

M1 UE1 E3 - Performance: de l'athlète jusqu'au muscle

20h CM + 10h Tp



6h CM: Adaptations neuromusculaires par Electrostimulation

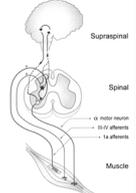
Maria Papaïordanidou

maria.papaïordanidou@univ-montpl.fr

CM1

Plan

1. La contraction musculaire
2. La transmission de l'information
3. L'Electrostimulation
 - 3.1. Considérations générales
 - 3.2. Réponses aiguës du système neuromusculaire à l'ES
 - 3.2.1. Réponses immédiates
 - 3.2.2. La fatigue neuromusculaire
 - 3.2.3. Réponses retardées
 - 3.3 Réponses chroniques du système neuromusculaire à l'ES
 - 3.3.1. Effets sur la capacité de production de force
 - 3.3.2. Adaptations centrales
 - 3.3.3. Adaptations périphériques
4. Applications



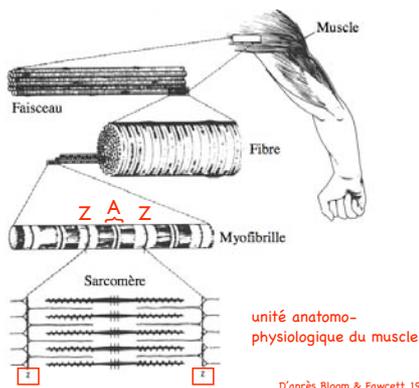
1. La contraction musculaire

- 1.1. Les propriétés fonctionnelles du muscle squelettique
- 1.2. L'organisation du muscle squelettique
- 1.3. Les myofilaments
- 1.4. La théorie des filaments glissants
- 1.5. La secousse musculaire

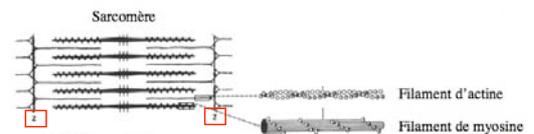
Propriétés fonctionnelles du muscle squelettique

- excitabilité : répondre à des stimuli
 - contractilité : se raccourcir
 - extensibilité: s'étirer
 - élasticité : retourner à la longueur de repos
- siège: la fibre musculaire

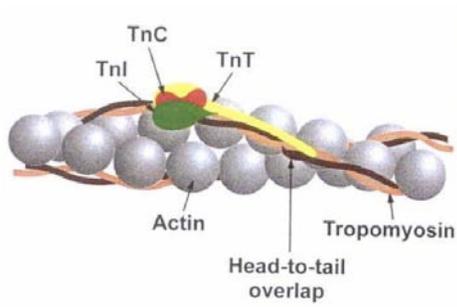
Organisation du muscle squelettique



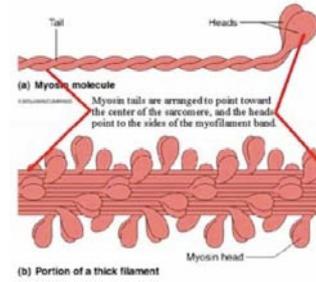
Organisation du muscle squelettique



Filament fin



Filament épais

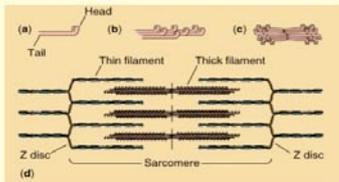


Contraction musculaire

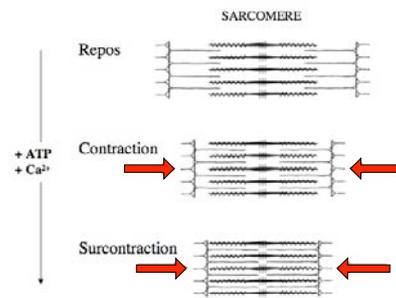
Théorie de la contraction par glissement des filaments

Durant la contraction, les filaments minces glissent sur les filaments épais de sorte que l'actine et la myosine se chevauchent davantage

- formation de ponts transversaux entre les filaments
- réduction de la distance entre les lignes Z du sarcomère

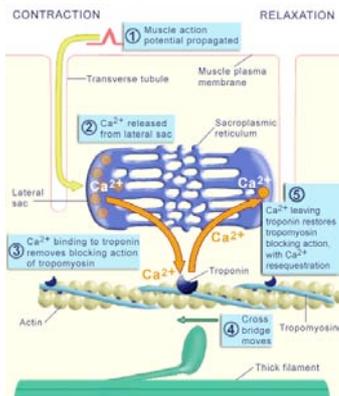


Théorie de glissement des myofilaments

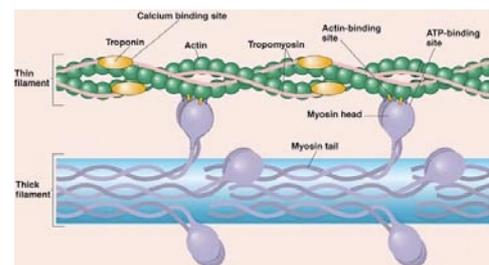


Hanson & Huxley, 1955

Contraction musculaire

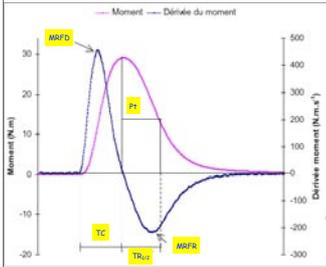


Ponts actine-myosine (cross bridge)



La secousse musculaire

Moment évoqué par une simple stimulation du **nerf moteur**



Pt = Nb de ponts A-M formés (ou force des ponts)

TC = Fonctionnement du réticulum sarcoplasmique (sa capacité à libérer rapidement le Ca^{2+})

TR_{Ca} = Captage du calcium

$MRFD$ = Vitesse de formation des ponts (liée à l'activité de la myosine ATPase)

$MRFR$ = Vitesse de détachement des ponts

Indice du couplage excitation-contraction et de l'appareil contractile

2. La transmission de l'information

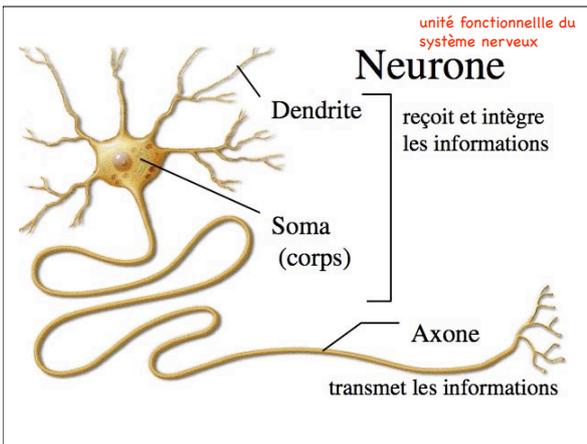
2.1. Le Potentiel de Repos

2.2. Le Potentiel d'Action

2.3. L' Unité Motrice

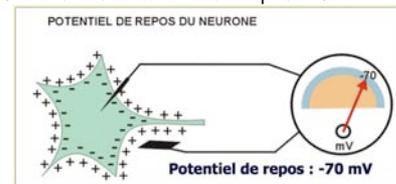
2.4. La jonction neuromusculaire

2.5. L'onde M



Le potentiel de repos

Il existe une **différence de potentiel** entre le milieu **intracellulaire** du neurone et le milieu **extracellulaire** qui l'entoure

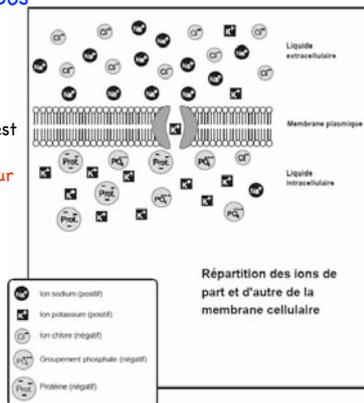


Expliqué par :

- différence de **concentration en ions** de la part et d'autre de la membrane
- perméabilité** de la membrane à ces ions
- présence de **pompes**: maintenir la différence de concentration en ions

Le potentiel de repos

Au repos la membrane est polarisée: chargée **positivement à l'extérieur** et **négativement à l'intérieur**

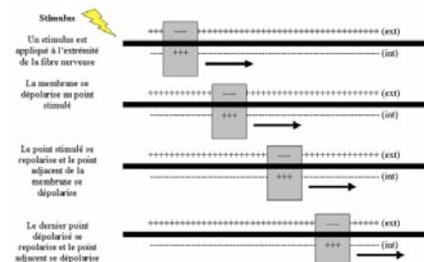


Répartition des ions de part et d'autre de la membrane cellulaire

- Ion sodium (positif)
- Ion potassium (positif)
- Ion chlore (négatif)
- Groupe phosphate (négatif)
- Protéine (négatif)

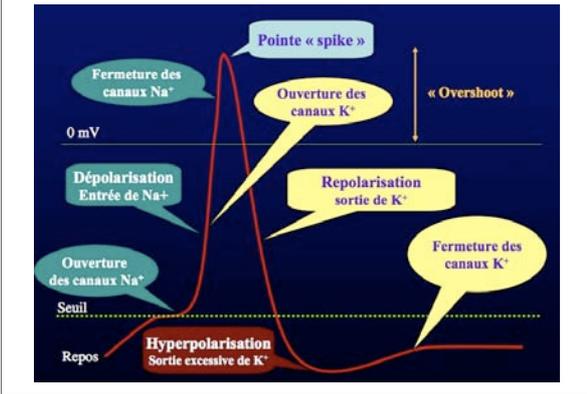
Le potentiel d'action (PA)

Le Potentiel d'Action est une **inversion temporaire** de la polarisation de la membrane en réponse à un stimulus



Enflax nerveux : Propagation, de proche en proche, le long de la membrane, d'un potentiel d'action déclenché par un stimulus.

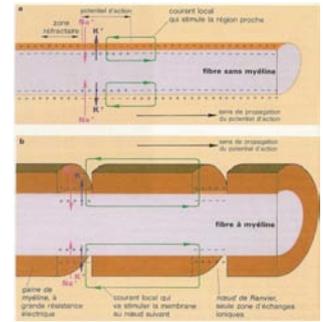
Le potentiel d'action (PA)



Le potentiel d'action (PA)

La vitesse de propagation du PA dépend de:

- diamètre de la fibre
- présence de myéline
- conduction saltatoire

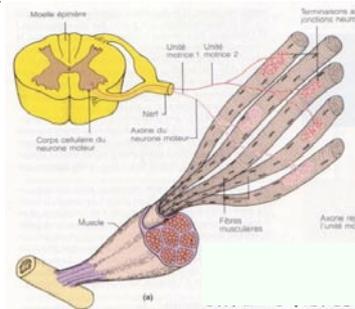


L'unité motrice (UM)

composée par le motoneurone α , son axone moteur et les fibres musculaires qu'il innerve

• chaque motoneurone α innerve plusieurs fibres musculaires (ramifications de l'axone moteur)

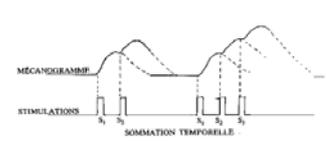
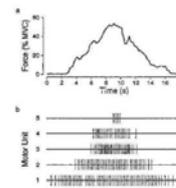
• chaque fibre musculaire n'est innervée que par une terminaison axonale



L'unité motrice (UM)

Recrutement spatial

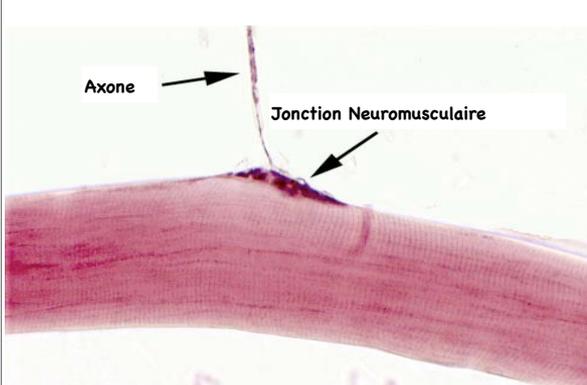
Recrutement temporel



• nb d'UM recrutées pour augmenter la force développée

• fréquence de décharge des UM recrutées

La jonction neuromusculaire



La jonction neuromusculaire

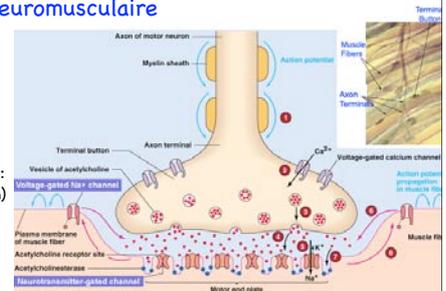
• Influx nerveux provenant du motoneurone

• Libération du neurotransmetteur : l'acétylcholine (Ach)

• Fixation sur les récepteurs nicotiniques

• Influx nerveux le long de la fibre musculaire

• contraction musculaire



L'onde M

Potentiel d'action "global" du muscle



Réponse électrique du muscle suite à une stimulation du nerf moteur (durée = 1-3 ms)

Accompagnée de la réponse mécanique avec une latence de 50 ms (durée variable)

Indice

- * efficacité de la transmission neuromusculaire
- * efficacité de la propagation du signal le long du sarcolemme

Hicks et McComas, 1989

3. L'Electrostimulation (ES)

3.1. Considérations générales

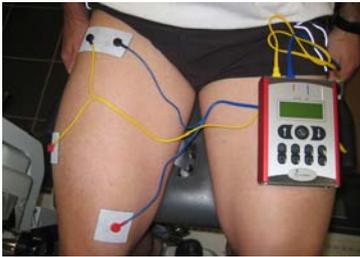
3.1.1 Historique

3.1.2. Paramètres d'un programme d'ES

3.1.3. Bases physiologiques de l'ES

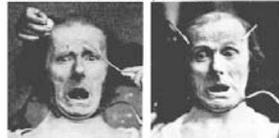
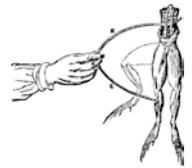
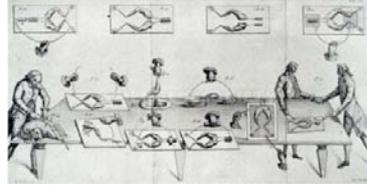
L'Electrostimulation (ES)

Activation artificielle via **courant électrique** appliqué au niveau des surfaces musculaires au moyen d'électrodes de surface



ES - Historique

Galvani (1792) - Réaction des pattes de grenouille après stimulation électrique de la colonne vertébrale



Duchenne de Boulogne (1806-1875)

Stimulation des muscles du visage



électrodes à la surface de la peau

ES - Historique

Depuis le début du XX^{ème} siècle :

- Lutter contre l'**atrophie musculaire** des muscles dénervés
- Dans les programmes de **réadaptation** pour **suppléer** les **exercices volontaires** (avant que ceux-ci ne puissent être pratiqués)
- **limitation des effets néfastes** sur le système neuromusculaire d'une période d'immobilisation après une intervention chirurgicale

Depuis 1971 :

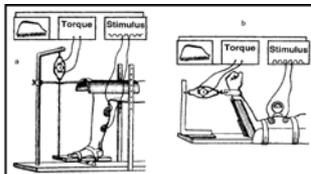
- Utilisation chez le **sportif** pour **améliorer** la **performance**



Protocole d'entraînement de la force (19 jours) du triceps sural et du biceps brachial pour des lutteurs



force



ES - Utilisation

Aujourd'hui:

Activités :

- Tennis (Wolf et al. 1989)
- Natation (Pichon et al. 1995)
- Athlétisme (Willoughby et al. 1998)
- Haltérophilie (DeLitto et al. 1989)
- Basket (Maffioletti et al. 2000)
- Volley (Malatesta et al. 2002)
- Hockey glace (Brocherie et al. 2005)
- Rugby (Babault et al. 2007)



Populations :

- Sujets hypoactifs (sujets âgés, immobilisés) (Paillard et al. 2003)
- Sujets atteints de BPCO (Neder et al. 2002)
- Sujets insuffisants cardiaques (Deley et al. 2005)

Paramètres d'un programme d'ES

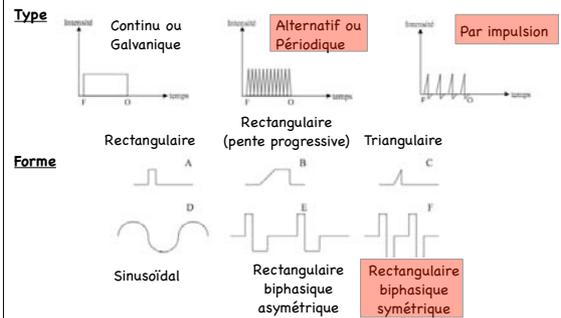
Un programme d'ES se caractérise par des paramètres de stimulation :

- Type et forme du courant
- Fréquence et durée de l'impulsion
- Le cycle de travail
- L'intensité de stimulation
- Les électrodes (positionnement, taille ..)



Paramètres d'un programme d'ES

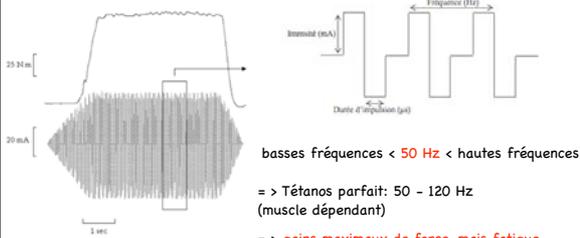
Type et forme du courant



Paramètres d'un programme d'ES

Fréquence et durée de l'impulsion

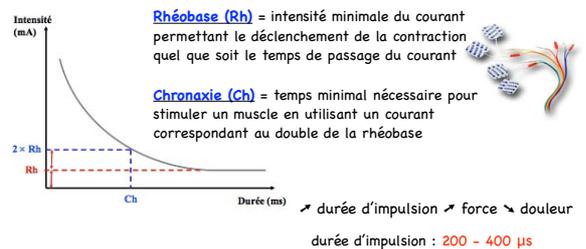
↔ inverse de la durée entre deux impulsions (Hz)



Paramètres d'un programme d'ES

Fréquence et durée de l'impulsion

Relation **curviligne** entre la **quantité d'électricité** fournie par le courant de stimulation et la **durée** nécessaire pour induire une réponse



Paramètres d'un programme d'ES

Le cycle de travail

Programme de stimulation =
Période de contraction (ON) + Période récupération (OFF)

$$\text{Cycle de travail} = \frac{\text{Temps de stimulation}}{\text{Temps total (contraction + récupération)}}$$

$$= \frac{5 \text{ s}}{5 \text{ s} + 20 \text{ s}} = \frac{5}{25} = 20\%$$

➤ Cycle de travail = 20/25%, mais modifiable en fonction de la fatigabilité du muscle étudié Luke, 1992

➤ Fatigue ↗ lorsque temps de travail ↗



Paramètres d'un programme d'ES

L'intensité de stimulation

↔ amplitude de l'onde du courant (mA)

Relation **linéaire** entre intensité de stimulation et force évoquée par ES

Hautes intensités de stimulation ↔ Douleur et inconfort

Notion d'intensité de stimulation maximale supportable (seuil **subjectif** de douleur)



Recruter un maximum d'UM et obtenir une contraction évoquée maximale

Limite de l'ES



Paramètres d'un programme d'ES

Les électrodes (positionnement, taille ..)

Notion de **point moteur**: position sur la surface de la peau en regard du muscle pour laquelle une contraction est évoquée avec une intensité de stimulation minimale

Delitto & Robinson, 1989



Positionnement de l'électrode ↔ dépend du muscle stimulé

Taille de l'électrode ↔ inversement proportionnelle à la densité du courant ↔ plus l'électrode est petite, plus l'inconfort est grand



Paramètres d'un programme d'ES

Un programme d'ES se caractérise par des paramètres de stimulation :

- Type et forme du courant : Courant alternatif, rectangulaire, biphasique symétrique
- Fréquence et durée de l'impulsion : F: 50-75 Hz // PW: 200-400 µs
- Le cycle de travail : 20-25 %
- L'intensité de stimulation : Seuil de douleur
- Les électrodes (positionnement, taille ..) : muscle dépendant



Paramètres d'un programme d'ES

Lors d'un programme de renforcement musculaire, ces paramètres ont un triple objectif :

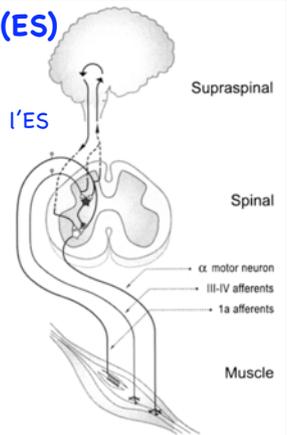
- Produire une contraction tétanique
- Limiter la douleur et l'inconfort du sujet
- Minimiser la fatigue



L'Electrostimulation (ES)

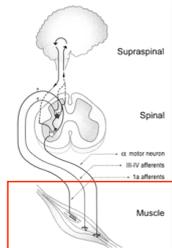
Bases physiologiques de l'ES

Recrutement des UM



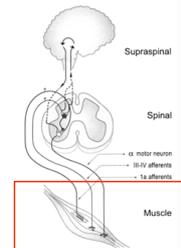
ES au niveau musculaire

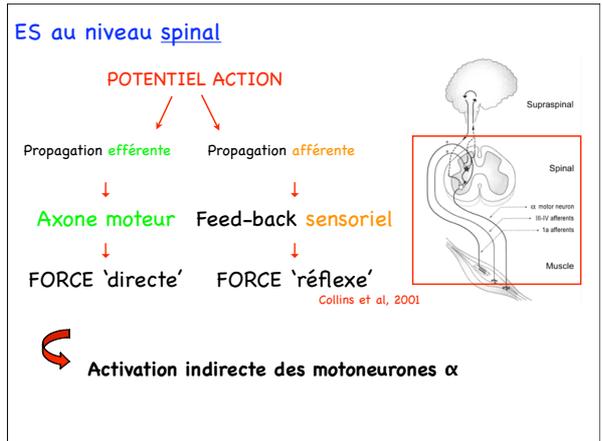
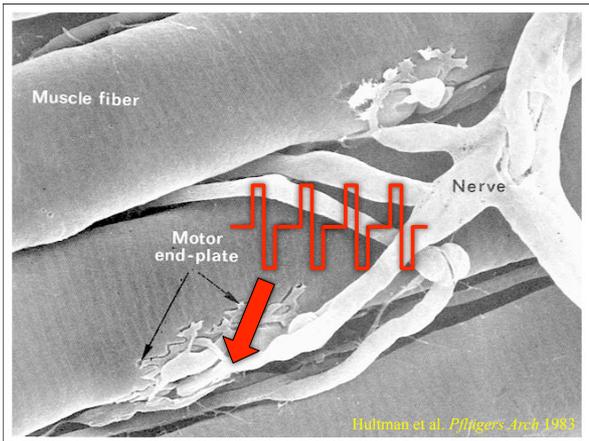
Impulsion électrique peau
↓
Potentiel action
↓
Jonction neuromusculaire
↓
Sarcolemme
↓
Interaction protéines contractiles



ES au niveau musculaire ✓

Impulsion électrique peau
↓
Potentiel action
↓
Jonction neuromusculaire
↓
Sarcolemme
↓
Interaction protéines contractiles





ES au niveau supraspinal

IRMf → Activation:

- Aire motrice primaire
- Aire sensorielle primaire
- Cingulate gyrus
- Thalamus
- Cervelet

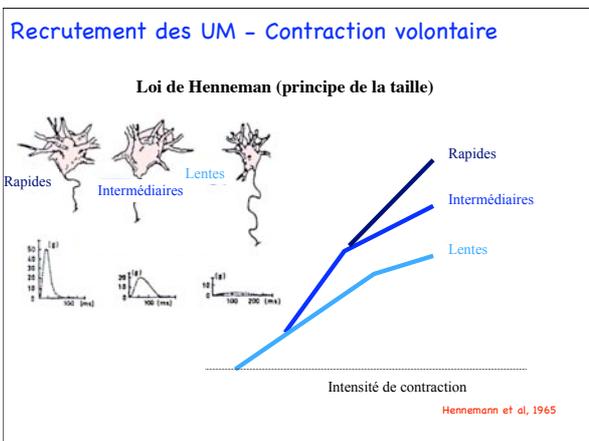
Smith et al, 2003

Hypothèse de travail

Les différents niveaux du système neuromusculaire sont sollicités au cours de contractions ES

↓

On devrait s'attendre à des modifications aiguës et chroniques de la fonction neuromusculaire avec utilisation ES



Recrutement des UM - Contraction volontaire

SNC → modulation fréquence de décharge des UM

⇔ recrutement **asynchrone**

SNC → rotation des UM actives

⇔ recrutement **spatialement non fixe**

Recrutement des UM - Contraction ES

Inversion de l'ordre de recrutement des UM ??

Relation inverse entre le diamètre des axones et leur résistance électrique
Eccles et al, 1958



Axones de gros diamètre (innervant fibres rapides) plus facilement excitables que les axones de petit diamètre

Axones de gros diamètre localisés préférentiellement à la surface du muscle (→ plus proche de l'électrode de stimulation)

Knight & Kamen, 2005

Recrutement des UM - Contraction ES

Recrutement non sélectif / aléatoire ??

Relation inverse (diamètre-résistance) observée pendant une stimulation directe du nerf moteur in vitro ou in situ mais pas pendant ES cutanée

Kim et al, 1995

IRM: Contractions électriquement évoquées peuvent recruter des fibres musculaires en profondeur dans le muscle, même à de bas niveaux de force

Adams et al, 1993

Recrutement des UM - Contraction ES

Recrutement non sélectif / aléatoire ??

Knafitz et al, 1990

Vitesse de conduction (VC) TA → Contraction Volontaire et ES



VC avec de l'intensité de stimulation à 79% (recrutement similaire au mode volontaire), 21% pas VC



pas de recrutement préférentiel des UM rapides, plutôt aléatoire

Recrutement des UM - Contraction ES

Recrutement non sélectif / aléatoire ??

Feiereisen et al, 1997

recrutement des UM TA → Contraction Volontaire et ES



~ 30% des essais sous ES ⇒ recrutement inversé par rapport au mode volontaire



pas de recrutement préférentiel des UM rapides, plutôt aléatoire

⇒ La taille et la disposition des terminaisons axonales pourraient influencer l'ordre d'activation des UM

Recrutement des UM - Contraction ES

Recrutement synchrone

↔ la fréquence imposée par ES ne peut pas être modulée

Recrutement spatialement fixe

↔ recrutement continu du même pool d'UM (pas de rotation)

Recrutement UM au cours d'ES

Le recrutement des UM au cours d'ES est différent par rapport au volontaire

1 - FIXE (niveau spatial)

2 - SYNCHRONE

3 - NON-SELECTIF

Gregory & Bickel, 2005

Références proposées

Binder-Macleod SA and Snyder-Mackler L. Muscle fatigue: Clinical implications for fatigue assessment and Neuromuscular Electrical Stimulation. *Phys Ther* 1993; 73: 902-10.

Collins DF. Central contributions to contractions evoked by tetanic neuromuscular electrical stimulation. *Exerc Sports Sci Rev* 2007; 35(3): 102-09

Feiereisen P, Duchateau J and Hainaut K. Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. *Exp Brain Res* 1997; 114: 117-23

Gregory CM and Bickel CS. Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. *Phys Ther* 2005; 85 (4): 358-64.

Jubeau M, Gondin G, Martin A, Sartorio A, Maffuletti NA. Random motor unit activation by electrostimulation. *Int J Sports Med* 2007; 28 (11): 901-04.

M1 UE1 E3 - Performance: de l'athlète jusqu'au muscle

20h CM + 10h Tp



6h CM: Adaptations neuromusculaires par Electrostimulation

Maria Papaïordanidou

maria.papaïordanidou@univ-montpl.fr

CM2

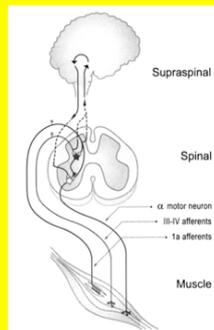
Bases physiologiques de l'ES

L'ES sollicite toute la chaîne de la production de force

supraspinal (cerveau)

spinal (motoneurone α)

périphérique (muscle)



Recrutement UM au cours d'ES

Le recrutement des UM au cours d'ES est différent par rapport au volontaire

1 - FIXE (niveau spatial)

Recrutement continu d'une même population d'UM (pas de rotation des UM recrutées)

2 - SYNCHRONE

La fréquence imposée aux UM demeure constante en ES et ne peut pas être modulée

3 - NON-SELECTIF

Aucun ordre de recrutement particulier (relatif à leur taille)

Gregory & Bickel, 2005

3. L'Electrostimulation (ES)

3.2. Réponses aiguës du système neuromusculaire à l'ES

3.2.1. Réponses immédiates

- ☹ Réponses métaboliques
 - ☹ Réponses hormonales
 - ☹ La douleur
- ⇨ Intervenant au cours de la séance d'ES

3.2.2. La fatigue neuromusculaire

- ☹ Fatigue centrale
 - ☹ Fatigue périphérique
- ⇨ Résultante de la séance d'ES

3.2.3. Réponses retardées

- ☹ Les douleurs
 - ☹ Les dommages musculaires
- ⇨ Intervenant les jours suivants la séance d'ES

3.2. Réponses aiguës du système neuromusculaire à l'ES

3.2.1. Réponses immédiates

- ☹ Réponses métaboliques
- ☹ Réponses hormonales
- ☹ La douleur

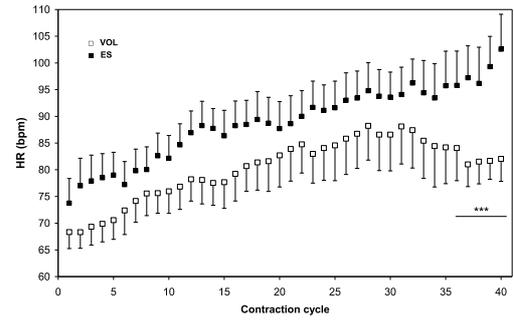
Séance typique



30-40 contractions
6 s ON - 20 s OFF
75 Hz - 400 μ s
Int. max tolérable

Réponses métaboliques

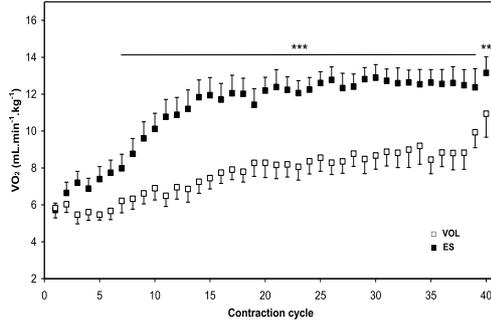
Fréquence cardiaque



*niveau de travail mécanique identique (force produite) Theurel et al, 2007

Réponses métaboliques

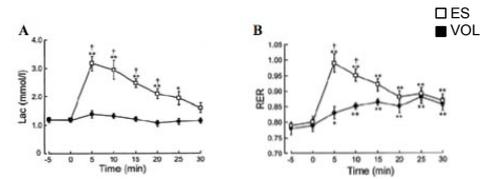
Consommation O₂



*niveau de travail mécanique identique (force produite) Theurel et al, 2007

Réponses métaboliques

Lactate et Quotient Respiratoire (RER)

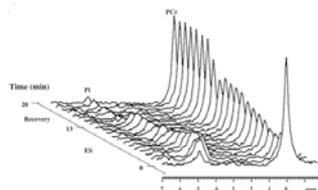


Evolution du lactate sanguin (A) et du quotient respiratoire (B) au cours d'une séance d'électrostimulation à 20 Hz (□) et d'un protocole volontaire (■) réalisés à un même niveau de consommation d'oxygène. Valeurs moyennes \pm erreur standard. (d'après Hamada et coll 2004)

*niveau de consommation d'oxygène identique Hamada et al, 2004

Réponses métaboliques

demande énergétique



	PCr Depletion, %	P/PCr Ratio	pH
Rest		0.06 \pm 0.02 ^{ns}	7.03 \pm 0.02 ^{ns}
VC-10%	6.4 \pm 3.6 ^{ns}	0.13 \pm 0.04 ^{ns}	7.04 \pm 0.07 ^{ns}
VC-20%	18.6 \pm 7.6 ^{ns}	0.26 \pm 0.12 ^{ns}	6.98 \pm 0.08 ^{ns}
VC-30%	41.9 \pm 11.0 [*]	0.66 \pm 0.34	6.90 \pm 0.09 ^{ns}
VC-40%	66.8 \pm 6.3 ^{ns}	1.50 \pm 0.55	6.83 \pm 0.12 nd
VC-50%	85.2 \pm 8.9 ^{ns}	6.85 \pm 8.61 ^{ns}	6.67 \pm 0.10
Exhaustion	87.9 \pm 9.1 ^{ns}	10.6 \pm 11.6 ^{ns}	6.64 \pm 0.11
ES 5 min	39.5 \pm 15.9	1.18 \pm 0.76	6.70 \pm 0.11
ES-max	53.7 \pm 17.8	1.38 \pm 1.14	6.69 \pm 0.11

Vanderthommen et al, 2003

Réponses métaboliques (conclusions)

ES vs. Volontaire

réponse métabolique plus importante

production d'énergie

glycolyse anaérobie
hydrolyse de la phosphocréatine

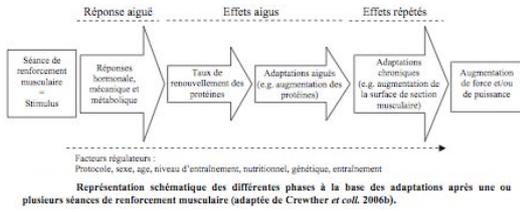
recrutement d'UMs

Réponses hormonales (peu étudiées)

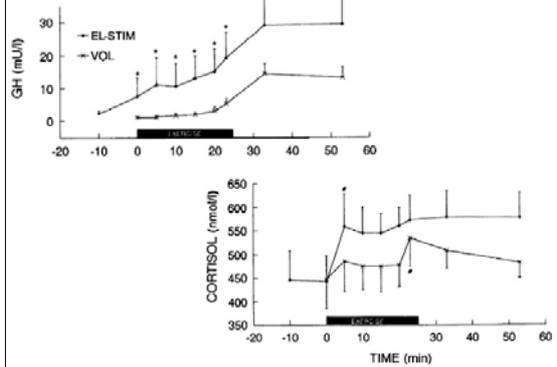
Réponse hormonale aiguë induite par l'exercice physique

⚡ facteur déterminant dans les **adaptations physiologiques** survenant à l'issue d'un entraînement

⚡ stimulus efficace pour l'**augmentation de la force** et de la **puissance musculaire**

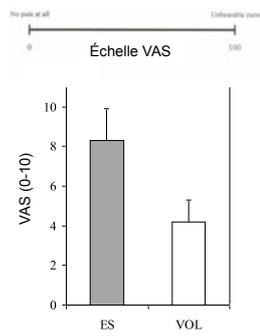


Réponses hormonales



Douleur et inconfort pendant ES

Limite de l'ES ⇒ seuil subjectif de la douleur



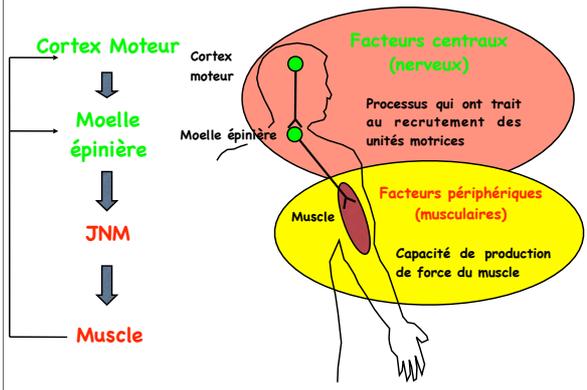
3.3. La fatigue neuromusculaire

3.3.1. Fatigue centrale

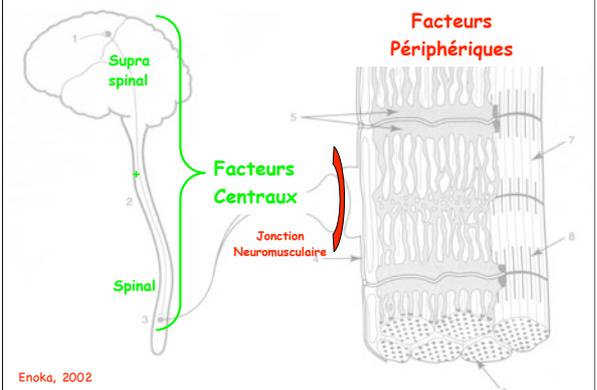
3.3.2. Fatigue périphérique



Chaîne de commande de la production de force



Chaîne de commande et sites potentiels de défaillance



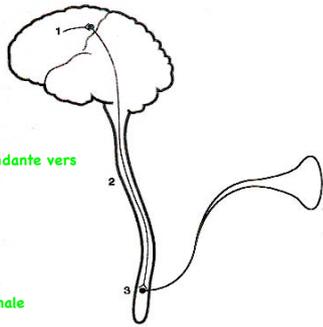
Chaîne de commande et sites potentiels de défaillance

Fatigue centrale

Activation du cortex moteur

Commande descendante vers les motoneurones

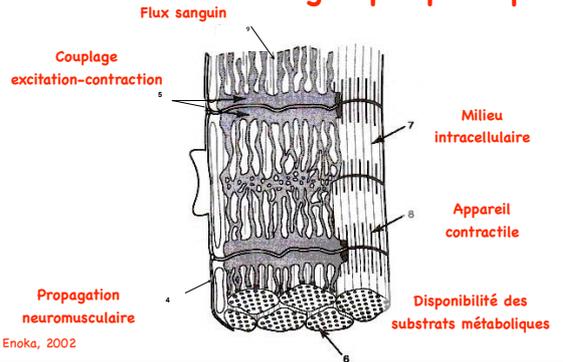
Excitabilité motoneuronale



Enoka, 2002

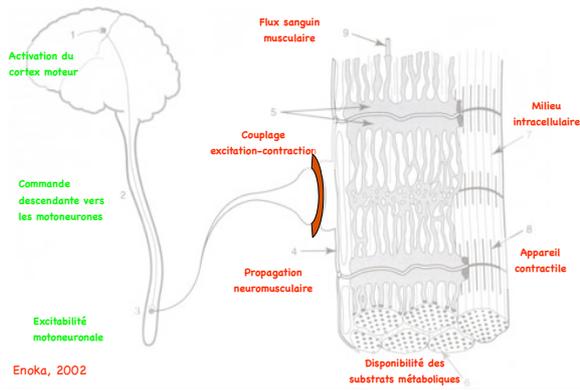
Chaîne de commande et sites potentiels de défaillance

Fatigue périphérique



Enoka, 2002

Chaîne de commande et sites potentiels de défaillance

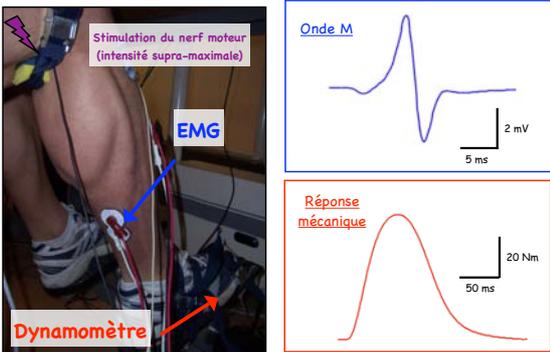


Enoka, 2002

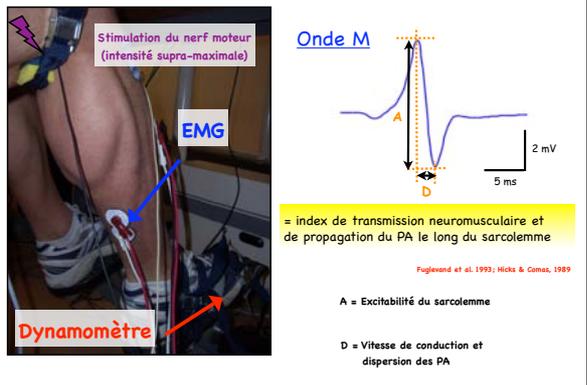
Méthodes d'investigation de la fatigue

Localisation anatomique	Mécanismes potentiels de fatigue	Techniques d'évaluation
	Excitabilité corticale	- Niveau d'activation volontaire - Activité EMG de surface (RMS) normalisée par l'amplitude de l'onde M
	Commande descendante vers les motoneurones	
	Excitabilité motoneuronale	Réflexe H de Hoffmann
	Transmission/propagation neuromusculaire	Propriétés de l'onde M
	Couplage excitation-contraction	Secousse musculaire (propriétés contractiles)

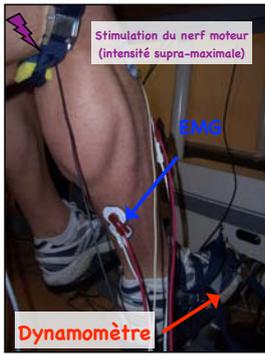
Facteurs périphériques - secousse musculaire



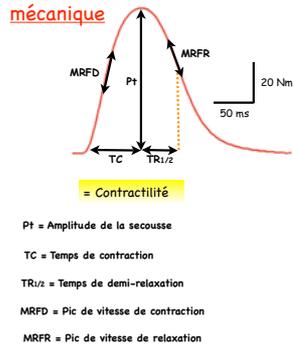
Facteurs périphériques - secousse musculaire



Facteurs périphériques - secousse musculaire



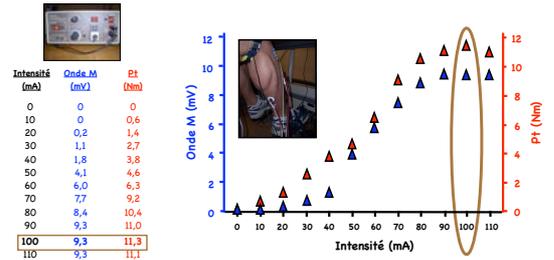
Réponse mécanique



= Contractilité

Courbe de recrutement

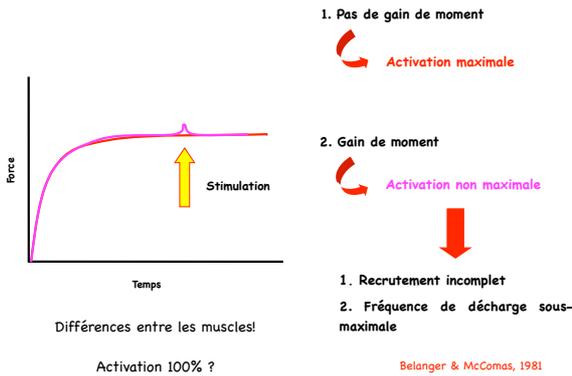
→ Recherche de l'intensité supra-maximale de stimulation



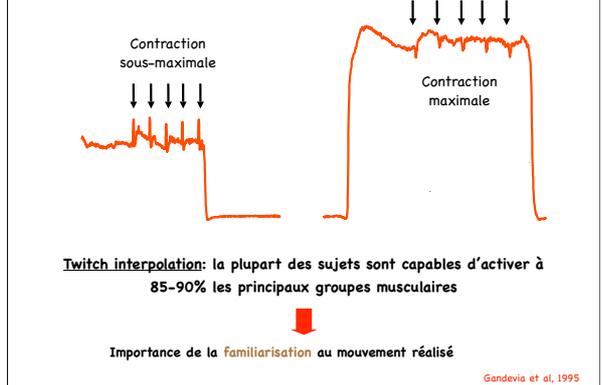
L'amplitude des réponses musculaire (Onde M) et mécanique (Pt) augmente avec l'intensité de stimulation jusqu'à une amplitude maximale (plateau).

Intensité supra-maximale (Mmax) = recrutement synchrone de toutes les unités motrices du muscle étudié (activation musculaire maximale)

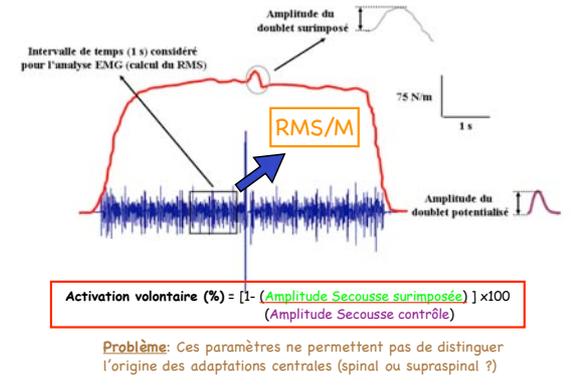
Facteurs centraux - Détection d'un déficit d'activation



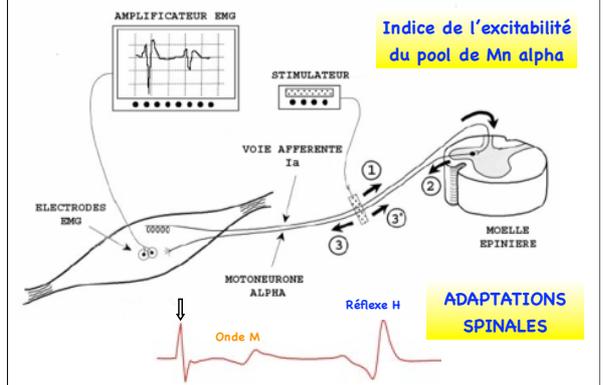
Facteurs centraux - Détection d'un déficit d'activation



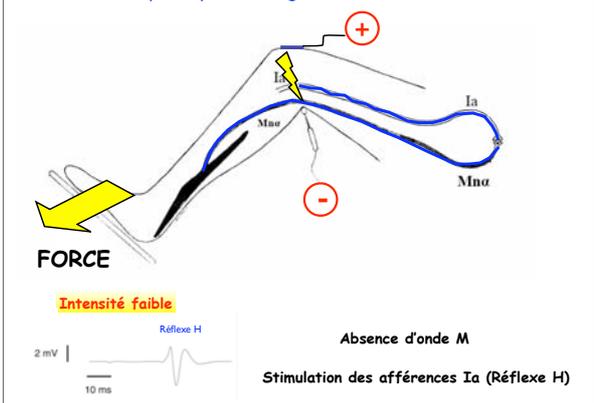
Facteurs centraux - Détection d'un déficit d'activation



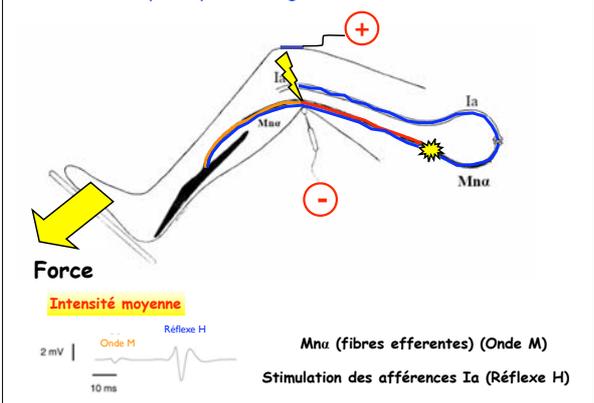
Le réflexe H



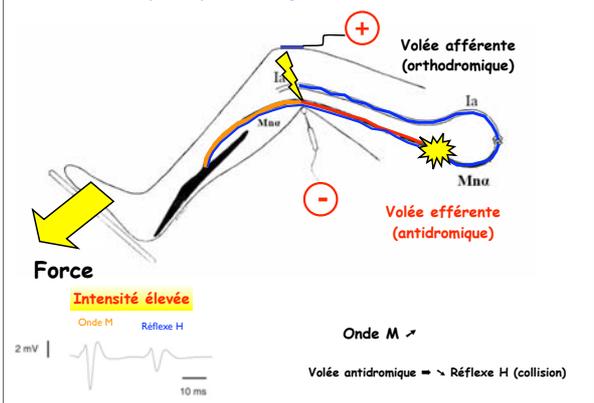
Le réflexe H : principe d'enregistrement



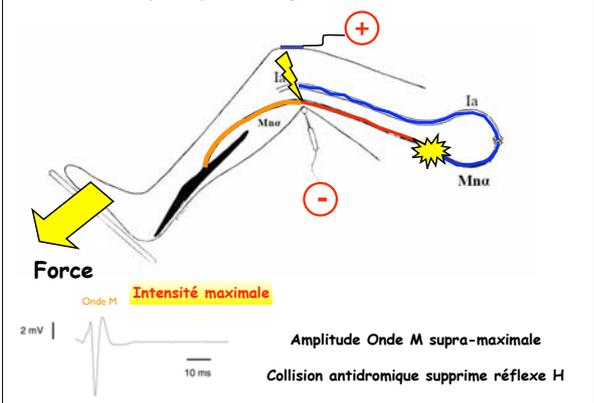
Le réflexe H : principe d'enregistrement



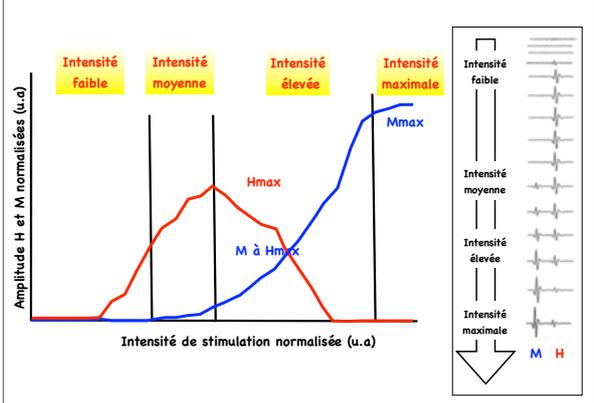
Le réflexe H : principe d'enregistrement



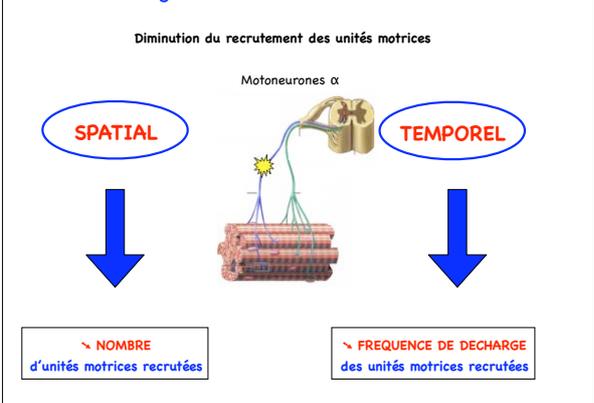
Le réflexe H : principe d'enregistrement



Le réflexe H: courbe de recrutement

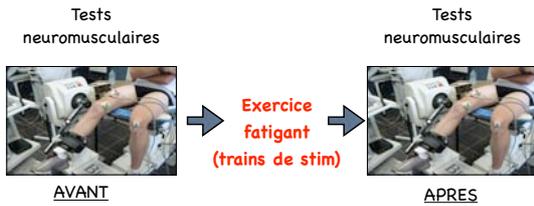


Effets de la fatigue centrale



Quantification de la fatigue neuromusculaire

Approche:



Quantification de la fatigue neuromusculaire

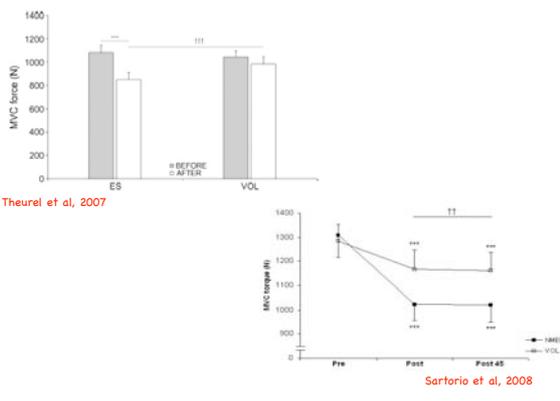
Moment

- volontaire max
- surimposé
- évoqué au repos

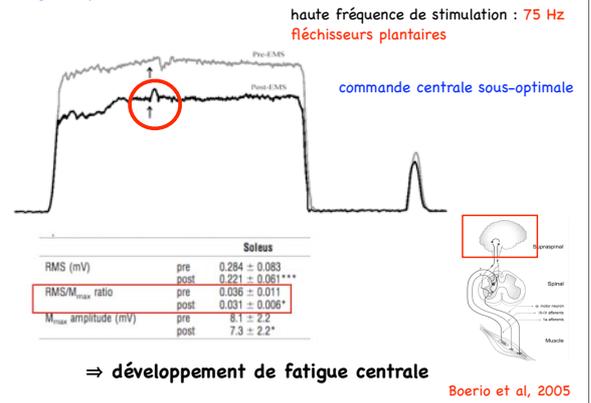
EMG surface

- volontaire max
- évoqué au repos
- moteur
- réflexe

Fatigue après ES

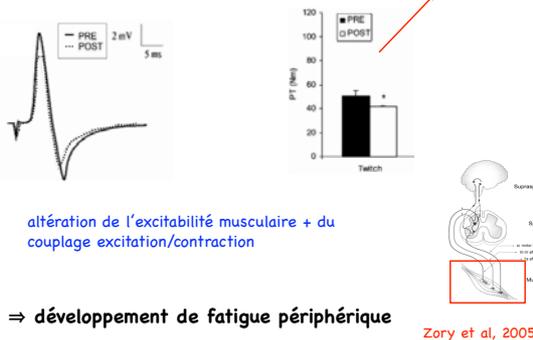


Fatigue après ES



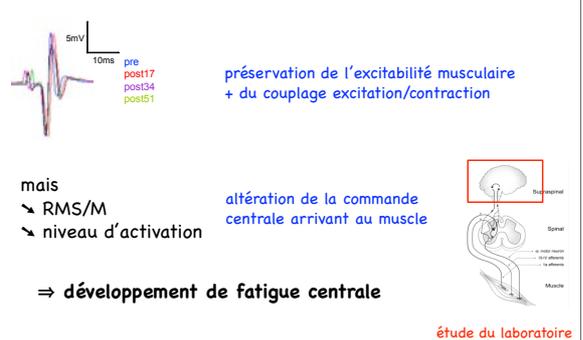
Fatigue après ES

haute fréquence de stimulation : 75 Hz
extenseurs du genou



Fatigue après ES

basse fréquence de stimulation : 30 Hz
fléchisseurs plantaires



Nature de fatigue après ES

fréquence de stimulation Darques et al, 2003

basse / haute fréquence



muscle étudié

muscle résistant à la fatigue / facilement fatigable



Références proposées

Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: Cellular mechanisms. *Physiol Rev* 2008; 88, 287-332

Boerio D, Jubeau M, Zory R, Maffiuletti NA. Central and peripheral fatigue after electrostimulation-induced resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37 (6): 973-78.

Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 2001; 81 (4): 1725-89.

Hamada T, Hayashi T, Kimura T, Nakao K, Moritani T. Electrical stimulation of human lower extremities enhances energy consumption, carbohydrate oxidation and whole body glucose uptake. *J Appl Physiol* 2004; 96: 911-16.

Vanderthommen M and Duchateau J. Electrical stimulation as a modality to improve performance of the neuromuscular system. *Exerc Sports Sci Rev* 35 (4): 180-85, 2007

Zory R, Boerio D, Jubeau M, Maffiuletti NA. Central and peripheral fatigue of the knee extensor muscles induced by electromyostimulation. *Int J Sports Med* 2005; 26: 847-53.

M1 UE1 E3 - Performance: de l'athlète jusqu'au muscle

20h CM + 10h Tp



6h CM: Adaptations neuromusculaires par Electrostimulation

Maria Papiordanidou

maria.papiordanidou@univ-montpl.fr

CM3

3. L'Electrostimulation (ES)

3.2. Réponses aiguës du système neuromusculaire à l'ES

3.2.1. Réponses immédiates

- Réponses métaboliques ⇨ Intervenant au cours de la séance d'ES
- Réponses hormonales
- La douleur

3.2.2. La fatigue neuromusculaire

- Fatigue centrale ⇨ Résultante de la séance d'ES
- Fatigue périphérique

3.2.3. Réponses retardées

- Les douleurs ⇨ Intervenant les jours suivants la séance d'ES
- Les dommages musculaires

Douleurs musculaires après ES

DOMS: Delayed Onset of Muscle Soreness

- sensation d'inconfort, de douleurs vives, intervenant suite à un exercice inhabituel *contractions excentriques
- dans les heures qui suivent l'effort, mais maximale entre 24 et 72 h post-exercice
- disparition en 7 à 10 jours

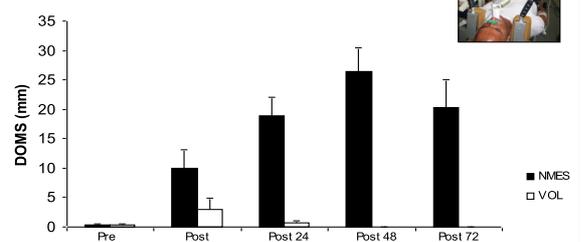
Expliqués par:

- l'acide lactique
- l'inflammation
- les dommages musculaires
- les dommages du tissu conjonctif
- les flux d'enzymes
- les spasmes musculaires

Cheung et al, 203

Douleurs musculaires après ES

Échelle VAS (0-50)



Moreau et al, 1995

Domages musculaires après ES

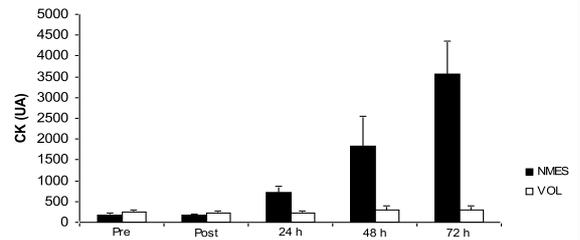
Associés à des atteintes de la composante contractile, plus particulièrement des stries Z



Marqueurs de la présence des dommages musculaires

- la force maximale volontaire
- l'amplitude articulaire
- les douleurs musculaires
- les enzymes musculaires (créatinekinase, CK)
- la circonférence musculaire

Domages musculaires après ES



3.2. Messages importants

Réponses aiguës du système neuromusculaire à l'ES

Coût métabolique exagéré

Fatigue aussi bien centrale que périphérique

Douleurs et dommages musculaires très importants = limite principale

3. L'Electrostimulation (ES)

3.3. Réponses chroniques du système neuromusculaire à l'ES

Plusieurs séances ES → Programme entraînement

- 3.3.1. Effets sur la capacité de production de force
- 3.3.2. Adaptations centrales
- 3.3.3. Adaptations périphériques

Programme entraînement ES

+2 séances/semaine

4-8 semaines

+20-30 contractions/séance

Isométrique vs. dynamique

Efficacité - différentes populations

Réhabilitation après intervention

Snyder-Mackler et al, 1991

Personnes âgées

Caggiano et al, 1994

Patients BPCO

Neder et al, 2002

Astronautes

Mayr et al, 1999

Athlètes - sportifs

Delitto et al, 1989

Maffiuletti et al, 2000; 2002

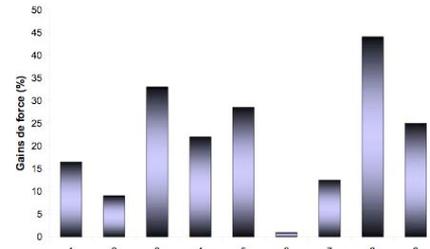


Efficacité - différents muscles

- **Quadriceps**
90% des études ES !
- **Triceps Sural**
Maffioletti et al, 2002
Cabric et al, 1987
- **Biceps Brachial (+ Triceps)**
Miller & Thépaut-Mathieu, 1993
- **Abdominaux**
Alon et al, 1992
- **Muscles main**
Duchateau & Hainaut, 1988



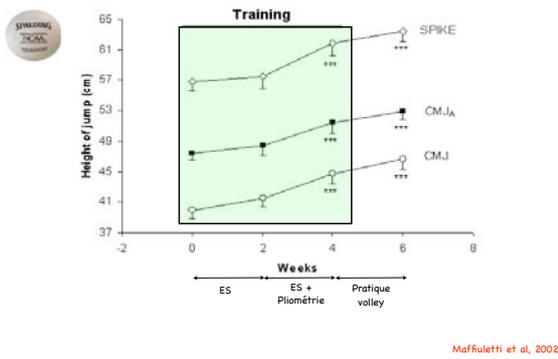
Efficacité ES - capacité de production de force



Gains de force isométrique à la suite d'un entraînement par ES réalisé sur le muscle quadriceps.
 (1) Currier & Mann 1983 ; (2) Herrera et coll. 2005 ; (3) Kubiak et coll. 1987 ; (4) Laughman et coll. 1983 ;
 (5) Maffioletti et coll. 2002b ; (6) Mohr et coll. 1985 ; (7) Parker et coll. 2003 ; (8) Selkowitz 1985 ; (9)
 Stefanovska & Vodovnik (1988)

- ⇒ Gains variables (0-45% !!)
- Durée du programme
- Paramètres des séances

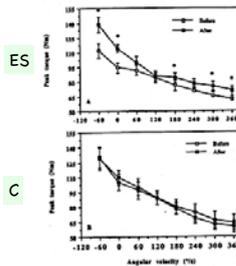
Efficacité ES - détente verticale



Maffioletti et al, 2002

Efficacité ES - natation

1 groupe contrôle (C) 3 sem (12 min, 3 x/sem)
 1 groupe électrostimulation (ES) 80 Hz - 6s-20s (300 µs) latissimus dorsi



- Isométrique => +21%
- Excentrique => +24% (-60°/s)
- Concentrique => +10% (180°/s)
- => +14% (300°/s)
- => +15% (360°/s)

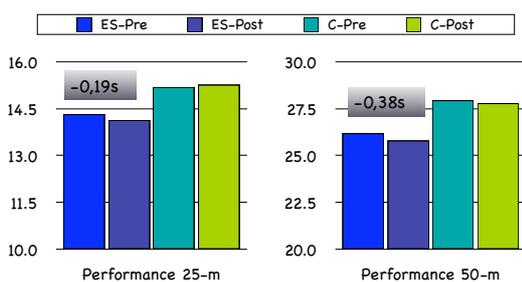
=> Pas de gains

Figure 1. Relationship between the peak torque and the angular velocity before and after training for the electrostimulated group (ES) and the control group (C). * denotes significance of <math>p < 0.05</math>. Values are mean and standard error of estimate.

Pichon et al, 1995

Efficacité ES - natation

1 groupe contrôle (C) 3 sem (12 min, 3 x/sem)
 1 groupe électrostimulation (ES) 80 Hz - 6s-20s (300 µs) latissimus dorsi



Pichon et al, 1995

Efficacité ES vs. VOL

Références	Muscle	ES	VOL	Comparison ES/VOL
Laughman et coll. (1983)	QF	+22%	+18%	ES = VOL
McMiken et coll. (1983)	QF	+22%	+25%	ES = VOL
Currier & Mann (1983)	QF	+16%	+30%	ES = VOL
Miller & Thépaut-Mathieu	BB	+30%	+28%	ES = VOL
Cannon & Cafarelli (1987)	AP	+15%	+15%	ES = VOL
Kubiak et coll. (1987)	QF	+33%	+43%	ES < VOL
Mohr et coll. (1985)	QF	+1%	+15%	ES < VOL
Davies et coll. (1985)	PID	-11%	+33%	ES < VOL
Duchateau & Hainaut (1988)	AP	+13%	+21%	ES < VOL
Colson et al (2009)	BB	+38%	+15%	ES > VOL

ES n'est pas plus efficace que VOL pour augmenter la force

Efficacité ES vs. VOL

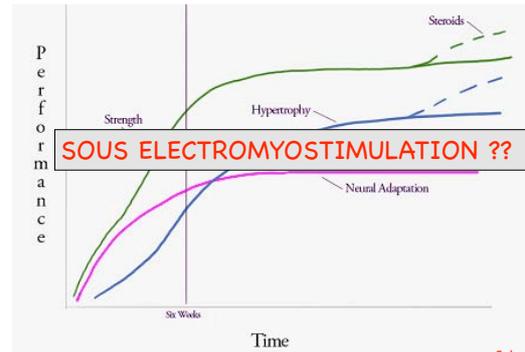
mais,

efficace pour minimiser les pertes de force à la suite d'une période d'immobilisation

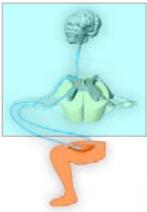


accélération des processus de réhabilitation

Adaptations neuromusculaires après entraînement de force volontaire

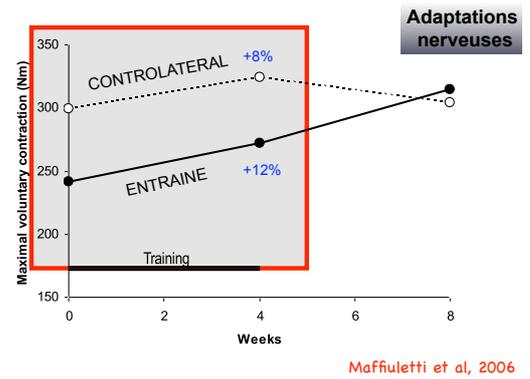


Adaptations nerveuses après ES



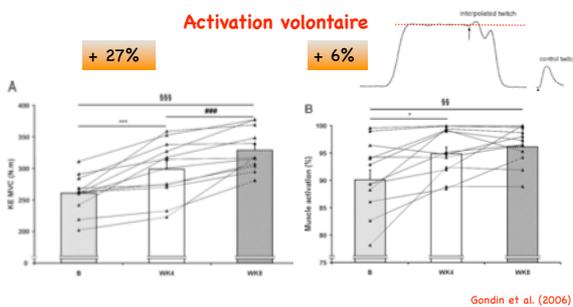
- Effet controlatéral
- Niveau activation et EMG
- Excitabilité réflexe

Effet controlatéral - Cross education effect



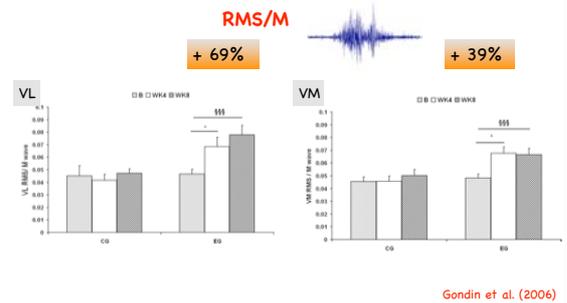
Activation musculaire

1 groupe contrôle (C) 32 sessions (18 min, 4/sem pd 8 sem)
75 Hz - 6s-25s (200 µs)
1 groupe ES Vastus lateralis & medialis



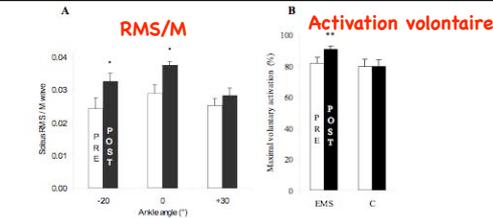
Activation musculaire

1 groupe contrôle (C) 32 sessions (18 min, 4/sem pd 8 sem)
75 Hz - 6s-25s (200 µs)
1 groupe ES Vastus lateralis & medialis



Activation musculaire

1 groupe contrôle (C) 16 sessions (18 min, 4j/sem, 4 sem)
75 Hz - 4s-20s (400 µs)
1 groupe ES
Soleus and gastrocnemius

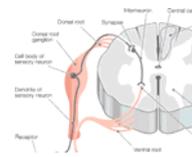
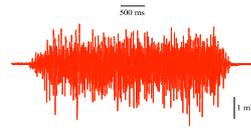


(A) Activité électrique du muscle soleaire normalisée par rapport à l'amplitude de l'onde en fonction de la position angulaire; (B) Niveau d'activation maximal volontaire des muscles fléchisseurs plantaires évalué à l'aide de la technique de twitch interpolation pour le groupe entrainé (EMS) et le groupe contrôle (C) avant (PRE) et après (POST) 4 semaines d'entraînement par ES. La position d'entraînement au

Origine spinale et/ou supraspinale des adaptations ??
Maffioletti et al, 2002

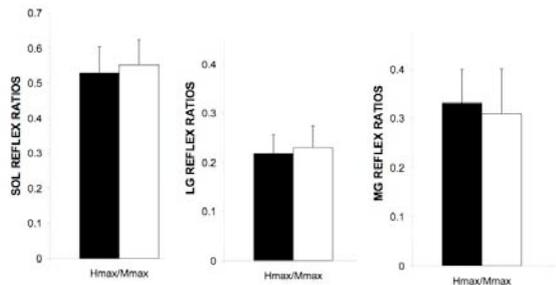
Activation musculaire

EMG et/ou Niveau d'activation



Ne distingue pas les adaptations supraspinales et/ou spinales

Excitabilité réflexe



Gondin et al. (2006)

↳ adaptations dues à une meilleure commande centrale provenant des centres supraspinaux

Adaptations périphériques après ES



- Propriétés contractiles + électriques du muscle
- Hypertrophie musculaire
- Architecture musculaire

Adaptations périphériques après ES



	EMS	
	Before	After
M-wave amplitude, mV		
Soleus	9.46 ± 2.77	8.99 ± 1.93
MG	6.60 ± 2.56	5.86 ± 2.39
LG	5.51 ± 3.42	5.06 ± 2.84
Twitch properties		
F ₀ , N·m	20.99 ± 4.29	19.89 ± 4.19
CT, ms	128.38 ± 11.96	128.53 ± 7.88
HRT, ms	90.28 ± 16.68	93.81 ± 17.34
RD, N·m·ms ⁻¹	0.300 ± 0.053	0.285 ± 0.065
RR, N·m·ms ⁻¹	0.185 ± 0.038	0.167 ± 0.042

↳ pas de changement des propriétés contractiles + électriques du muscle
Maffioletti et al, 2002

Adaptations périphériques après ES

3-4 semaines → pas d'hypertrophie

- Surface fibres I et IIb inchangée
Eriksson et al, 1981; Kim et al, 1995
- Minime, et non significative
Perez et al, 2002
- Propriétés contractiles inchangées
Equipe de Dijon (5 études différentes)

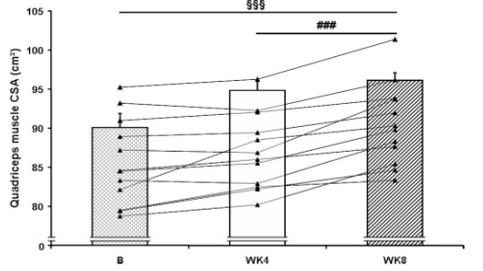
8 semaines → hypertrophie

- ES (+10%) > VOL (+4%) - 9 semaines
Ruther et al, 1995
- +12% - 8 semaines
Stevenson & Dudley, 2001
- +6% - 8 semaines
Gondin et al, 2005



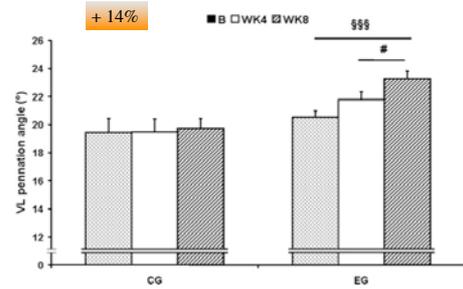
Adaptations périphériques après ES - Hypertrophie

Hypertrophie significative



Gondin et al, 2005

Adaptations périphériques après ES - Architecture



Gondin et al, 2005

3.3. Messages importants

Réponses chroniques du système neuromusculaire à l'ES

- ES permet d'améliorer la force maximale
- => Adaptations nerveuses (↗ VA, RMS/M, réflexe H)
- => Adaptations musculaires (↗ surface de section, angle de pennation)

Adaptations très similaires à l'entraînement volontaire

4. Applications

ES pour le patient hypoactif

Personne âgée

Immobilisation après intervention

Lésion médullaire

(Astronaute)

(BPCO)

(Insuffisant cardiaque)



Entraînement ES pour personne âgée

Amélioration significative équilibre statique après 4 semaines ES des muscles fléchisseurs dorsaux



REDUCTION DU RISQUE DE CHUTE

Amiridis et al, 2005

Entraînement ES pour patient immobilisé

- 6 semaines, 2-3 j/sem
- 1 groupe : exercice volontaire
- 1 groupe : exercice volontaire + ES

↗ force pour groupe ES (suivi 6 mois) !
Stevens et al, 2004

Session	Weeks After Surgery	Force (Involved Limb) (fr-lb)
IE=	3	70
1	3	70
2	4	100
3	4	100
4	4	90
5	5	110
6	5	115
7	6	110
8	6	120
9	6	105
10	7	110
11	7	100%
12	8	120
18	10	130

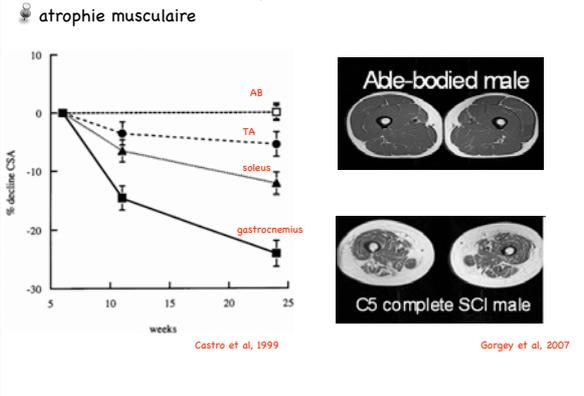
ES rajoutée au programme typique réhabilitation

3 j/sem
6 semaines

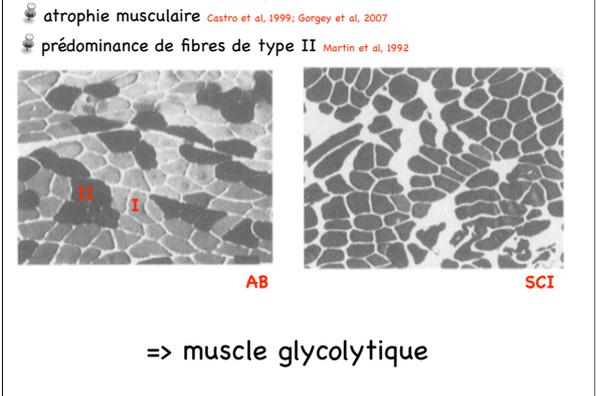


Lewek et al, 2001

Blessé médullaire - Adaptations musculaires

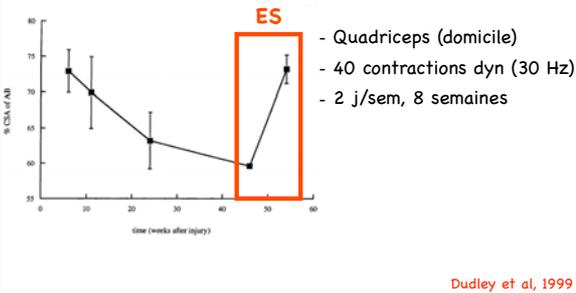


Blessé médullaire - Adaptations musculaires



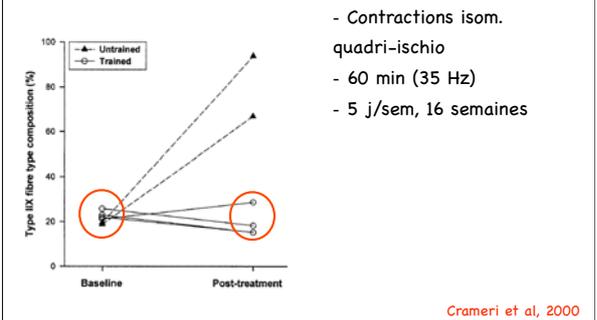
Entraînement ES pour blessé médullaire

Pour prévenir **atrophie musculaire**



Entraînement ES pour blessé médullaire

Pour prévenir **modifications type fibres**



Entraînement ES pour autres populations

Astronaute ➔ limitation de la perte de force après exposition à la microgravité Duvoisin et al, 1989

BPCO ➔ pas de modification de la fonction pulmonaire, mais \nearrow force, \searrow fatigabilité Neder et al, 2002

Insuffisant cardiaque ➔ modification type de fibres, modification activité enzymatique Nuhr et al, 2004

4. Messages importants

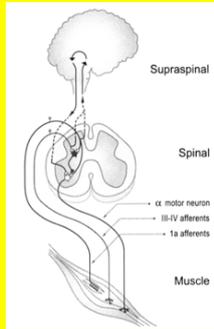
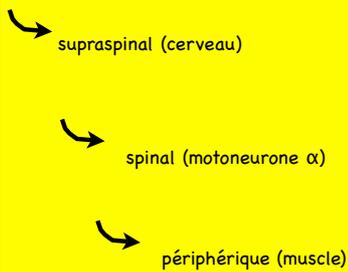
Stratagème judicieux pour limiter effets immobilisation chez différentes populations pathologiques

Économie de temps

Technique pour suppléer l'activation volontaire chez des populations hypoactives

Bases physiologiques de l'ES

L'ES sollicite toute la chaîne de la production de force



Recrutement UM au cours d'ES

Le recrutement des UM au cours d'ES est **différent** par rapport au volontaire

1 - FIXE (niveau spatial)

Recrutement continu d'une même population d'UM (pas de rotation des UM recrutées)

2 - SYNCHRONE

La fréquence imposée aux UM demeure constante en ES et ne peut pas être modulée

3 - NON-SELECTIF

Aucun ordre de recrutement particulier (relatif à leur taille)

Gregory & Bickel, 2005

3.2. Messages importants

Réponses aiguës du système neuromusculaire à l'ES

Coût métabolique exagéré

Fatigue aussi bien centrale que périphérique

Douleurs et dommages musculaires très importants = limite principale

3.3. Messages importants

Réponses chroniques du système neuromusculaire à l'ES

ES permet d'améliorer la force maximale
=> Adaptations nerveuses (\nearrow VA, RMS/M, réflexe H)
=> Adaptations musculaires (\nearrow surface de section, angle de pennation)

Adaptations très similaires à l'entraînement volontaire

4. Messages importants

Stratagème judicieux pour limiter effets immobilisation chez différentes populations pathologiques

Économie de temps

Technique pour suppléer l'activation volontaire chez des populations hypoactives

Références proposées

Darques JL, Bendahan D, Roussel M, Giannesini B, Tagliarini F, Le Fur Y et al. Combined in situ analysis of metabolic and myoelectrical changes associated with electrically induced fatigue. *J Appl Physiol* 2003; 95: 1476-84.

Gondin J, Guette M, Ballez Y, Martin A. Electrostimulation effects on neural drive and muscle architecture. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37 (8): 1291-99.

Gondin J, Ducley J, Martin A. Soleus and gastrocnemii V-wave responses increase following electrical stimulation training. *J Neurophysiol* 2006; 95 (6): 3328-35.

Maffiuletti NA, Pensini M, Martin A. Activation of human plantar flexor muscles increases after electromyostimulation training. *J Appl Physiol* 2002; 92: 1383-92.

Maffiuletti NA, Zory R, Miotto D, Pellegrino MA, Jubeau M, Bottinelli R. Neuromuscular adaptations to electrostimulation resistance training. *Am J Phys Med Rehabil* 2006; 85: 167-75.

Questions proposées pour travail pratique

ES: principe et bases physiologiques

Quelles sont les adaptations auxquelles nous pouvons nous attendre après une séance d'ES?

Quelles sont les adaptations survenues après un entraînement par ES?