaque étude.

## 2.4 Méthode de synthèse des résultats

Les étapes de sélection des articles pour cette revue seront détaillées dans un diagramme de flux dans la partie 3 *résultats*. Les raisons d'exclusion de certaines études seront précisées.

Les études incluses et leurs caractéristiques seront détaillées dans le tableau présenté ci-dessus.

Avant de pouvoir interpréter les résultats, les risques de biais seront évoqués pour chaque étude, grâce à la note sur l'échelle PEDro, et l'interprétation de chaque item non validé.

Pour analyser les résultats obtenus, chaque étude sera décrite qualitativement.

Souvent, la formulation des conclusions dans les articles surestime les résultats obtenus, c'est ce qui s'appelle le SPIN. Afin de limiter les erreurs d'interprétation, les résultats et non les conclusions des études seront analysés.

Le but de la revue de littérature est de déterminer l'efficacité d'une intervention (le travail musculaire excentrique) sur le transfert de force controlatéral, en comparaison avec d'autres groupes expérimentaux. L'efficacité de cette intervention est représentée par la différence inter-groupe du critère de jugement utilisé.

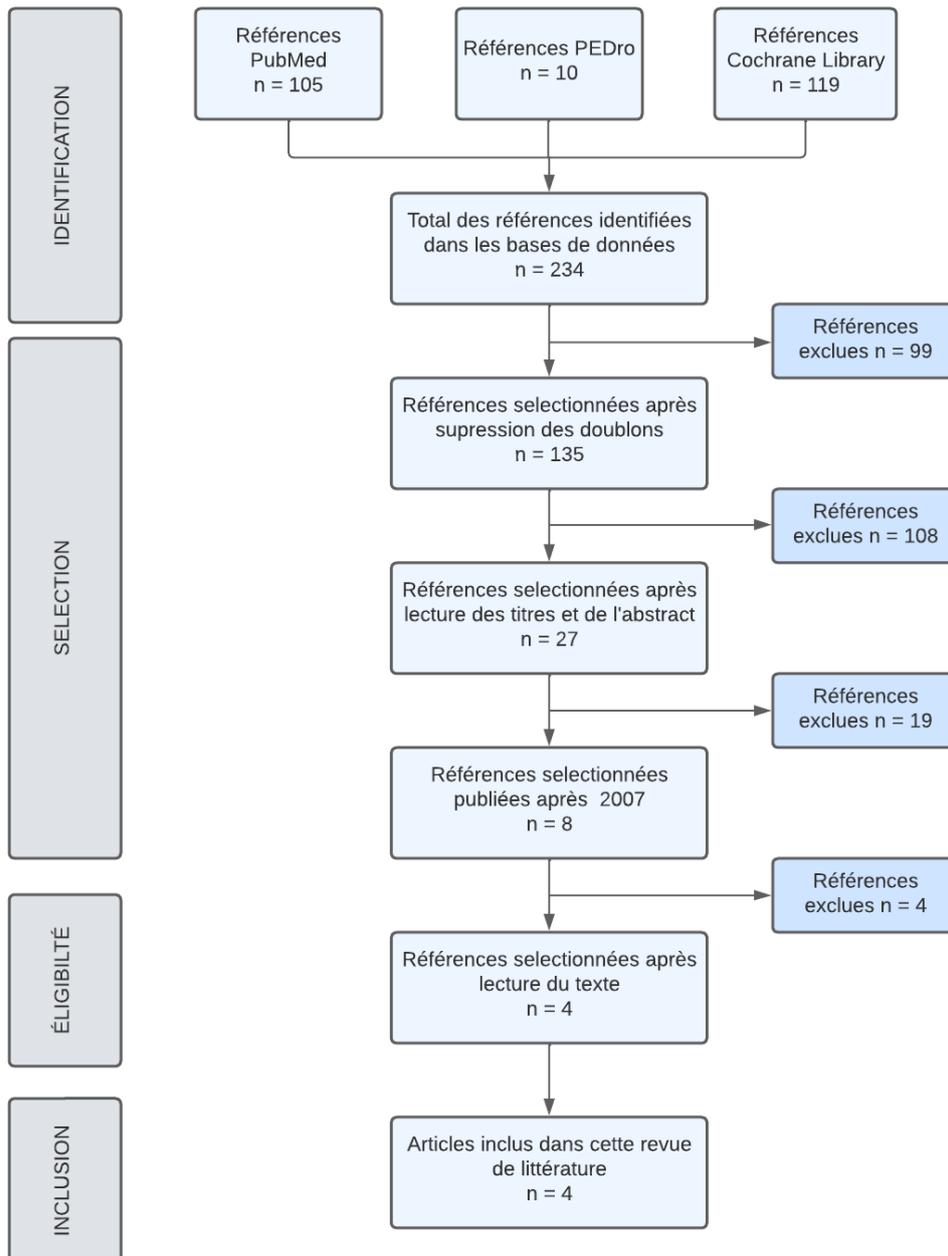
Les intervalles de confiance à 95% (IC95), p value (p), moyennes et écart-type, et taille d'effet seront extraits de chaque article et présentés sous forme de tableau, lorsque ces données seront disponibles. Le caractère statistiquement significatif des résultats sera essentiel pour leur interprétation clinique.

### 3 Résultats

#### 3.1 Description des études

##### 3.1.1 Diagramme de flux

La méthodologie de recherche des études est présentée sous forme de diagramme de flux, ci-dessous.



### 3.1.2 Études exclues

Les études suivantes ont été exclues à l'issue de la lecture complète du texte. Le motif d'exclusion est précisé dans le tableau ci-dessous.

Étude exclues	Motif d'exclusion
<b><i>Lepley et al. (2014)</i></b> [25]	Critère de jugement principal non évalué dans l'étude.
<b><i>Chen et al. (2016)</i></b> [26]	Le comparateur utilisé dans l'étude n'est pas celui recherché dans cette revue. Le transfert de force controlatéral est évalué ici en fonction du <u>temps d'intervalle</u> entre chaque séance de renforcement, et non en fonction de la contraction musculaire utilisée.
<b><i>Andrushko et al. (2018)</i></b> [27]	Le seul comparateur est le groupe témoin. Le but de la revue étant de comparer les effets du travail excentrique par rapport à d'autres modes de contraction sur le transfert de force, cet article n'était pas très pertinent.
<b><i>Harput et al. (2019)</i></b> [28]	La population incluse présente une pathologie de l'articulation étudiée, par reconstruction du ligament croisé antérieur du genou.

Tableau VI : Études exclues et raisons d'exclusion.

### 3.1.3 Études incluses

Le tableau récapitulatif suivant présente de manière synthétique et organisée les informations essentielles à la compréhension de chaque article.

Pour les études à double objectif ; un bref résumé est disponible à la suite du tableau récapitulatif, avec les informations nécessaires à la compréhension de la méthodologie de l'étude.

La population incluse, dans chaque article, présente les caractéristiques suivantes :

- Participants majeurs et en bonne santé, le consentement éclairé a été recueilli.
- Profil sédentaire, pas de pratique sportive ou d'exercices en résistance réguliers au cours des derniers mois (période propre à chaque étude).
- Ils se sont engagés à s'abstenir de tout entraînement en résistance des membres étudiés en dehors de l'étude et à maintenir leur routine habituelle, que ce soit au niveau de l'activité physique ou de l'alimentation.

Étude	Design de l'étude	Participants	Intervention	Comparateur	Critères de jugement	Résultats
<p><i>Contralateral Effects by Unilateral Eccentric versus Concentric Resistance Training</i></p> <p><b><u>Tseng et al. (2020) [29]</u></b></p>	<p><u>Schéma d'étude</u> : Essai clinique non randomisé</p> <p><u>But</u> : Comparer les effets de l'entraînement excentrique unilatéral et de l'entraînement concentrique des fléchisseurs de coude sur le transfert de force controlatéral par éducation croisée.</p> <p><u>Score PEDro</u> : 3/10</p>	<p>48 hommes sédentaires et en bonne santé, répartis en 4 groupes (n=12) en fonction de leur MVIC de base. Seuls deux groupes seront étudiés dans cette revue : Groupe ET (eccentric training) Groupe CT (concentric training)</p> <p><u>Âge</u> : 23,2 ± 2,5 ans.</p> <p><u>Critères d'inclusion</u> : Pas de lésions musculosquelettiques des membres supérieurs, ni d'exercice en résistance régulier sur la dernière année.</p>	<p><u>Groupe ET</u> : programme d'entraînement en résistance <b>excentrique</b> unilatéral des fléchisseurs de coude, 1 fois par semaine pendant 5 semaines (soit 5 séances).</p> <p>4 secondes de contraction, passant de coude fléchi (90°) à coude tendu (0°) avec haltère.</p> <p>5 séries x 6 répétitions.</p> <p>La charge a été augmentée progressivement chaque semaine.  S1 →10%  S2 →30%  S3 →50%  S4 →80%  S5 →100% de la MVIC (réévaluée chaque semaine).</p>	<p><u>Groupe CT</u> : même programme d'entraînement avec comme seule variable la modalité de contraction : ici <b>en concentrique</b>.</p>	<p><b>MVIC (maximal voluntary isometric contraction)</b></p> <p>Amplitude de mouvement (ROM), circonférence du bras, douleur musculaire, activité plasmatique de la créatine kinase (CK).</p> <p>Mesures effectuées avant, immédiatement après, à J1, 2, 3 après chaque séance, et de J1 à J5 après la dernière séance.</p>	<p>Augmentation du couple MVIC (<math>p &lt; 0,05</math>) ; <u>ET</u> ; bras entraîné (19%±8%), bras non entraîné (<b>11%±5%</b>) ; <u>CT</u> ; bras entraîné (10%±6%), bras non entraîné (<b>5%±2%</b>)</p> <p><b>La force maximale isométrique des fléchisseurs de coude non entraînés a augmenté davantage pour le groupe excentrique que pour le groupe concentrique.</b></p>

<p><i>Contralateral Effects of Eccentric Resistance Training on Immobilized Arm</i></p> <p><b><u>Valdes et al. (2021) [30]</u></b></p>	<p><b>Schéma d'étude :</b> Essai clinique randomisé</p> <p><b>But :</b> Comparer les effets de l'entraînement en résistance excentrique unilatéral et concentrique/excentrique couplé des fléchisseurs du coude sur le bras immobilisé.</p> <p><b>Score PEDro :</b> 4/10</p>	<p>30 hommes et femmes répartis aléatoirement en trois groupes (n=10) : CTRL (contrôle) ECC (excentrique) CON-ECC (concentrique et excentrique)</p> <p><b>Âge :</b> 24,3 ± 3,5 ans.</p> <p><b>Critères d'inclusion :</b> Pas de pathologie des membres supérieurs, ni d'entraînement en résistance sur la dernière année.</p>	<p>Chaque groupe a subi une immobilisation du bras non dominant de 4 semaines.</p> <p><b>Groupe ECC :</b> programme d'entraînement en <b>excentrique</b>. 3 fois par semaine pendant 4 semaines (12 séances).</p> <p>4 secondes de contraction excentrique (de 135° de flexion de coude à l'extension complète).</p> <p>Semaine 1 à 4 :</p> <table border="1" data-bbox="1003 946 1272 1198"> <thead> <tr> <th colspan="2">ECC</th> </tr> <tr> <th>Set × Rep</th> <th>Intensity % CON 1-RM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3 × 10</td> <td>80%</td> </tr> <tr> <td>4 × 10</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>4 × 10</td> <td>110%</td> </tr> <tr> <td>4 × 10</td> <td>120%</td> </tr> </tbody> </table>	ECC		Set × Rep	Intensity % CON 1-RM	3 × 10	80%	4 × 10	100%	4 × 10	110%	4 × 10	120%	<p><b>Groupe CTRL :</b> uniquement l'immobilisation.</p> <p><b>Groupe CON-ECC :</b> programme d'entraînement <b>concentrique + excentrique</b>. 2 secondes de contraction concentrique + 2 secondes de contraction excentrique dans les mêmes amplitudes que ECC.</p> <p>Semaine 1 à 4 :</p> <table border="1" data-bbox="1321 946 1568 1198"> <thead> <tr> <th colspan="2">CON-ECC</th> </tr> <tr> <th>Set × Rep</th> <th>Intensity % CON 1-RM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4 × 10</td> <td>60%</td> </tr> <tr> <td>6 × 10</td> <td>70%</td> </tr> <tr> <td>6 × 10</td> <td>80%</td> </tr> <tr> <td>6 × 10</td> <td>90%</td> </tr> </tbody> </table>	CON-ECC		Set × Rep	Intensity % CON 1-RM	4 × 10	60%	6 × 10	70%	6 × 10	80%	6 × 10	90%	<p><b>MVIC (maximal voluntary isometric contraction)</b></p> <p>Circonférence du bras, force 1-RM concentrique, activité musculaire par sEMG, taux de développement de la force (RFD), sens de la position articulaire du coude.</p> <p>Mesures effectuées entre 48 et 72h pré et post immobilisation.</p>	<p>La force MVIC du bras immobilisé après l'intervention était plus élevée pour le groupe ECC (p=0,009) et pour CON-ECC (p&lt;0,001) que pour le groupe contrôle.</p> <p><b>En moyenne, la force isométrique a augmenté davantage pour le groupe ECC (+12,7%) que pour le groupe CON-ECC (pour qui la moyenne est restée inchangée).</b></p>
ECC																														
Set × Rep	Intensity % CON 1-RM																													
3 × 10	80%																													
4 × 10	100%																													
4 × 10	110%																													
4 × 10	120%																													
CON-ECC																														
Set × Rep	Intensity % CON 1-RM																													
4 × 10	60%																													
6 × 10	70%																													
6 × 10	80%																													
6 × 10	90%																													

<p><i>Cross-education and detraining effects of eccentric vs. concentric resistance training of the elbow flexors</i></p> <p><b><u>Sato et al. (2021) [31]</u></b></p>	<p><u>Schéma d'étude</u> : Essai clinique randomisé</p> <p><u>But de l'étude</u> : Comparer les effets d'un entraînement excentrique par rapport à un entraînement concentrique sur l'ampleur et la durabilité du phénomène d'éducation croisée.</p> <p><u>Score PEDro</u> : 6/10</p>	<p>31 participants, hommes et femmes, répartis aléatoirement en 3 groupes : ET (eccentric training, n=9) CT (concentric training, n=9) Témoin (n=13)</p> <p><u>Âge</u> : 21,5 ± 1,5</p> <p><u>Critères d'inclusion</u> : Pas de pathologie du membre supérieur, pas d'exercice en résistance ou de sports de compétition au cours des 6 derniers mois.</p>	<p><u>Groupe ET</u> : Programme d'entraînement en résistance <b>excentrique</b> unilatéral des fléchisseurs de coude, 2 fois par semaine pendant 5 semaines (soit 10 séances).</p> <p>Contraction excentrique de la flexion de coude à 90° à l'extension complète, avec haltère. 6 séries x 5 contractions.</p> <p>La charge a été augmentée progressivement chaque semaine.  S1 →10%  S2 →30%  S3 →50%  S4 →80%  S5 →100% de la MVIC.  (Idem que dans l'étude n°1 Tseng et al)</p>	<p><u>Groupe témoin</u> : aucun entraînement.</p> <p><u>Groupe CT</u> : même programme que pour le groupe ET, mais en contraction <b>concentrique</b> (partant d'une légère flexion de coude de 5° à 90° de flexion avec haltère).</p>	<p><b>MVIC (maximal voluntary isometric contraction)</b></p> <p>Force maximale concentrique à une répétition (1-RM), épaisseur du biceps brachial.</p> <p>Douleur musculaire des fléchisseurs.</p> <p>Mesures effectuées avant le début du programme, et de J+3 à J+9 après la dernière séance d'entraînement.</p>	<p>Groupe témoin : pas de changement significatif du MVIC avant et après le programme d'entraînement.</p> <p><b>En moyenne, la force MVIC des fléchisseurs de coude non entraînés a augmenté de 22,7% dans le groupe excentrique (ET), et de 12,2% dans le groupe concentrique (CT).</b></p>
--	---	--	---	--	--	--

<p><i>The Eccentric Phase in Unilateral Resistance Training Enhances and Preserves the Contralateral Knee Extensors Strength Gains After Detraining in Women</i></p> <p><b><u>Coratella et al. (2022)[32]</u></b></p>	<p><u>Schéma d'étude</u> : Essai Clinique randomisé en parallèle en 4 groupes.</p> <p><u>But de l'étude</u> : Comparer différents modes de contractions au sein de programmes d'entraînement en résistance unilatéral des extenseurs de genou sur les gains de force controlatéraux.</p> <p><u>Score PEDro</u> : 6/10</p>	<p>60 femmes réparties en 4 groupes :</p> <p>CONC (concentrique) ECC (excentrique) TRAD (concentrique couplé à excentrique) CON (contrôle)</p> <p><u>Âge</u> : 22 ± 4 ans</p> <p><u>Critères d'inclusion</u> : Pas d'entraînement en résistance des extenseurs du genou au cours des 6 derniers mois, pas de pathologie du membre inférieur, pas de consommation de substances/médicaments.</p>	<p><u>Groupe ECC</u> : programme d'entraînement <b>excentrique</b> des extenseurs de genou côté dominant, sur 8 semaines : Semaine 1 = 1 séance, Semaines 2 à 8 = 2 séances (soit 15 séances).</p> <p>1,5 secondes de contraction sur leg extension avec résistance. 5 séries x 6 répétitions à 120% de la 1-RM.</p>	<p><u>Groupe CON</u> : pas d'entraînement en résistance.</p> <p>Pour égaliser le volume d'entraînement entre les groupes, le nombre de répétitions et la charge ont été adaptés pour chaque groupe.</p> <p><u>Groupe CONC</u> : même programme que pour ET, mais en contraction <b>concentrique</b> 6séries x 7 répétitions à 85% de la 1-RM.</p> <p><u>Groupe TRAD</u> : même programme que pour ET, mais chaque répétition est composée <b>d'une phase concentrique et une phase excentrique</b> 4 séries x 5 répétitions à 90% de la 1-RM.</p>	<p><b>MVIC (maximal voluntary isometric contraction)</b></p> <p>Couple maximal isocinétique concentrique et excentrique, épaisseur du vaste latéral.</p> <p>Variations du couple maximal de pointe isométrique des extenseurs de genou non entraînés :</p> <p>Groupe contrôle (CON) et concentrique (CONC) : aucun changement significatif.</p> <p>Groupe ECC : augmentation de <b>11,3%</b> (+5,8/16,8)</p> <p>Groupe TRAD : augmentation de 8,6% (+3,4/13,7)</p> <p><b>La hausse du couple MVIC la plus importante a été enregistrée dans le groupe excentrique (ET).</b></p>
---	---	---	--	---	---

Tableau VII : Synthèse des études incluses.

### **Tseng et al. (2020) [29]**

Cette étude a été menée dans le but de déterminer :

- Les effets controlatéraux de l'entraînement en résistance unilatéral excentrique versus concentrique sur le transfert de force controlatéral. La comparaison des groupes expérimentaux « ET » et « CT » permet d'évaluer ce critère.
- L'ampleur des dommages musculaires des fléchisseurs de coude après un exercice excentrique maximal. Les quatre groupes expérimentaux : ET, CT, CL-RB (exercice excentrique répété controlatéral) et IL-RB (exercice excentrique répété ipsilatéral) permettent d'évaluer ce deuxième critère. C'est pour cette raison que les deux groupes CL-BR et IL-BR n'ont pas été étudiés dans cette revue.

Cet essai clinique n'était pas randomisé, les participants ont été placés dans chaque groupe en fonction de la valeur du couple maximal de base (MVIC), de façon à avoir un équilibre de base entre les groupes.

### **Sato et al. (2021) [31]**

Cet essai clinique randomisé présente deux buts :

- Comparer les effets d'un entraînement en résistance unilatéral excentrique (ET) et concentrique (CT) des fléchisseurs de coude sur la force et l'épaisseur musculaire des bras entraînés et non entraînés.
- Comparer avec quel groupe les adaptations produites par l'entraînement en résistance sont maintenues le plus longtemps après une période de désentraînement.

Afin d'évaluer la deuxième condition, les trois groupes de l'étude ont été soumis à une période de désentraînement après la dernière séance du programme d'entraînement. Il consistait à ne réaliser aucune activité en résistance des fléchisseurs de coude pendant 5 semaines. À la suite de cette période, les variables dépendantes ont de nouveau été mesurées, et comparées aux données en post-intervention.

### **Coratella et al. (2022)[32]**

Cet essai clinique randomisé visait à :

- Comparer les effets de différents protocoles d'entraînement en résistance unilatéral (concentrique seul, excentrique seul, concentrique/excentrique couplé) sur le transfert de force controlatéral par éducation croisée.
- Comparer le maintien des effets produits par éducation croisée dans le temps entre les différents groupes après une période de désentraînement.

### 3.2 Risque de biais des études incluses

La notion de biais peut être définie par « *une erreur systématique qui est non aléatoire, et qui induit une déviation orientée (dans un sens ou dans un autre) de la vérité, des résultats et/ou des déductions. Il peut être présent à différents endroits d'une étude et est rarement unique* ».

La qualité méthodologique d'une étude est directement impactée par les biais qu'elle comporte. Il est donc nécessaire d'analyser les biais contenus dans chacune des études, avant de pouvoir en interpréter les résultats.

Une des échelles permettant d'évaluer de la qualité méthodologique des essais cliniques randomisés et non randomisés, pour une question thérapeutique, est l'échelle PEDro. Comme évoqué précédemment, elle est composée de 11 items. (*cf partie 2.3.2*)

- Le premier critère est relatif à la **validité externe** de l'étude. Il renseigne sur la population incluse dans l'étude, mais il n'est pas comptabilisé dans le score total.
- Les critères 2 à 9 servent à évaluer la **validité interne**.
- Les critères 10 et 11 représentent la **pertinence clinique** de l'étude, ils évaluent si l'étude est composée de suffisamment d'informations statistiques pour permettre une interprétation convenable des résultats.

Items Articles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Score
<b><u>Tseng et al.</u></b> <b>(2020)</b>	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	3/10
<b><u>Valdes et al.</u></b> <b>(2021)</b>	✓	✓	x	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	4/10
<b><u>Sato et al.</u></b> <b>(2021)</b>	✓	✓	x	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	6/10
<b><u>Coratella et al.</u></b> <b>(2022)</b>	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	✓	✓	✓	6/10

Tableau VIII : Synthèse des biais présents dans les études incluses, d'après l'échelle PEDro.

Pour chaque étude, les biais potentiellement rencontrés en fonction des items sont les suivants :

- Les biais de sélection, correspondant aux **items 2 à 4**. Ces critères nous aident à déterminer si les sujets ont été répartis de manière aléatoire dans les différents groupes (randomisation), si cette répartition a été maintenue secrète (assignation secrète), et si les groupes étaient similaires avant l'intervention thérapeutique (comparabilité). Cela permet d'éliminer toute asymétrie initiale entre les différents groupes expérimentaux/contrôle et de permettre une analyse correcte des résultats.
  - Les participants de l'étude de **Tseng et al.** ont été répartis dans chaque groupe en fonction de la valeur de base du couple MVIC des fléchisseurs de coude, ainsi l'item 2 ne peut pas être validé. L'assignation secrète des participants dans chaque groupe n'a pas été

mentionné dans les études de **Tseng et al.**, **Valdès et al.** et **Sato et al.** le critère 3 n'a pas été validé. Ces trois études comportent un biais de sélection, majoré pour celle de **Tseng et al.**

- Les biais de performance, correspondant aux **items 5 et 6**. Ces critères correspondent à la mise en aveugle des sujets, et des thérapeutes. Un sujet est considéré « en aveugle » uniquement s'il n'est pas à même de faire la distinction entre les traitements appliqués aux différents groupes. (cf échelle PEDro en *annexe 1*)
  - Aucune des études ne peut remplir ce critère, étant donné que la nature de l'intervention est un programme de contraction musculaire. Dans le cas où l'étude inclut un groupe témoin, il ne sera pas possible de cacher aux participants si l'intervention est utilisée ou non. Dans le cas où l'étude inclut plusieurs groupes expérimentaux, rien ne peut garantir que les participants ne sont pas à même de distinguer les différentes modalités de contraction. Toutes les études comportent un biais de performance.
  
- Les biais de détection, correspondant à l'**item 7**. Ce critère renseigne sur la mise en aveugle des examinateurs.
  - Aucune étude n'a mentionné l'aveuglement des examinateurs, elles comportent toutes un biais de détection.
  
- Les biais de suivi, correspondant à l'**item 8**. Ce critère renseigne sur le nombre de participants « perdus de vue » au cours de l'étude, pour lesquels les résultats n'ont pas été obtenus. L'échelle PEDro considère qu'il y a un risque de biais à partir de 15% de sorties entre le nombre initial de participants et le nombre final.
  - Seule l'étude de **Sato et al** mentionne le nombre de participants pour lesquels les résultats ont été obtenus. Aucune des autres études ne mentionne explicitement ce critère, que ce soit dans le texte, dans les figures ou dans les tableaux des résultats. Les trois autres études comportent un biais de suivi.
  
- Les biais d'attrition, correspondant à l'**item 9**. Ce critère permet de vérifier que toutes les données relatives à un sujet ont été analysées « en intention de traiter »
  - Les études de **Tseng et al** et **Valdès et al** ne mentionnent pas ce critère, elles comportent donc un biais d'attrition.
  
- Les biais de mesure, correspondant aux **items 10 et 11**. Ces critères sont validés si l'étude contient suffisamment d'informations statistiques dans les résultats, pour évaluer les différences inter-groupe, l'estimation de la taille d'effet et la variabilité potentielle des résultats.
  - Toutes les études incluses remplissent ces critères.

	Sélection	Performance	Détection	Suivi	Attrition	Mesure
<b>Tseng et al. (2020)</b>	X	X	X	X	X	
<b>Valdes et al. (2021)</b>	X	X	X	X	X	
<b>Sato et al. (2021)</b>	X	X	X			
<b>Coratella et al. (2022)</b>		X	X	X		

Tableau IX : Synthèse des biais présents dans chaque article.

### 3.3 Effets de l'intervention sur le critère de jugement

#### 3.3.1 Critère de jugement principal : la force volontaire maximale isométrique MVIC

Le but de cette revue de littérature est d'analyser l'efficacité du travail musculaire excentrique dans l'éducation-croisée. Pour étudier l'ampleur du transfert de force controlatéral, le critère de jugement principal est la force maximale de contraction isométrique volontaire (MVIC).

Les études incluses n'utilisent pas toutes le même outil de mesure du critère de jugement principal, ce qui peut induire un biais de mesure.

- Dans l'étude de **Sato et al. [31]**, ils utilisent un dynamomètre portatif.
- Dans les études de **Tseng et al. [29]** et de **Coratella et al**, ils utilisent un dynamomètre isocinétique.
- Dans l'étude de **Valdès et al. [30]**, ils ont utilisé une cellule de charge. Une cellule de charge est un capteur électromécanique utilisé pour mesurer une force ou un poids.

Les résultats, détaillés ci-dessous, indépendamment les uns des autres, seront comparés dans la mesure du possible dans la discussion.

L'analyse des résultats consiste à déterminer si les différences observées entre les groupes après application des programmes d'entraînement sont significatives ou non. La **valeur p** détermine le caractère statistiquement significatif d'un résultat. Lorsque  $p < 0,05$  cela indique que les résultats sont statistiquement significatifs, c'est-à-dire qu'il y a moins de 5% de risques que le résultat observé soit dû uniquement au hasard et 95% de chances qu'il soit dû à l'intervention étudiée. En revanche, si la valeur  $p > 0,05$ , les résultats ne seront pas considérés comme significatifs, car il y aura alors trop de risques qu'ils soient liés au hasard.

L'**intervalle de confiance à 95%** est une plage de valeurs, construite à partir d'un échantillon de données statistiques. Il représente la marge d'erreur avec laquelle les résultats obtenus peuvent être extrapolés à une population plus large. Un intervalle de confiance de 95 % signifie qu'il y a une probabilité de 95 % que la caractéristique de la population se situe dans l'intervalle de confiance. L'intervalle de confiance est influencé par l'écart-type et par la taille de l'échantillon.

La **taille d'effet** est une mesure statistique qui permet de quantifier l'importance d'une différence entre des variables. Elle est utilisée pour indiquer si une différence ou une relation est statistiquement significative, si elle a une importance concrète dans le contexte de l'étude.

Pour chaque article, seront mentionnés les données suivantes :

- La fiabilité test retest ; elle permet de vérifier la fiabilité de l'outils de mesure, ce qui renforce la validité des résultats de recherche obtenus à partir de ces instruments.
- Seuil de significativité considéré par les auteurs.
- Valeur p value
- Moyenne  $\pm$  écart-type
- Taille d'effet (calculée à partir d'un tableur excel)
- Intervalle de confiance à 95%

L'efficacité de l'intervention est représentée par la différence inter-groupe du critère de jugement principal, à un temps défini (post-intervention).

### 3.3.1.1 Étude numéro 1 : TSENG et al.

Cette étude a comparé les effets de l'entraînement en résistance unilatéral excentrique (ET) et concentrique (CT) des fléchisseurs de coude sur la force maximale isométrique du groupe musculaire homologue non entraîné.

La valeur du critère de jugement principal, mesurée avant le début de l'intervention dans les deux groupes, représente pour chacun la ligne de base. Les mesures ont ensuite été effectuées immédiatement après, à J1, J2, J3 après chaque séance, et à J1, J2, J3, J4 et J5 après la dernière séance par un dynamomètre isocinétique.

- La fiabilité test-retest, basée sur le coefficient de corrélation intra classe et le coefficient de variation est de 0,84% et 9,9% pour le critère de jugement principal, ce qui représente une fiabilité test-retest élevée (>0,75).
- Le seuil de significativité des résultats a été fixé à  $p < 0,05$ .

Pour chaque groupe, l'augmentation moyenne de force maximale isométrique a été donnée en pourcentage, entre les périodes pré et post intervention. Les écart types correspondants ont été mentionnés, toutes les données se trouvent dans le tableau suivant :

Fléchisseurs de coude	Outcome	p value	Groupe	Moyenne ± écart type	Différence inter-groupe (IC à 95%)
Entraînés	MVIC (%)	$p < 0,05$	ET	19 ± 8	9 (3,01 ; 14,99)
			CT	10 ± 6	
Non entraînés	MVIC (%)	$p < 0,05$	ET	11 ± 5	6 (2,78 ; 9,22)
			CT	5 ± 2	

Tableau X : Extraction des résultats de l'étude de Tseng et al.

L'augmentation du couple MVIC est plus marquée ( $p < 0,05$ ) pour le bras entraîné que pour le bras non entraîné, dans les deux groupes. Les valeurs sont plus élevées pour le groupe excentrique que pour le groupe concentrique, que ce soit sur le bras entraîné ou non entraîné, ce qui montre que ce type de contraction permet un gain de force isométrique plus important, par action directe sur le bras entraîné ou par transfert de force controlatéral.

La taille d'effet de l'intervention sur le **membre non entraîné**, exprimée par l'augmentation de la force MVIC en post-intervention, est de 6 (2,78 ; 9,22). Autrement dit, l'exercice excentrique unilatéral engendre une hausse moyenne de la force MVIC du groupe musculaire non entraîné de 6% de plus que l'exercice concentrique. L'intervalle de confiance à 95%, permettant d'extrapoler cette différence à la population générale, indique que l'exercice excentrique pourrait augmenter la force MVIC du groupe musculaire non entraîné de 2,78 à 9,22 % de plus que l'exercice concentrique.

L'ampleur de l'augmentation entre le bras entraîné et le bras non entraîné paraît similaire entre les groupes. Que ce soit en excentrique ou en concentrique, la hausse du couple MVIC des bras non entraînés était d'environ 50% de celle des bras entraînés.

Ces résultats, statistiquement significatifs, permettent d'avancer que **le gain de force isométrique des fléchisseurs de coude non entraînés est plus important lorsque le programme d'entraînement unilatéral est réalisé en excentrique.**

### 3.3.1.2 Étude numéro 2 : Valdès et al.

Le but de cet essai clinique randomisé était de déterminer les effets de l'entraînement unilatéral excentrique (ECC) versus l'entraînement concentrique/excentrique (CON-ECC) des fléchisseurs de coude sur le bras immobilisé.

Le critère de jugement principal a été mesuré 72 heures avant et 72 heures après l'intervention, avec une cellule de charge.

- La fiabilité test-retest de mesure des variables dépendantes est représentée par le coefficient de corrélation intraclass (ICC) et le coefficient de variation (CV). Pour les mesures de la force maximale isométrique volontaire (MVIC), cette fiabilité est excellente (ICC : 0.97, CV : 2.2%).
- La signification statistique a été fixée à  $p \leq 0,05$ .

Un effet d'interaction significatif (groupe x temps) a été constaté pour les changements de force MVIC, des bras immobilisés et non immobilisés ( $p < 0,001$ ). Cela signifie que l'effet du temps sur les changements de force MVIC diffère selon les groupes (groupe contrôle, groupe excentrique ECC et groupe concentrique/excentrique CON-ECC). Les différences observées entre les groupes en fonction du temps sont très probablement dues aux facteurs spécifiques de chaque groupe (ici les modalités de contraction) puisque  $p < 0,001$ .

#### Analyse intra-groupe :

Les données recensées en post-intervention sont figurées dans le tableau ci-dessous.

Fléchisseurs de coude	Outcome	Groupe	Moyenne $\pm$ Écart-type pré-intervention	Moyenne $\pm$ Écart-type post-intervention
Entraînés	Force MVIC (Newton)	CTRL	260,3 $\pm$ 90,4	245,4 $\pm$ 75,7
		CON-ECC	283,9 $\pm$ 105,5	314,5 $\pm$ 97,5 *
		ECC	251,0 $\pm$ 99,2	303,5 $\pm$ 114,8*
Immobilisés	Force MVIC (Newton)	CTRL	<b>266,6 <math>\pm</math> 79,5</b>	<b>209,1 <math>\pm</math> 67,8</b>
		CON-ECC	<b>288,7 <math>\pm</math> 115,0</b>	<b>271,0 <math>\pm</math> 73,6</b>
		ECC	<b>239,9 <math>\pm</math> 90,2</b>	<b>267,9 <math>\pm</math> 97,0*</b>

Tableau XI : Résultats intra-groupe de l'étude de Valdès et al.

\* Différence significative entre le départ et après l'immobilisation.

Peu des données du tableau sont statistiquement significatives. Néanmoins, il est possible de conclure que :

- Pour le bras entraîné : La force maximale isométrique a significativement augmenté dans les groupes CON-ECC et ECC après le programme d'entraînement (avec une augmentation plus importante dans le groupe ECC).
- Pour le bras immobilisé : La force maximale isométrique a significativement augmenté uniquement dans le groupe ECC.

#### Analyse inter-groupes :

Au sein de chaque groupe, l'augmentation moyenne de la force maximale isométrique entre la période pré et post intervention, a également été exprimée en pourcentage.

Fléchisseurs de coude	Outcome	p value	Groupe	Moyenne ± écart type	Différence inter-groupe (IC 95%)
Entraînés	MVIC (%)	p = 0,08	CTRL	-3,9 ± 12,3	/
		p = 0,009	CON-ECC	13,7 ± 9,3	7,2 (-2,68 ; 17,08)
		p < 0,001	ECC	20,9 ± 11,6	
Immobilisés	MVIC (%)	p = 0,001	CTRL	-21,7 ± 13,6	/
		p = 0,68	CON-ECC	-0,1 ± 19,7	12,8 (-1,76 ; 27,36)
		p = 0,003	ECC	12,7 ± 9,6	

Tableau XII : Extraction des résultats de l'étude de Valdès et al.

**Concernant le bras entraîné :** Une augmentation significative de la force maximale isométrique a été retrouvée dans les deux groupes expérimentaux ayant participé à un entraînement en résistance. Cette augmentation est plus importante au sein du groupe excentrique seul.

La différence d'augmentation inter-groupes entre ECC et CON-ECC est de 7,2%, avec un intervalle de confiance à 95% de (-2,68 ; 17,08). Il s'agit d'une différence non significative car l'IC chevauche le 0.

**Concernant le bras immobilisé :** Dans le groupe contrôle, qui a subi l'immobilisation stricte sans entraînement en résistance du côté opposé, la force MVIC a significativement diminué, en moyenne de 21,7%. Ces résultats étaient prévisibles.

Dans le groupe excentrique une augmentation significative du MVIC post immobilisation a été retrouvée, avec une moyenne 12,7%. Les valeurs retrouvées pour le groupe CON-ECC ne sont pas statistiquement significatives, mais la force MVIC ne semble pas avoir varié en post immobilisation.

La différence inter-groupe mesurée entre ECC et CON-ECC, en post immobilisation, exprimée par l'augmentation moyenne en pourcentage de la force MVIC est de 12,8 avec un intervalle de confiance à 95% de (-1,76 ; 27,36). Cette différence n'est pas statistiquement significative à ce niveau de confiance car l'IC chevauche le 0.

**De cette étude nous pouvons conclure que la force isométrique maximale des fléchisseurs de coude non entraînés a significativement augmentée uniquement dans le groupe excentrique.**

### 3.3.1.3 Étude numéro 3 : Sato et al.

Le but de cette étude était de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'entraînement en résistance excentrique unilatéral (ET) induirait un effet d'éducation croisée plus important et plus durable par rapport à l'entraînement en résistance concentrique (CT).

Les mesures du critère de jugement principal ont été effectuées avant l'intervention, et de 3 à 9 jours après la dernière séance d'entraînement, par un dynamomètre portable.

- La fiabilité test-retest des mesures du couple MVIC était excellente, représentée par le coefficient de variation et le coefficient de corrélation interclasse ( $4.4 \pm 4.1$  %, et 0,96 respectivement).
- Le seuil de significativité des résultats a été établi à un niveau de 0,05.

Les résultats disponibles représentent, pour chaque groupe, la moyenne de l'augmentation du couple MVIC (en pourcentage) entre la période pré-intervention et la période post-intervention, l'écart type, et le p intra-groupe. Ils sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Fléchisseurs de coude	Outcome	p value	Groupe	Moyenne ± écart type	Différence inter-groupe (IC 95%)
Entraînés	MVIC (%)	0,10	Témoin	∅ changements significatifs	/
		< 0,01	ET	22,5 ± 12,3	- 3,5 [-15,59 ; 8,59]
		< 0,01	CT	26,0 ± 11,9	
Non entraînés	MVIC (%)	<b>0,28</b>	<b>Témoin</b>	<b>∅ changements significatifs</b>	<b>/</b>
		<b>&lt; 0,01</b>	<b>ET</b>	<b>22,7 ± 17,9</b>	<b>10,5 [-4,06 ; 25,06]</b>
		<b>&lt; 0,01</b>	<b>CT</b>	<b>12,2 ± 10,2</b>	

Tableau XIII : Extraction des résultats de l'étude de Sato et al.

La force maximale isométrique volontaire ne semble pas avoir varié de manière significative dans le groupe témoin. Puisque ce groupe n'avait pas suivi d'entraînement en résistance, ce résultat semble pertinent.

Concernant le bras entraîné : La force maximale isométrique des fléchisseurs de coude entraînés a augmenté significativement ( $p < 0,01$ ) dans les deux groupes expérimentaux. Cette augmentation est plus marquée pour le groupe ayant effectué les entraînements en concentrique.

La différence inter-groupe est de -3,5. Cela signifie qu'en moyenne, la force isométrique du groupe excentrique (ET) a augmenté, mais de 3,5% de moins que celle du groupe concentrique (CT), pour les fléchisseurs de coude entraînés.

L'intervalle de confiance à 95% est de [-15,59 ; 8,59]. Cet intervalle de confiance est une estimation permettant de connaître la mesure probablement réelle sur la population générale et pas seulement sur l'échantillon de l'étude. Ici, l'estimation chevauche le zéro, ce qui signifie que l'effet de l'intervention pourrait être en accord avec les résultats de l'article (-15,59) ou au contraire, aller à l'encontre de cette interprétation (+8,59 qui témoignerait d'une augmentation supérieure pour le groupe excentrique). Ce résultat n'est donc pas statistiquement significatif.

Concernant le bras non entraîné : Le transfert de force dû à l'éducation croisée est représenté par ces résultats. La force maximale isométrique a significativement augmenté ( $p < 0,01$ ) dans les deux groupes expérimentaux. Comparativement, le groupe excentrique (ET) a enregistré une hausse plus marquée du critère de jugement.

La différence inter-groupe post intervention représentée par l'augmentation moyenne du couple MVIC est de 10,5% entre le groupe ET et CT. Autrement dit, en moyenne, la force maximale isométrique des fléchisseurs de coude non entraînés du groupe excentrique (ET) a augmenté de 10,5% de plus que celle du groupe concentrique (CT).

L'intervalle de confiance à 95% de la mesure est de [-4,06 ; 25,06]. Ce résultat n'est donc pas statistiquement significatif car il chevauche le zéro.

Autre point important à souligner : la divergence entre bras formé et bras non formé.

L'ampleur de l'augmentation est plus importante pour le bras formé que pour le bras non formé dans le groupe concentrique ( $p = 0,02$ ). L'augmentation du couple MVIC est presque 2 fois supérieure.

En revanche pour le groupe excentrique, l'augmentation semble être sensiblement identique entre les deux bras ( $p = 0,68$ ). Ce résultat peut être discuté en raison de son caractère non statistiquement significatif, et de l'écart-type plus large pour les données du groupe excentrique.

**En résumé, l'ampleur du transfert de force vers les fléchisseurs de coude non entraînés s'est avérée plus conséquent pour le groupe excentrique (+22,7% en moyenne) que pour le groupe concentrique (+12,2% en moyenne).**

### 3.3.1.4 Étude numéro 4 : Coratella et al

Le but de cet essai clinique était d'évaluer l'ampleur du transfert de force controlatéral après différentes modalités d'entraînement en résistance en excentrique seul (ECC), concentrique seul (CON) et concentrique/excentrique couplé (TRAD).

Les mesures du couple maximal de pointe isométrique ont été effectuées avant l'intervention et 4 jours après la dernière séance d'entraînement, avec un dynamomètre isocinétique.

- La fiabilité test-retest était excellente pour la mesure du couple de pointe isométrique (avec un coefficient de corrélation intraclasse de 0,928)
- Le seuil de significativité a été fixé à  $p < 0,05$ .
- Globalement, le taux de conformité au programme d'entraînement était supérieur à 92% pour tous les groupes.

Une interaction temps x groupe a été trouvée pour la force de contraction maximale isométrique ( $p = 0,011$ ). Cette interaction statistique montre que l'intervention a modifié le critère de jugement dans le temps. Le  $p$  value associé est inférieur à 0,05, ainsi cette différence est statistiquement significative.

Les données de l'article sont mentionnées sous forme de moyennes (en pourcentage) avec intervalles de confiance à 95%.

Pour calculer la taille d'effet, il était nécessaire de déterminer l'écart type des données correspondantes. Cette opération a été réalisée à l'aide d'un tableur Excel.

Groupe	Moyenne (IC95)	Moyenne $\pm$ écart type
ECC	11,3 (+5,8/16,8)	11,3 $\pm$ 9,9
TRAD	8,6 (+3,4/13,7)	8,6 $\pm$ 9,3

Tableau XIV : Calculs des écart-types de l'étude de Coratella et al.

Le tableau ci-dessous regroupe ainsi tous les résultats de l'étude :

Outcome	p value	Groupe	Moyenne $\pm$ écart type	Différence inter-groupe (IC95%)
MVIC (%)	>0,05	CON	Ø changements significatifs	/
	>0,05	CONC	Ø changements significatifs	/
	<0,001	ECC	11,3 $\pm$ 9,9	2,7 [-4,48 ; 9,88]
	<0,001	TRAD	8,6 $\pm$ 9,3	

Tableau XV : Extraction des données de l'étude de Coratella et al.

La force maximale isométrique des extenseurs de genou non entraînés n'a pas significativement été modifiée dans les groupes contrôle et concentrique. En revanche, elle a significativement augmenté ( $p < 0,001$ ) dans les groupes excentrique (ECC) et concentrique/excentrique (TRAD).

Cette hausse est plus prononcée dans le groupe excentrique (11,3% en moyenne), par rapport au groupe traditionnel (8,6% en moyenne).

La différence inter-groupe entre le groupe ECC et TRAD, en post intervention, exprimée par le couple maximal de pointe isométrique est de 2,7. L'accroissement de la force maximale isométrique est plus important après un entraînement excentrique qu'après un entraînement concentrique/excentrique couplé, avec une augmentation de 2,7% de plus en moyenne.

L'intervalle de confiance est de [-4,48 ; 9,88], il passe par zéro ainsi ce résultat n'est pas statistiquement significatif.

L'analyse inter-groupe réalisée par les auteurs stipule que les groupes excentrique et traditionnel présentaient des augmentations similaires et supérieures au groupe contrôle ( $p < 0,05$ ), ce qui n'est pas le cas du groupe concentrique ( $p > 0,05$ ).

**De cette étude nous pouvons conclure que la force maximale isométrique du groupe musculaire non entraîné est supérieur lorsque l'entraînement controlatéral est effectué en excentrique (+11,3% en moyenne) ou en concentrique/excentrique (+8,6% en moyenne). Aucun changement significatif du critère de jugement n'a été observé dans le groupe exerçant un travail musculaire concentrique.**

## 4 Discussion

Cette revue de littérature réunit 4 articles, dans le but d'étudier les bénéfices apportés par le travail musculaire excentrique sur le transfert de force controlatéral.

Toutes les études investiguées précédemment ont comparé la force isométrique maximale du groupe musculaire non entraîné après un entraînement controlatéral excentrique pour certains, et dans un autre mode de contraction pour d'autres. L'hypothèse initiale était que le travail musculaire excentrique confère un transfert de force controlatéral plus important qu'un autre type de contraction.

Les quatre essais cliniques inclus dans cette revue comportent quelques divergences qui seront traitées dans cette partie.

### 4.1 Analyse des principaux résultats

#### 4.1.1 Analyse des populations

Dans cette revue, les populations étudiées sont relativement similaires. Les critères d'inclusion et d'exclusion présentent des traits communs. Néanmoins, quelques différences sont notables :

Le groupe musculaire étudié n'est pas le même dans toutes les études. **Tseng et al, Valdès et al et Sato et al** ont ciblé les fléchisseurs de coude, pendant que **Coratella et al** se sont intéressés aux extenseurs de genou. Ainsi, cette revue étudie l'ampleur du transfert de force par éducation croisée après un exercice excentrique que ce soit au niveau des membres supérieurs ou des membres inférieurs.

Dans certaines méta analyses, les auteurs s'interrogeaient sur la différence potentielle de transmission de force en fonction de la partie du corps étudiée. Les données regroupées dans la méta-analyse de Munn et al. [16], ont montré une augmentation moyenne de la force de 7,8% (IC95% 4,1 ; 11,6%) pour le membre supérieur et de 10,4% (IC95% 3,5 ; 17,3%) pour le membre inférieur.

Les effectifs des groupes expérimentaux varient en fonction des études, et sont souvent assez faibles. Tous les essais cliniques de la revue comparaient deux à trois groupes de 9 à 15 personnes. La taille de l'échantillon peut être considérée comme trop faible pour pouvoir prétendre à des résultats significatifs.

Le sexe des participants. L'étude de **Tseng et al** ne compte parmi ses participants que des hommes. Les études de **Valdès et al et Sato et al** incluent des hommes et des femmes, et l'étude de **Coratella et al** ne comporte que des femmes. Il est important de vérifier que le sexe n'influence pas l'ampleur du transfert de force par éducation croisée.

Enfin, concernant la randomisation des participants, seule l'étude de **Tseng et al** n'a pas respecté cette assignation aléatoire. La randomisation permet de maximiser les chances que les groupes soient similaires avant le début de l'étude, pour faciliter la comparaison des résultats. En voulant faire correspondre la ligne de base de la force MVIC entre les groupes, les auteurs ont créé une certaine homogénéisation, mais qui n'est pas en accord avec le principe de la randomisation. Cette étude présente un biais de sélection important.

#### 4.1.2 Analyse des interventions

##### Concernant le membre non entraîné :

L'articulation comprenant le groupe musculaire non entraîné, a été strictement immobilisée dans l'étude de **Valdès et al.** Cette différence avec les autres études, dans lesquelles le groupe musculaire a simplement été placé au repos, peut entraîner un biais d'interprétation. En effet, l'immobilisation d'une articulation provoque une atrophie musculaire considérable, dû à la dégradation et au déclin de synthèse des protéines musculaires [33]. La force maximale isométrique du groupe musculaire strictement immobilisé tend à se réduire considérablement, plus que lorsque le groupe musculaire est simplement placé au repos.

La latéralité n'a pas toujours été prise en compte. Dans les études de **Valdès et al** et **Coratella et al**, les auteurs ont décidé d'entraîner les fléchisseurs de coude/extenseurs de genou du côté dominant. Le côté non dominant a été immobilisé ou placé au repos. Il convient de vérifier que la latéralisation des fonctions motrices liées au coude ou au genou n'interfère pas dans le phénomène d'éducation croisée.

##### Concernant le bras entraîné :

Dans toutes les études, l'intervention consistait à faire suivre aux participants un programme d'entraînement en résistance unilatéral en contraction excentrique. Les spécificités de chaque programme d'entraînement sont mentionnées dans le *tableau VII* des études incluses. Les contrastes entre les interventions peuvent se trouver au niveau de :

- La durée du programme
- La séance type (durée de la contraction, matériel, nombre de séries x nombre de répétitions)
- Charge

#### 4.1.3 Analyse des comparateurs

Chaque étude comprend un groupe interventionnel et au moins un groupe expérimental. La variable entre les groupes étant le mode de contraction avec lequel le programme d'entraînement était effectué.

Ainsi, les études incluses ont comparé :

- **Tseng et al** un groupe excentrique à un groupe concentrique.
- **Valdès et al** un groupe excentrique à un groupe concentrique/excentrique couplé, et un groupe témoin.
- **Sato et al** un groupe excentrique à un groupe concentrique, et un groupe témoin.
- **Coratella et al** un groupe excentrique à un groupe concentrique, un groupe concentrique/excentrique couplé, et un groupe témoin.

Dans les études de **Valdès et al**, **Sato et al** et **Coratella et al**, un groupe témoin est présent. Ce groupe contrôle met en évidence le phénomène d'éducation croisée, en montrant que sans exercice en résistance, la force isométrique maximale du groupe musculaire controlatéral reste inchangée. Dans la majorité des études, une fois qu'un programme d'entraînement est instauré, ce critère d'évaluation augmente en fonction de la contraction musculaire employée.

Il est important de souligner que la charge de travail n'a pas toujours été la même en fonction des études. En se basant sur des recommandations antérieures, les études de **Valdès et al** et **Coratella et al** ont égalisé le volume d'entraînement. Cela revient à équilibrer la quantité de travail effectuée dans

chaque groupe, afin d'éviter les déséquilibres musculaires. Le nombre de répétitions, la charge (1-RM) et le temps sous tension ont été ajustés pour chaque groupe. Le groupe excentrique a effectué des séances avec des charges plus élevées, puisque la force développée par ce travail est supra-maximale. Et le groupe concentrique a effectué plus de répétitions à charge réduite.

Dans les deux autres études, le programme d'entraînement est identique entre les deux groupes à l'exception du mode de contraction.

#### 4.1.4 Analyse des critères de jugement

Comme dit précédemment, le critère de jugement principal est la force maximale isométrique volontaire. Elle n'a pas été mesurée avec le même outil en fonction des études. La validité de chacun peut différer, ce qui représente un potentiel biais dans l'interprétation des résultats.

#### 4.1.5 Analyse des résultats

Les recherches scientifiques antérieures ont déjà démontré que la force musculaire augmente pour le muscle entraîné mais également pour le groupe musculaire homologue non entraîné après un entraînement en résistance unilatéral. Ce phénomène est connu sous le nom d'éducation croisée.

Tout l'intérêt de cette revue est de déterminer avec quels paramètres l'entraînement unilatéral confère un transfert de force controlatéral optimal. Le mode de contraction, le nombre de séance, la charge utilisée ainsi que le nombre de séries et de répétitions sont les paramètres modulables qui ont été étudiés dans les 4 essais de cette revue.

##### 4.1.5.1 Bénéfices du travail musculaire excentrique versus concentrique.

Les études ayant comparé un groupe excentrique et un groupe concentrique sont les études de **Tseng et al**, **Sato et al** et **Coratella et al**.

Étude	Modalités d'entraînement	↗ MVIC groupe excentrique	↗ MVIC groupe concentrique	Taille d'effet
<b>Tseng et al.</b>	5 séances sur 5 semaines. Charge et répétitions identiques entre les groupes.	<b>11% ± 5%*</b>	5% ± 2%*	6 (2,78 ; 9,22)
<b>Sato et al.</b>	10 séances sur 5 semaines. Charge et répétitions identiques entre les groupes.	<b>22,7% ± 17,9%*</b>	12,2% ± 10,2%*	10,5 (-4,06 ; 25,06)
<b>Coratella et al.</b>	15 séances sur 8 semaines. Charge et répétitions ≠ entre les groupes. ET : 120% de la 1-RM CT : 85% de la 1-RM	<b>11,3% ± 9,9%*</b>	∅ changement significatif	/

Tableau XVI : Synthèse des résultats obtenus dans les trois études comparant excentrique et concentrique.

Dans ce tableau récapitulatif, le symbole \* témoigne du caractère statistiquement significatif de la donnée.

Le transfert de force controlatéral s'est produit dans les deux groupes expérimentaux pour les études de **Tseng et al** et de **Sato et al**. En revanche, l'étude de **Coratella et al** n'a pas enregistré de changement significatif de la force isométrique dans le groupe concentrique. Le groupe musculaire ciblé par les deux premières études n'est pas le même que celui étudié par **Coratella et al**, tout comme le nombre de séances et leur intensité en termes de charge et de répétitions. Ces éléments peuvent constituer des facteurs de confusion à même d'expliquer cette différence de résultat.

**Tseng et al** et de **Sato et al** ont centré leurs études sur les fléchisseurs de coude. Lorsque l'on regarde les résultats obtenus, on remarque que les pourcentages d'augmentation de la force MVIC vont du simple au double entre les groupes concentriques de chaque étude et excentriques de chaque étude. Le nombre de séances pratiqué par les participants de l'étude de **Sato et al** était double par rapport à **Tseng et al**, on remarque que l'effet produit par éducation croisée l'est aussi. Les modalités d'entraînement étant identiques entre les deux études au regard de la charge développée et du nombre de contractions, on peut supposer que le nombre de séances a impacté l'ampleur du transfert croisé entre ces études.

Les trois études s'accordent à dire que le gain de force controlatéral est plus élevé lorsque l'entraînement est effectué en excentrique. L'étude de **Tseng et al** a enregistré une hausse de force isométrique moyenne de 6% de plus pour le groupe excentrique, et l'étude de **Sato et al** a enregistré une hausse moyenne de 10,5% de plus pour le même groupe.

Les valeurs en gras dans le tableau représentent l'augmentation en pourcentage de la force maximale isométrique obtenue par transfert croisée dans les groupes excentriques de chaque étude. **Coratella et al** ont engagé de nombreuses adaptations dans leur étude pour obtenir un effet d'éducation croisée optimal (dynamomètre isocinétique, nombre de séance élevé avec adaptation de la charge et du nombre de contraction en fonction des groupes). Pourtant, la valeur obtenue est similaire à celle de **Tseng et al**, et plus faible que celle obtenue par **Sato et al**. Toutes ces modalités d'adaptation de la charge de travail et du rythme, non prises en compte dans les deux autres études, ne sont peut-être pas nécessaires pour augmenter l'effet d'éducation croisée.

En définitive, les hypothèses émanant de ces articles sont que :

- Le travail excentrique induit un transfert de force controlatéral plus important que le travail concentrique.
- Une base de 5 séances (au rythme d'une séance par semaine) semble suffire pour produire un effet d'éducation croisée. Néanmoins, la comparaison entre deux études centrées sur les fléchisseurs de coude met en avant une corrélation entre le nombre de séance et l'ampleur de l'éducation croisée.

Toutes ces suppositions restent à l'état hypothétique puisque des risques de biais sont présents :

- La valeur moyenne, dans l'étude de **Sato et al** est plus élevée que dans les deux autres essais. Mais l'écart-type est élevé, indiquant une grande dispersion des données autour de la moyenne. Le risque de biais est augmenté car la moyenne obtenue peut être influencée par des valeurs extrêmes ou des erreurs de mesures. Une taille d'échantillon plus importante permettrait probablement l'obtention de meilleurs résultats.
- L'étude **Tseng et al** comporte une validité interne relativement faible. De nombreux biais sont présents, dont un biais de sélection, de performance, de détection, de suivi et d'attrition.
- Les tailles d'échantillons faibles peuvent impacter la fiabilité et la validité des résultats obtenus. Ils peuvent être difficiles à généraliser à l'ensemble de la population étudiée. Les conclusions tirées à partir de ces essais cliniques dont l'échantillon est de petite taille, peuvent être limitées dans leur portée et leur applicabilité à la population totale.

- Les mesures n'ont pas été effectuées avec le même outil de mesure en fonction des études.

Qu'en est-il pour l'entraînement traditionnel couplant concentrique et excentrique ?

#### 4.1.5.2 Bénéfices du travail musculaire excentrique versus concentrique/excentrique couplé.

Les essais dans lesquels un groupe excentrique a été comparé à un groupe concentrique/excentrique couplé sont les suivants : **Valdès et al** et **Coratella et al**.

Étude	Modalités d'entraînement	MVIC groupe témoin (%)	MVIC groupe traditionnel (%)	↗ MVIC groupe excentrique (%)	Taille d'effet
<b>Valdès et al.</b>	12 séances/4 semaines. Charge et répétitions identiques entre les groupes. Immobilisation stricte.	-21,7±13,6*	-0,1 ± 19,7	<b>12,7 ± 9,6 *</b>	12,8 (-1,76 ;27,36)
<b>Coratella et al.</b>	15 séances sur 8 semaines. Charge et répétitions ≠ entre les groupes. ET : 120% de la 1-RM TRAD: 90% de la 1-RM	∅ changement significatif	8,6 ± 9,3*	<b>11,3 ± 9,9*</b>	2,7 (-4,48 ; 9,88)

Tableau XVII : Synthèse des résultats obtenus dans les trois études comparant excentrique et concentrique/excentrique couplé

#### Dans l'étude de **Valdès et al.**

Dans le groupe de contrôle, une importante réduction de la force musculaire a été relevée à la suite de la période d'immobilisation de 4 semaines. L'atrophie musculaire post-immobilisation a été mise en avant grâce à un critère de jugement secondaire de l'étude : la circonférence musculaire du bras. Elle a significativement diminué.

En ce qui concerne le groupe traditionnel (excentrique/concentrique), la différence entre les périodes pré et post-intervention n'est pas statistiquement significative, avec **p=0,68**. L'écart-type (19,7%) est relativement large, il indique une grande étendue des données ce qui rend difficile l'interprétation des résultats.

Les résultats statistiquement significatifs du groupe excentrique confirment que ce type de contraction engendre un transfert de force par éducation croisée considérable.

Malgré les différents degrés de pertinence des résultats, les auteurs ont tout de même supposé que l'excentrique induit une hausse plus importante du couple MVIC du groupe musculaire immobilisé, que le couplage concentrique/excentrique. Celui-ci n'a montré aucun changement au fil du temps. Cette même conclusion a été tirée d'une étude de *Pearce et al* [34], rapportant que l'entraînement concentrique/excentrique couplé unilatéral permet de maintenir la force musculaire du groupe homologue immobilisé. La 1-RM et la force maximale MVIC étaient respectivement similaires et légèrement supérieures en post intervention.

L'entraînement impliquant des contractions excentriques de haute intensité se révèle plus efficace que l'entraînement traditionnel pour minimiser voire éliminer les effets négatifs de l'immobilisation.

Dans l'étude de **Coratella et al.**:

Le groupe excentrique seul a engendré un transfert de force plus conséquent que le groupe traditionnel concentrique/excentrique. L'augmentation de force **isométrique** était supérieure en moyenne de 2,7% pour le groupe excentrique.

Les auteurs de cet article ont également évalué l'efficacité des différents modes de contraction sur la force maximale **concentrique** et **excentrique** controlatérale. Les théories déduites sont les suivantes :

- Une augmentation des forces maximales isométrique, concentrique et excentrique a été mise en évidence dans les groupes excentrique seul et concentrique/excentrique couplé. Le transfert de force était toujours supérieur dans le groupe excentrique seul.
- Dans le groupe concentrique, seule la force maximale concentrique a enregistré une augmentation.

L'excentrique seul et le concentrique/excentrique entraînent une élévation de la force controlatérale dans plusieurs modalités de test, alors que le concentrique n'augmente que le couple maximal de force concentrique.

Les conclusions de cette étude sont conformes à ce qui avait été rapporté dans les méta-analyse de *Munn et al. [16]* et de *Manca et al. [15]*

Comparaisons entre les deux articles :

Ces deux essais cliniques postulent que l'exercice excentrique est responsable d'un effet d'éducation croisée plus important que l'exercice concentrique/excentrique couplé. En moyenne, la force isométrique des groupes musculaires non sollicités a augmenté de 12,8% de plus dans le groupe excentrique dans l'étude de **Valdès et al.**, et de 2,7% dans l'étude de **Coratella et al.**

Les effets dans le groupe traditionnel ont été très différents entre ces deux essais cliniques. **Valdès et al** n'ont trouvé aucun changement significatif de la force maximale isométrique sur les fléchisseurs de coude immobilisés. En revanche, **Coratella et al** ont démontré que l'entraînement concentrique/excentrique améliorerait les forces maximales isométriques, concentriques et excentriques. Comme dit précédemment, ces résultats dans l'étude de **Valdès et al** ne sont pas statistiquement significatifs et difficilement interprétables. Le fait qu'ils aient strictement immobilisé l'articulation étudiée peut être une source de confusion. De plus **Valdès et al** travaillent sur les fléchisseurs de coude du membre supérieur tandis que **Coratella et al** ont évalué les extenseurs de genou du membre inférieur. La charge de travail a été adaptée entre les groupes pour égaliser le volume d'entraînement. Pourtant dans les deux études, le groupe traditionnel ne s'est pas entraîné de la même façon. Le groupe traditionnel de l'étude de **Valdès et al** a, de la semaine 1 à la semaine 4, progressivement augmenté la charge, passant de 60 à 90% de la 1-RM. En revanche, le groupe traditionnel de l'étude de **Coratella et al** s'est entraîné à charge élevée 90% de la 1-RM sur toutes les séances.

Ainsi, une mesure statistiquement plus significative du critère de jugement pour le groupe traditionnel dans l'étude de **Valdès et al**, mais aussi la prise en compte de toutes les hypothèses précédemment citées, permettrait d'aboutir à une conclusion plus réaliste de l'effet de cette contraction en éducation croisée.

En fin de compte, les hypothèses qui découlent de ces articles sont les suivantes :

- Le gain de force controlatéral par éducation croisée est supérieur à la suite d'un entraînement excentrique seul par rapport à un entraînement concentrique/excentrique combiné.

En raison des biais de chaque article et de l'ensemble de leurs divergences, toutes les suppositions précédemment évoquées (*parties 4.1.5.1 et 4.1.5.2*) sont sujettes à débat. L'incorporation de nouvelles études de bonne qualité méthodologique permettrait de préciser certains points.

Des recherches préexistantes, telles que la récente méta-analyse de *Green et al.* [35] ont prouvé que l'effet d'éducation croisée était présent quel que soit l'âge. Son importance était équivalente que ce soit chez les hommes ou chez les femmes, entre les membres supérieurs et inférieurs. L'une des variables d'entraînement pouvant potentiellement moduler l'étendue du transfert de force est le type de contraction musculaire utilisé.

*Kidgell et al* [36] ont récemment mené un essai clinique dans le but de déterminer quelles réponses cortico-spinales succèdent un entraînement excentrique ou concentrique. 12 séances d'entraînement des fléchisseurs de poignet ont été réalisées par deux groupes expérimentaux : « excentrique » et « concentrique ».

Les résultats l'étude sont en accord avec les interprétations tirées de cette revue en ce qui concerne le transfert de force.

Les réponses à la stimulation magnétique transcrânienne ont rapporté que l'entraînement excentrique induisait :

- Une diminution accrue de l'inhibition intra-corticale de 32% (contre 2% pour l'entraînement concentrique).
- Une diminution de la période de silence de 27% (contre 4% pour l'entraînement concentrique).
- Une augmentation de l'amplitude des potentiels évoqués moteurs de 51%, représentant ainsi un accroissement de l'excitabilité des neurones moteurs au cours d'un exercice excentrique. (Contre 13% dans le groupe concentrique).

Ces résultats indiquent que le travail excentrique influe différemment l'excitabilité et l'inhibition cortico-spinale. Cet essai clinique apporte à cette revue des hypothèses pouvant possiblement expliquer en quoi l'exercice excentrique permet un meilleur transfert de force. Ce mode de contraction fournirait un plus grand stimulus neural.

#### 4.1.6 Qualité de preuve

La validité finale d'une revue de littérature repose en partie sur la validité de chacun des essais qu'elle inclut. Il est important d'évaluer le niveau de preuve, ou de crédibilité des études.

La HAS a publié en 2013 un guide de recommandation de bonne pratique basé sur les niveaux de preuve et gradation des recommandations.<sup>10</sup> Le système utilisé sera celui proposé par la HAS.

##### Niveau de preuve.

Le niveau de preuve d'une étude caractérise « la capacité de l'étude à répondre à la question de recherche ». Elle prend en compte plusieurs éléments dont :

- La cohérence du protocole développé pour répondre à la question posée.
- Le taux de biais présents dans l'étude.
- L'adaptation de l'analyse statistique aux objectifs de l'étude.
- La puissance de l'étude, notamment la taille d'échantillon.

Ainsi, le niveau de preuve de chacun des essais dépend du schéma d'étude (3 ECR, 1 essai clinique non randomisé), du score sur l'échelle PEDro, de la cohérence dans l'analyse des résultats et de leur disponibilité, ainsi que de la taille d'échantillon.

Un tableau récapitulatif de la classification générale du niveau de preuve d'une étude est disponible en *annexe 2*.

##### Grade des recommandations.

Les recommandations proposées par le système de la HAS sont classées en grade A, B ou C :

- Une recommandation de grade A est « fondée sur une preuve scientifique établie par des études de fort niveau de preuve (niveau 1) ».
- Une recommandation de grade B est « fondée sur une présomption scientifique fournie par des études de niveau intermédiaire de preuve (niveau 2) ».
- Une recommandation de grade C est « fondée sur des études de moindre niveau de preuve (niveaux 3 et 4) ».

Un tableau récapitulatif des grades de recommandations est disponible en *annexe 3*.

Ainsi, la qualité de preuve des études incluses est résumée dans le tableau ci-dessous :

	Schéma d'étude	Échelle PEDro	Grade des recommandations	Niveau de preuve
<b><i>Tseng et al. [29]</i></b>	Essai clinique non randomisé	3/10	C	Faible
<b><i>Valdès et al. [30]</i></b>	ECR	4/10	B	Intermédiaire
<b><i>Sato et al. [31]</i></b>	ECR	6/10	B	Intermédiaire
<b><i>Coratella et al. [32]</i></b>	ECR	6/10	B	Intermédiaire

Tableau XVIII : Qualité de preuve des études incluses

<sup>10</sup> [https://www.hassante.fr/upload/docs/application/pdf/201306/etat\\_des\\_lieux\\_niveau\\_preuve\\_gradation.pdf](https://www.hassante.fr/upload/docs/application/pdf/201306/etat_des_lieux_niveau_preuve_gradation.pdf)

## 4.2 Applicabilité des résultats en pratique clinique

L'analyse et l'interprétation des résultats des études incluses appuient l'hypothèse initiale, selon laquelle l'effet d'éducation croisée est supérieur après un entraînement en résistance unilatéral excentrique.

Cette partie vise à déterminer si le programme d'entraînement en résistance est applicable dans la pratique courante.

### → Coût de l'intervention

L'entraînement doit être réalisé contre résistance. Cette résistance peut être matérialisée par des appareils spécifiques comme le « leg extension » utilisé dans l'étude de **Coratella et al.** Si le cabinet de kinésithérapie ne possède pas cette machine, l'entraînement sera tout de même réalisable avec du matériel de base comme des haltères, ou autres types de poids, ce qui est moins coûteux.

Une première difficulté peut être rencontrée : en fonction de l'intensité à laquelle on souhaite faire travailler le patient (en fonction de sa 1-RM), il se peut que l'on ne dispose pas de l'haltère au poids souhaité.

### → Reproductibilité et faisabilité du programme

Les exercices du programme sont relativement simples à réaliser, ce qui convient à tout type de patient (notamment les patients sédentaires comme étudiés dans cette revue). Le kinésithérapeute veillera à la bonne exécution du mouvement.

La fréquence des séances se situe entre 1 à 2 fois par semaine, correspondant aux pratiques standards de rééducation.

L'assiduité des participants constitue évidemment l'élément clé du traitement.

### → Rapport bénéfice/risque

Les bénéfices du travail musculaire excentrique ont été énoncés tout au long de cette revue, néanmoins ce mode de contraction est à utiliser avec prudence. Une application excessive ou inadéquat de ce mode de contraction peut être à l'origine de dommages musculaires induits par l'exercice (EIMD). La physiopathologie de ces dommages musculaires est parfois controversée entre les auteurs. Certains parlent de sur-étirement des sarcomères, d'autres d'une augmentation des enzymes intramusculaires circulantes.

Des douleurs musculaires d'apparition retardée (DOMS) peuvent accompagner ces altérations. Les symptômes des EIMD apparaissent dans les heures succédant l'exercice excentrique et atteignent leur maximum entre 24 et 72 heures. [11]

Pour ne pas amplifier ces effets néfastes, il est recommandé de respecter le temps de récupération musculaire entre deux séances d'entraînement excentrique. Ce délai se situe en moyenne entre 48 et 72 heures. Cette période de récupération permettrait d'appliquer jusqu'à 2 séances par semaine. Cette fréquence doit être respectée en pratique clinique pour limiter le risque de blessure.

### 4.3 Biais potentiel de la revue

#### Limites de la revue.

Une des premières limites se réfère au **nombre d'études incluses**. Quatre études constituent un ensemble de données assez faible. La comparaison de plus de données permettrait d'obtenir des résultats plus significatifs. De plus, la qualité de preuve des études incluses est modérée, voir faible.

La **population incluse** ne ressemble pas à la patientèle ciblée. Tous les participants étaient des personnes en bonne santé et sédentaires. Or le but de cette revue est de pouvoir appliquer cette intervention en pratique clinique avec des patients atteints de diverses pathologies. L'éducation croisée est un outil intéressant lorsqu'il est appliqué à des patients soumis à une immobilisation, ou une restriction de mouvement. Il serait intéressant de vérifier que les théories formulées dans cette revue sont applicables à une population différente, atteinte de diverses pathologies.

L'effectif était également trop faible au sein de chaque étude, diminuant ainsi la puissance statistique des études.

Les **divergences entre les programmes** d'entraînement, que ce soit au niveau de leur réalisation ou de leur durée, biaise les résultats obtenus. Il est impossible de déterminer avec certitude l'impact relatif de chaque programme d'entraînement dans l'efficacité du transfert de force.

#### Biais potentiels de la revue.

L'échelle de qualité méthodologique AMSTAR-2 permet de coter la validité interne des revues de littérature. [37]

AMSTAR-2 est une amélioration de la version AMSTAR originelle (A MeaSurement Tool to Assess Systematic Reviews) qui avait été conçue en 2007 pour l'évaluation des revues systématiques incluant des essais contrôlés randomisés. Cette révision a permis une évaluation plus approfondie, puisqu'elle cible des revues systématiques incluant à la fois des essais cliniques randomisés et des études non randomisées.

Elle est constituée de 16 items au total.

L'échelle AMSTAR-2 n'est pas destinée à fournir un score global, il est plutôt recommandé de tenir compte de l'impact potentiel de chaque item invalidé. [38]

Item		Cotation
1	Est-ce que les questions de recherche et les critères d'inclusion de la revue incluait les critères PICO ?	Oui
2	Est-ce que le rapport de la revue contenait une déclaration explicite indiquant que la méthode de la revue a été établie avant de la conduire ? Est-ce que le rapport justifiait toute déviation significative par rapport au protocole ?	Oui, partiel
3	Les auteurs ont-ils expliqué leur choix de schémas d'étude à inclure dans la revue ?	Oui
4	Les auteurs ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?	Oui, partiel
5	Les auteurs ont-ils effectué en double la sélection des études ?	Non
6	Les auteurs ont-ils effectué en double l'extraction des données ?	Non
7	Les auteurs ont-ils fourni une liste des études exclues et ont-ils précisé le motif d'exclusion ?	Oui
8	La description des études incluses était-elle suffisamment détaillée ?	Oui
9	Les auteurs ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?	Oui
10	Les auteurs ont-ils indiqué les sources de financement des études incluses dans la revue ?	Non
11	Dans le cas où une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?	Sans objet
12	Dans le cas où une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils évalué l'impact potentiel des risques de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ?	Sans objet
13	Les auteurs ont-ils pris en compte le risque de biais des études individuelles lors de l'interprétation/de la discussion des résultats de la revue ?	Oui
14	Les auteurs ont-ils fourni une explication satisfaisante pour toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue et une discussion sur celle-ci ?	Oui
15	S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs ont-ils mené une évaluation adéquate des biais de publication (biais de petite étude) et ont-ils discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ?	Sans objet
16	Les auteurs ont-ils rapporté toute source potentielle de conflit d'intérêt, y compris tout financement reçu pour réaliser la revue ?	Non

Tableau XIX : Grille d'évaluation AMSTAR-2 de la qualité méthodologique de la revue de littérature

Les critères invalidés sont à prendre en compte, ils représentent les biais présents dans cette revue de littérature. La grille AMSTAR-2 met en évidence :

- La recherche documentaire ne s'est pas appuyée sur la littérature grise, ce qui aurait potentiellement pu augmenter le nombre de ressources. Ce choix, personnel, s'explique principalement par le fait que la littérature grise n'est pas sujette à un comité de relecture. Bien que la qualité d'un article scientifique dépende toujours de sa qualité méthodologique, j'ai préféré me concentrer uniquement sur la littérature blanche.
- La sélection des études et l'extraction des données n'ont pas été effectués en double étant donné que la revue n'a été réalisée que par un seul auteur.
- Les sources de financement des études individuelles n'étaient pas mentionnées.
- Aucune méta-analyse n'a pu être réalisée en raison de l'hétérogénéité des données.

## 5 Conclusion

### 5.1 Implication pour la pratique clinique

Le transfert de force par éducation croisée fait partie de l'arsenal thérapeutique dont peut disposer le kinésithérapeute, même si ce phénomène est souvent mal connu et trop peu utilisé en pratique. Pourtant l'éducation croisée possède une pertinence clinique potentielle, dans la prise en charge de patients dont les conditions empêchent l'entraînement direct du membre.

En effet, le transfert de force controlatéral peut prévenir en partie les conséquences néfastes d'une immobilisation ou sous-utilisation. Le gain de force obtenu durant cette période permet d'accélérer les suites de la prise en charge. La période de rééducation peut ainsi être raccourcie, ce qui constitue un enjeu de santé publique de par le moindre coût engagé par la sécurité sociale.

Cet entraînement en résistance unilatéral du membre libre fournit donc une nouvelle approche dans la prise en charge des blessures musculosquelettiques. La problématique était de définir un cadre pour que le programme d'entraînement confère un gain de force optimal. L'élaboration de cette revue de littérature était donc centrée sur la question clinique suivante :

#### **Quels sont les bénéfices du travail musculaire excentrique dans le phénomène d'éducation croisée ?**

La lecture critique des articles a permis d'isoler certaines théories, apportant des réponses à cette question. Celles-ci restent à l'état de supposition, au vu des biais et des limites potentiels de la revue. Néanmoins, les conclusions tirées sont encourageantes vis-à-vis de l'efficacité du travail excentrique dans l'éducation croisée.

Un programme d'entraînement unilatéral excentrique confère un transfert de force controlatéral conséquent. Les autres modalités de contraction analysées dans cette revue (concentrique et concentrique/excentrique couplé) exposent des résultats plutôt hétérogènes. Dans tous les essais, le travail musculaire excentrique a prouvé sa supériorité en termes de transfert de force. La force maximale isométrique des muscles non entraînés était constamment supérieure dans le groupe excentrique.

Dans certaines études, le travail musculaire concentrique a également engendré un transfert de force controlatéral, que ce soit en augmentant la force isométrique et/ou la force concentrique. Le travail excentrique semblerait augmenter la force controlatérale dans toutes les modalités de contraction, mais cette hypothèse demande à être appuyée par d'autres recherches cliniques.

Quant aux modalités de réalisation du programme d'entraînement excentrique, certains points sont encore à éclaircir. Il semblerait qu'un effet d'éducation croisée apparaisse dès 5 séances d'entraînement à raison d'une séance par semaine. Mais ce constat est à avancer avec prudence, à cause des nombreux biais présents dans l'étude qui le démontre. Une inclusion de plus d'articles, dont les seules variables seraient le mode de contraction et le nombre de séances, permettrait de confirmer la corrélation entre le nombre de séance et l'ampleur du gain de force controlatéral.

L'application du programme d'entraînement est peu coûteuse et respecte la fréquence classique des séances de kinésithérapie. Sans programme d'entraînement universellement défini, les exercices sont adaptables par le kinésithérapeute et ainsi la technique est accessible à tout type de patient.

En définitive, le phénomène d'éducation croisée a tout intérêt à être intégré dans la prise en charge des blessures musculosquelettiques. L'entraînement du membre libre réalisé en excentrique confère un transfert de force plus important que dans les autres modes de contraction.

## 5.2 Implications pour la recherche

De cette revue émanent un certain nombre de théories qui restent à prouver notamment par l'apport de nouvelles données scientifiques.

Il serait intéressant d'évaluer la corrélation entre le nombre de séances effectuées et l'ampleur du transfert de force. De plus, tous les articles de cette revue comprennent des programmes dont l'intensité de travail était maximale. Il serait pertinent d'évaluer l'efficacité d'un entraînement à intensité infra-maximale sur le transfert de force controlatéral.

Des recherches sur le couplage du programme d'entraînement à une autre technique utilisée en kinésithérapie pourraient être enrichissantes. L'électrostimulation neuromusculaire pourrait-elle accentuer l'effet d'éducation croisée lorsqu'elle est couplée à un programme d'entraînement excentrique ? Une récente étude a été menée dans le but de déterminer les effets locaux et controlatéraux de l'application de l'électrostimulation sur l'amélioration du flux sanguin. [39] Ce type d'étude pourrait être mené en évaluant l'efficacité du couplage « électrostimulation et programme d'entraînement excentrique » sur le transfert de force controlatéral. Toutefois, dans l'hypothèse où le transfert de force serait supérieur via cette association, il se peut que cette intervention ne soit pas applicable en pratique clinique. L'excentrique procurant déjà des dommages tissulaires, il serait obligatoire de vérifier que son association à l'électrostimulation n'augmente pas ce risque de complications.

Autre point important à souligner, les études incluses dans cette revue ont principalement jugé le transfert de force sur la force maximale **isométrique**. Seule l'étude de **Coratella et al** a étudié l'effet d'éducation croisée sur toutes les modalités de contraction. Le travail sur isocinétisme a permis d'évaluer le couple de force isométrique, concentrique, et excentrique ce qui élargit considérablement nos connaissances sur ce transfert de force. Il serait intéressant que les futures études évaluent le transfert de force controlatéral dans toutes les modalités de contraction.

Le phénomène d'éducation croisée et les mécanismes à son origine sont sujets à de nombreuses controverses, c'est pourquoi de nombreuses études sont menées chaque année à ce sujet. Une meilleure compréhension des sites d'adaptation sous-jacents à l'éducation croisée permettrait une utilisation plus efficace des protocoles d'entraînement en résistance. L'élargissement de cette technique à divers troubles musculosquelettiques et neurologiques, basé sur des données scientifiques avérées, constituerait une avancée précieuse dans le champ masso-kinésithérapique.

## 6 Bibliographie

- [1] Frontera WR, Ochala J. Skeletal muscle: a brief review of structure and function. *Calcif Tissue Int* 2015;96:183–95. doi: 10.1007/s00223-014-9915-y.
- [2] TORTORA, DERRICKSON. Anatomie et physiologie humaines. 6ème édition. 2022.
- [3] Campbell NJ, Maani CV. Histology, Muscle. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023.
- [4] CAU P, SEITE R. Cours de biologie cellulaire. 5ème édition. Ellipses; 2012.
- [5] Cretoiu D, Pavelescu L, Duica F, Radu M, Suciu N, Cretoiu SM. Myofibers. *Adv Exp Med Biol* 2018;1088:23–46. doi: 10.1007/978-981-13-1435-3\_2.
- [6] Lee M, Carroll TJ. Cross education: possible mechanisms for the contralateral effects of unilateral resistance training. *Sports Med Auckl NZ* 2007;37:1–14. doi: 10.2165/00007256-200737010-00001.
- [7] Sweeney HL, Hammers DW. Muscle Contraction. *Cold Spring Harb Perspect Biol* 2018;10:a023200. doi: 10.1101/cshperspect.a023200.
- [8] McCuller C, Jessu R, Callahan AL. Physiology, Skeletal Muscle. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022.
- [9] 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. doi: 0.1136/bjsm.2008.051417.
- [10] Hedayatpour N, Falla D. Physiological and Neural Adaptations to Eccentric Exercise: Mechanisms and Considerations for Training. *BioMed Res Int* 2015;2015:193741. doi: 10.1155/2015/193741.
- [11] Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Eccentric Exercise: Physiological Characteristics and Acute Responses. *Sports Med* 2017;47:663–75. doi: 10.1007/s40279-016-0624-8.
- [12] Suchomel TJ, Wagle JP, Douglas J, Taber CB, Harden M, Haff GG, et al. Implementing Eccentric Resistance Training-Part 1: A Brief Review of Existing Methods. *J Funct Morphol Kinesiol* 2019;4:38. doi: 10.3390/jfmk4020038.
- [13] Scripture: On the education of muscular control and power
- [14] Barss TS, Pearcey GEP, Zehr EP. Cross-education of strength and skill: an old idea with applications in the aging nervous system. *Yale J Biol Med* 2016;89:81–6.
- [15] 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. doi: 10.1007/s00421-017-3720-z.
- [16] Munn J, Herbert RD, Gandevia SC. Contralateral effects of unilateral resistance training: a meta-analysis. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 2004;96:1861–6. doi: 10.1152/jappphysiol.00541.2003.
- [17] Bigard A-X, Koulmann N. Adaptations biochimiques et structurales du muscle à l'entraînement en force. *Sci Sports* 2006;21:50–6. doi: 10.1016/j.scispo.2005.12.002.
- [18] Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti AE, Cerretelli P. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur J Appl Physiol* 1989;59:310–9. doi: 10.1007/BF02388334.
- [19] 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. doi: 10.1007/s00421-018-3937-5.

[20] Hendy AM, Spittle M, Kidgell DJ. Cross education and immobilisation: mechanisms and implications for injury rehabilitation. *J Sci Med Sport* 2012;15:94–101. doi: 10.1016/j.jsams.2011.07.007.

[21] Farthing JP, Borowsky R, Chilibeck PD, Binsted G, Sarty GE. Neuro-physiological adaptations associated with cross-education of strength. *Brain Topogr* 2007;20:77–88. Doi: 10.1007/s10548-007-0033-2.

[22] Perez MA, Cohen LG. Interhemispheric inhibition between primary motor cortices: what have we learned? *J Physiol* 2009;587:725–6. doi: 10.1113/jphysiol.2008.166926.

[23] Perez MA, Cohen LG. Mechanisms Underlying Functional Changes in the Primary Motor Cortex Ipsilateral to an Active Hand. *J Neurosci* 2008;28:5631–40. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0093-08.2008.

[24] Pallot A, Davergne T, Gallois M, Guémann M, Martin S, Morichon A, et al. Evidence Based Practice en rééducation, démarche pour une pratique raisonnée. 1st ed. Elsevier Masson; 2019.

[25] Lepley LK, Palmieri-Smith RM. Cross-education strength and activation after eccentric exercise. *J Athl Train* 2014;49:582–9. doi: 10.4085/1062-6050-49.3.24.

[26] Chen TC, Chen H-L, Lin M-J, Yu H-I, Nosaka K. Contralateral Repeated Bout Effect of Eccentric Exercise of the Elbow Flexors. *Med Sci Sports Exerc* 2016;48:2030–9. doi: 10.1249/MSS.0000000000000991.

[27] Andrushko JW, Lanovaz JL, Björkman KM, Kontulainen SA, Farthing JP. Unilateral strength training leads to muscle-specific sparing effects during opposite homologous limb immobilization. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 2018;124:866–76. doi: 10.1152/jappphysiol.00971.2017.

[28] 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 Off J ESSKA* 2019;27:68–75. doi: 10.1007/s00167-018-5040-1.

[29] Tseng W-C, Nosaka K, Tseng K-W, Chou T-Y, Chen TC. Contralateral Effects by Unilateral Eccentric versus Concentric Resistance Training. *Med Sci Sports Exerc* 2020;52:474–83. doi:10.1249/MSS.0000000000002155.

[30] Valdes O, Ramirez C, Perez F, Garcia-Vicencio S, Nosaka K, Penailillo L. Contralateral effects of eccentric resistance training on immobilized arm. *Scand J Med Sci Sports* 2021;31:76–90. doi: 10.1111/sms.13821.

[31] Sato S, Yoshida R, Kiyono R, Yahata K, Yasaka K, Nosaka K, et al. Cross-education and detraining effects of eccentric vs. concentric resistance training of the elbow flexors. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2021;13:105. doi:10.1186/s13102-021-00298-w.

[32] 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. doi: 10.3389/fphys.2022.788473.

[33] Wall BT, Dirks ML, van Loon LJC. Skeletal muscle atrophy during short-term disuse: implications for age-related sarcopenia. *Ageing Res Rev* 2013;12:898–906. doi: 10.1016/j.arr.2013.07.003.

[34] 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. doi: 10.1111/j.1600-0838.2012.01453.x.

[35] 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. doi: 10.1080/10833196.2018.1499272.

- [36] Kidgell DJ, Frazer AK, Daly RM, Rantalainen T, Ruotsalainen I, Ahtiainen J, et al. Increased cross-education of muscle strength and reduced corticospinal inhibition following eccentric strength training. *Neuroscience* 2015;300:566–75. doi: 10.1016/j.neuroscience.2015.05.057.
- [37] Pallot A, Rostagno S. AMSTAR-2 : traduction française de l'échelle de qualité méthodologique pour les revues de littérature systématiques. *Kinésithérapie Rev* 2021;21:13–4. doi:10.1016/j.kine.2019.12.050.
- [38] 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:j4008. doi:10.1136/bmj.j4008.
- [39] Benito-Martínez E, Senovilla-Herguedas D, de la Torre-Montero JC, Martínez-Beltrán MJ, Reguera-García MM, Alonso-Cortés B. Local and Contralateral Effects after the Application of Neuromuscular Electrostimulation in Lower Limbs. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:9028. doi:10.3390/ijerph17239028.

## **Table des illustrations**

<i>Figure 1 : Coupe transversale d'un muscle strié squelettique.</i> .....	3
<i>Figure 2 : Ultrastructure du sarcomère.</i> .....	4
<i>Figure 3 : Complexe F-actine, troponine et tropomyosine.</i> .....	5
<i>Figure 4 : Couplage excitation-contraction du muscle squelettique.</i> .....	6
<i>Figure 5 : Glissement des filaments au cours de la contraction musculaire.</i> .....	7
<i>Figure 6 : Les trois modes de contraction du muscle strié squelettique.</i> .....	8
<i>Figure 7 : Voie motrice cortico-spinale</i> .....	12
<i>Figure 8 : représentation visuelle de l'irradiation motrice</i> .....	14
<i>Figure 9 : Sens des mots clés avec l'utilisation des opérateurs booléens</i> .....	17

## **Table des tableaux**

<i>Tableau I : Les différents types de muscles du corps Humain et leurs caractéristiques anatomiques et fonctionnelles.</i> .....	2
<i>Tableau II : Les différents mode de contraction du muscle strié squelettique.</i> .....	8
<i>Tableau III: Mots clés de la question PICO et leur traduction anglaise.</i> .....	17
<i>Tableau IV: Mots clés de la question de recherche et leur traduction anglaise.</i> .....	17
<i>Tableau V: récapitulatif des équations de recherches utilisées</i> .....	18
<i>Tableau VI : Études exclues et raisons d'exclusion.</i> .....	22
<i>Tableau VII : Synthèse des études incluses.</i> .....	26
<i>Tableau VIII : Synthèse des biais présents dans les études incluses, d'après l'échelle PEDro.</i> .....	28
<i>Tableau IX : Synthèse des biais présents dans chaque article.</i> .....	29
<i>Tableau X : Extraction des résultats de l'étude de Tseng et al.</i> .....	31
<i>Tableau XI : Résultats intra-groupe de l'étude de Valdès et al.</i> .....	32
<i>Tableau XII : Extraction des résultats de l'étude de Valdès et al.</i> .....	33
<i>Tableau XIII : Extraction des résultats de l'étude de Sato et al.</i> .....	34
<i>Tableau XIV : Calculs des écart-types de l'étude de Coratella et al.</i> .....	35
<i>Tableau XV : Extraction des données de l'étude de Coratella et al.</i> .....	35
<i>Tableau XVI : Synthèse des résultats obtenus dans les trois études comparant excentrique et concentrique.</i> ..	39
<i>Tableau XVII : Synthèse des résultats obtenus dans les trois études comparant excentrique et concentrique/excentrique couplé</i> .....	41
<i>Tableau XVIII : Qualité de preuve des études incluses</i> .....	44
<i>Tableau XIX : Grille d'évaluation AMSTAR-2 de la qualité méthodologique de la revue de littérature</i> .....	47

## 7 Annexes

Annexe 1 : Échelle PeDro

Annexe 2 : Grille du niveau de preuve selon l'HAS

Annexe 3 : Grille de grade des recommandations selon l'HAS

## 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.

### 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 selon l'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 de grade des recommandations selon l'HAS

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>

- **BÉNÉFICES DU TRAVAIL MUSCULAIRE EXCENTRIQUE DANS LE PHÉNOMÈNE D'ÉDUCATION CROISÉE.**
- **BENEFITS OF ECCENTRIC MUSCLE TRAINING IN CROSS-EDUCATION PHENOMENON.**

### **Résumé :**

**Introduction :** L'entraînement en résistance unilatéral augmente la force du muscle homologue controlatéral par l'effet d'éducation croisée. Cette technique peut être utilisée chez les patients atteints de troubles unilatéraux, soumis à une immobilisation ou une limitation de mouvement. Trouver un protocole efficace pour maximiser le gain de force par éducation croisée est un enjeu clé pour l'application en pratique clinique.

**Objectif :** Déterminer les bénéfices apportés par le mode de contraction excentrique dans le phénomène d'éducation croisée, par rapport à d'autres modes de contraction.

**Méthode :** Les bases de données PubMed, PEDro et Cochrane ont été investiguées. Les études incluses ont été publiées après 2020, et répondent aux critères PICO. L'échelle PEDro a été utilisée afin d'évaluer la qualité méthodologique des études incluses.

**Résultats :** Quatre essais cliniques ont été analysés, dont trois étaient randomisés. Dans toutes les études, le groupe « excentrique » a enregistré une hausse plus importante de la force maximale isométrique des muscles non entraînés, par rapport aux groupes comparateurs.

**Discussion :** Les interprétations qui en découlent restent à l'état hypothétique en raison des biais des limites potentiels de la revue. Elles s'accordent à dire que la contraction musculaire excentrique est responsable d'un transfert de force controlatéral plus important qu'un autre type de contraction. Des recherches cliniques supplémentaires, avec de meilleurs niveaux de preuves sont nécessaires pour confirmer ces hypothèses.

### **Abstract:**

**Background:** Unilateral resistance training increases muscle strength of the contralateral homologous muscle by the cross-education effect. This technique can be used in patients with unilateral disorders, subject to immobilization or motion limitation. Finding an effective protocol to maximize cross-education strength gain is a key issue for application in clinical practice.

**Objectives:** To determine the benefits provided by the eccentric contraction mode in cross-education, compared to other contraction modes.

**Methods:** Pubmed, PEDro and Cochrane databases were investigated. The included studies were published after 2020 and meet the PICO criteria. The PEDro scale was used to assess the methodological quality of the included studies.

**Results:** Four clinical trials were analyzed, three of them were randomized. In all studies, the "eccentric" group recorded a greater increase in maximal isometric strength of the untrained muscles, compared to the other comparator groups.

**Discussion:** The resulting interpretations remain hypothetical because of the potential limitations of the review. They agree that eccentric muscle contraction is responsible for a more significant contralateral force transfer than other types of contraction. Additional clinical research with higher levels of evidence is needed to confirm these hypotheses.

**Mots clés :** éducation croisée, entraînement en résistance unilatéral, excentrique/concentrique, force musculaire.

**Keywords:** cross-education, unilateral resistance training, eccentric/concentric, muscular strength.