



Electrostimulation et Renforcement Musculaire

Antoine COUTURIER

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

Introduction

- ✱ Historique
- ✱ Principes de fonctionnement
 - excitabilité des unités motrices
 - effet des différents paramètres de stimulation
- ✱ Entraînement de la force
- ✱ Processus adaptatifs
- ✱ Coût énergétique
- ✱ Entraînement en endurance
- ✱ Récupération
- ✱ Rééducation post-traumatique

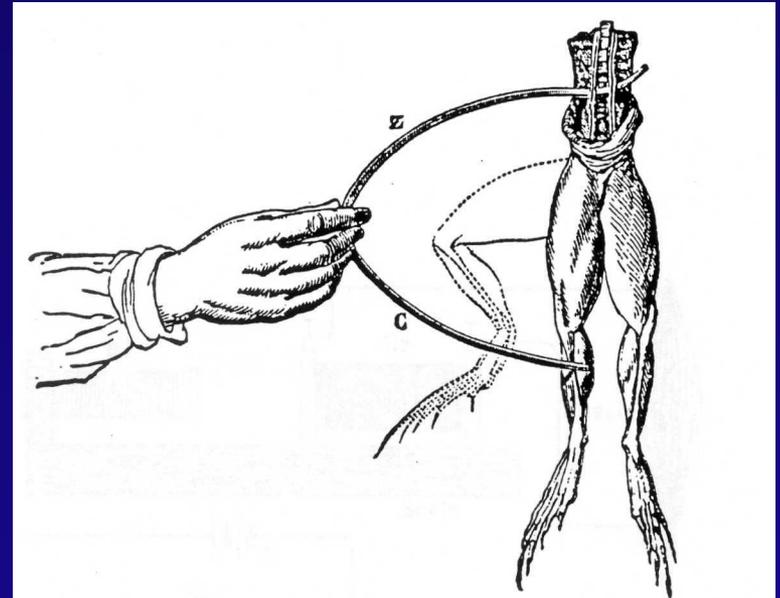


Les "avantages" de l'électrostimulation

- ✱ L'électrostimulation permet de recruter préférentiellement les fibres de type II
- ✱ Les fréquences faibles (20 Hz) permettent de recruter les fibres lentes
- ✱ Les fréquences élevées (80 Hz) permettent de recruter les fibres rapides
- ✱ Puisque l'électrostimulation shunte la commande nerveuse, l'entraînement par électrostimulation permet d'hypertrophier directement le muscle

Historique

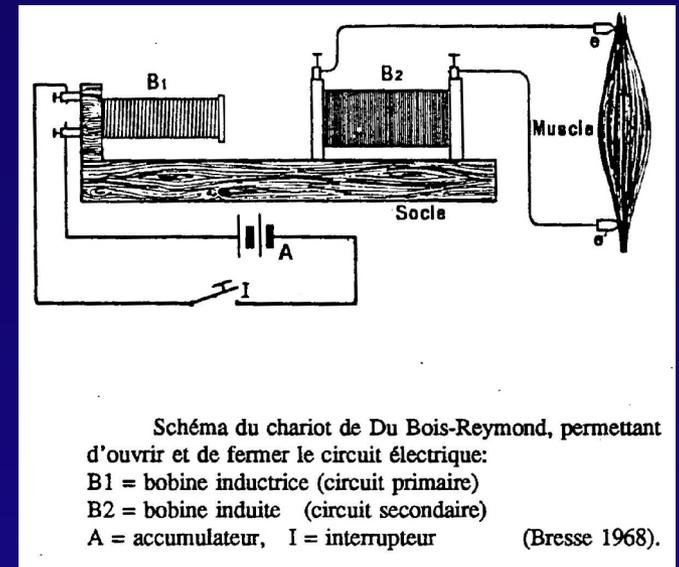
- ✿ 18e siècle: découverte du contrôle externe et artificiel de la contraction musculaire par Luigi Galvani, sur les muscles de grenouille



Expérience de Galvani (1790) produisant une contraction musculaire par l'application d'une tige bi-métallique sur le nerf et le muscle de grenouille.

Historique

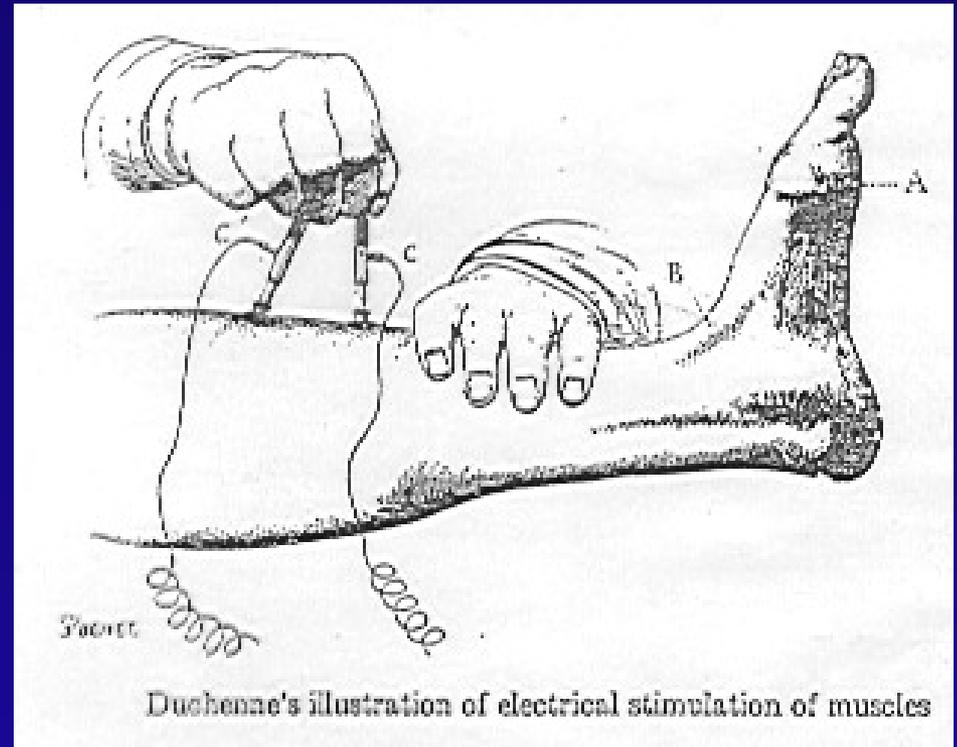
- ✿ Du Bois Reymond (1818-1896) démontre que pour exciter un muscle, un courant électrique variable est préférable au courant continu



- ✿ Utilisation à grande échelle des l'électrostimulation des extrémités chez l'humain, par Duchenne de Boulogne (1867)
- ✿ Utilisation dans la pratique sportive à partir de 1970 (Zruback) et 1971 (Kotz)

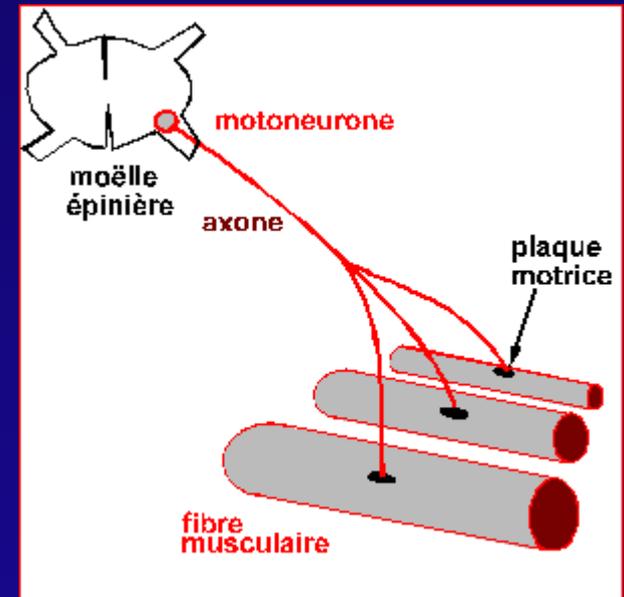
Principe

- ✱ On provoque une contraction musculaire à partir d'une stimulation exogène



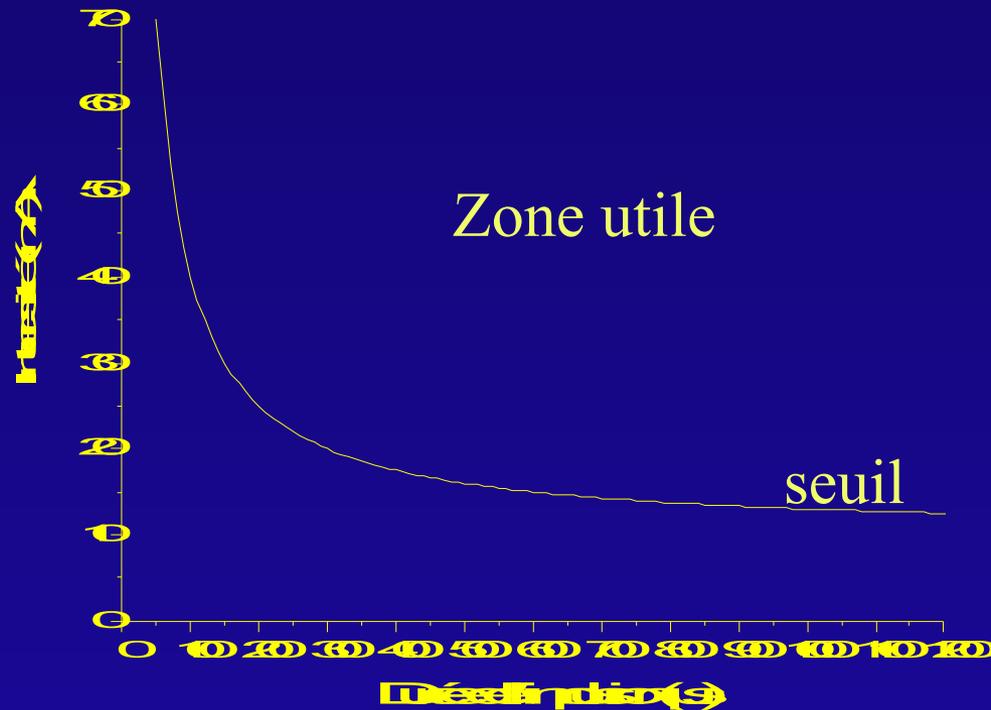
Principe

- ✿ En condition naturelle, le SNC élabore la commande nerveuse, qui se propage le long du motoneurone jusqu'à la plaque motrice, puis le long des cellules musculaires.
- ✿ En stimulation électrique neuromusculaire, on court-circuite la commande et on excite directement le nerf, plus excitable que les cellules musculaires.



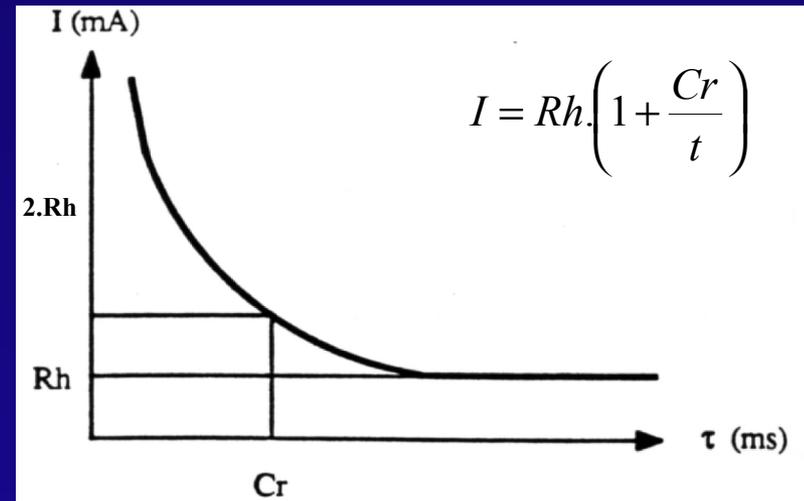
Excitabilité

- Il existe une relation entre l'intensité et la durée minimale d'application du courant pour obtenir une réponse.

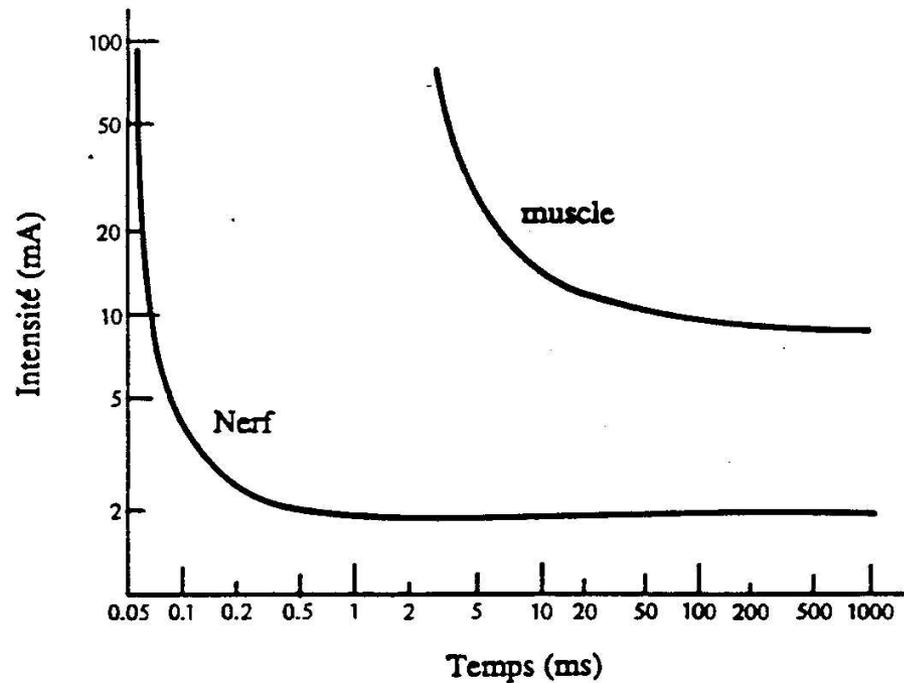


Excitabilité. Relation Intensité-Durée

- * La rhéobase est l'intensité du courant au dessous de laquelle la stimulation électrique n'est jamais efficace
- * La chronaxie se définit comme le temps d'application nécessaire d'une stimulation d'intensité double de la rhéobase pour obtenir un potentiel d'action.
- * La chronaxie est représentative de l'excitabilité de la fibre nerveuse.



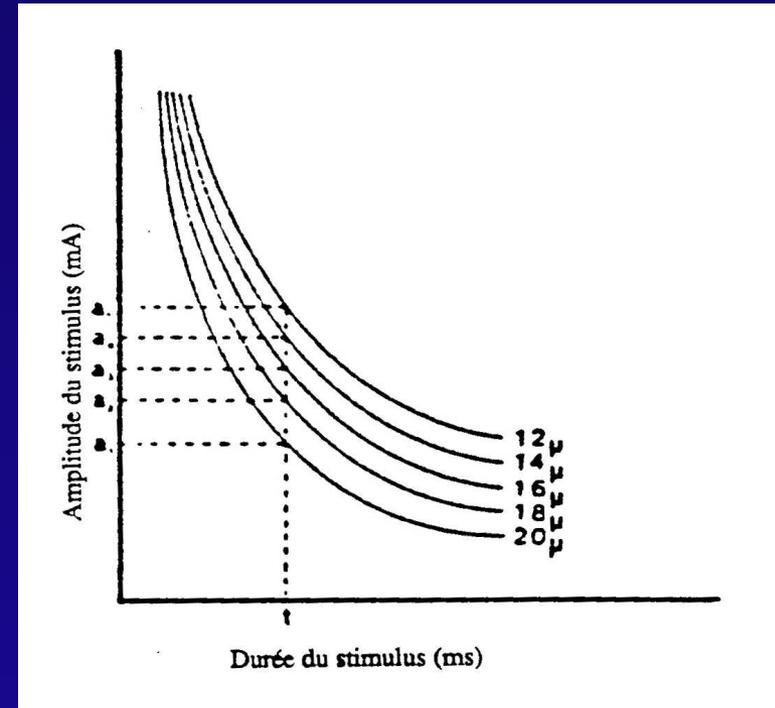
Excitabilité des nerfs et des muscles



Courbe d'intensité-durée pour le nerf et le muscle
(d'après Cummings 1987).

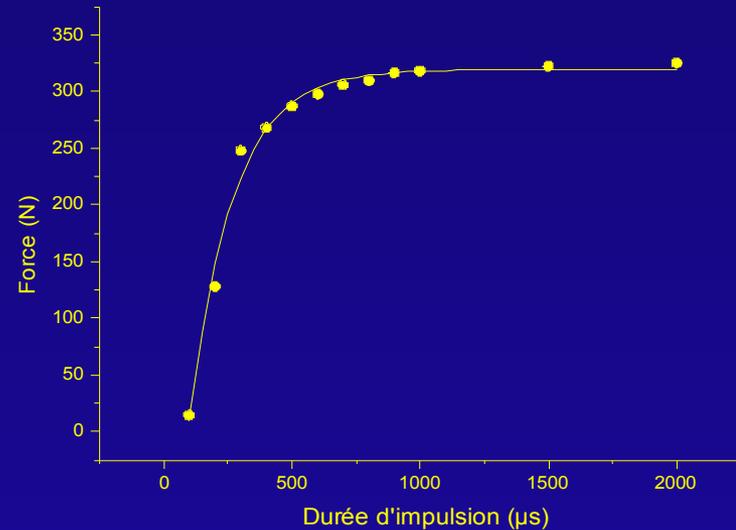
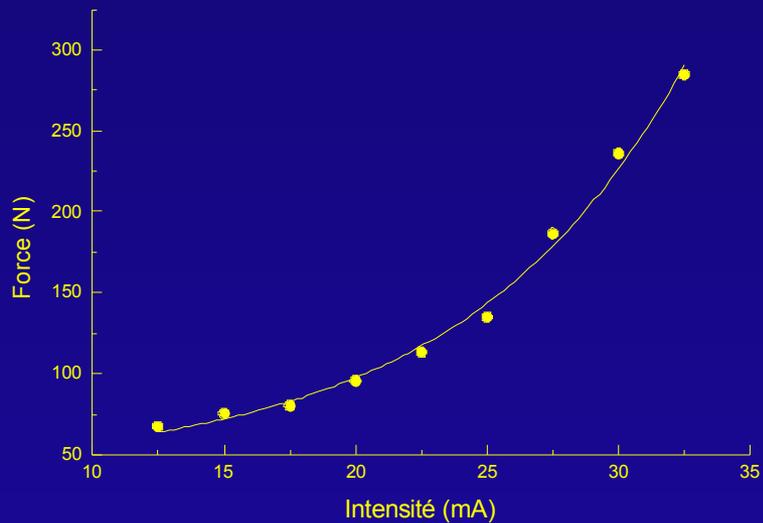
Excitabilité des différentes unités motrices

- ✱ L'excitabilité d'une fibre nerveuse est directement proportionnelle à son diamètre
- ✱ Les unités motrices de type lente ont des fibres nerveuses de petit diamètre
- ✱ Les unités motrices de type rapide ont des fibres nerveuses de gros diamètre



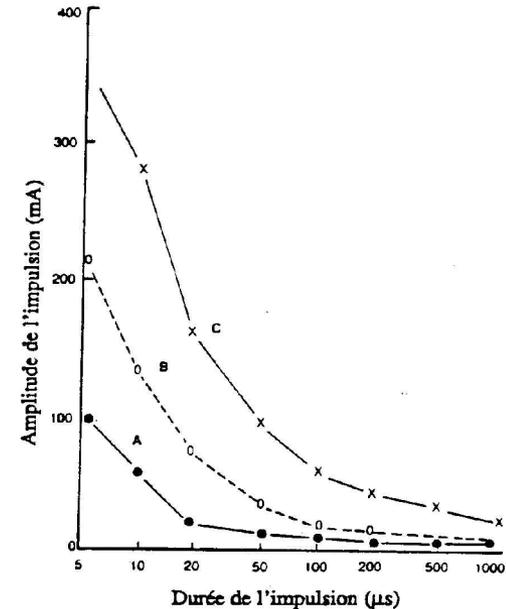
Relations Force-Intensité-Durée

- ☼ Relation de type exponentielle ou sigmoïdale.
- ☼ Plateau quand toutes les UMs potentiellement recrutables sont recrutées.



Choix de l'intensité et de la durée des impulsions

- ✿ Pour un même degré de recrutement:
 - intensité faible, durée élevée: sensations désagréables de piqûres et brûlures.
 - Intensité élevée, durée courte: courant non douloureux.



Courbe intensité-durée d'impulsion pour le déclenchement d'une réponse excitatrice sensitive (A), motrice (B) et douloureuse (C) (Alon 1987).

- ✿ Cette dernière combinaison n'est cependant pas souhaitable

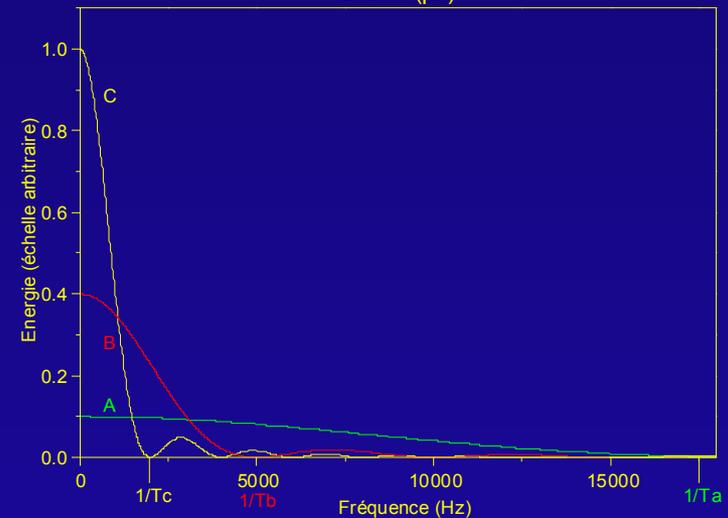
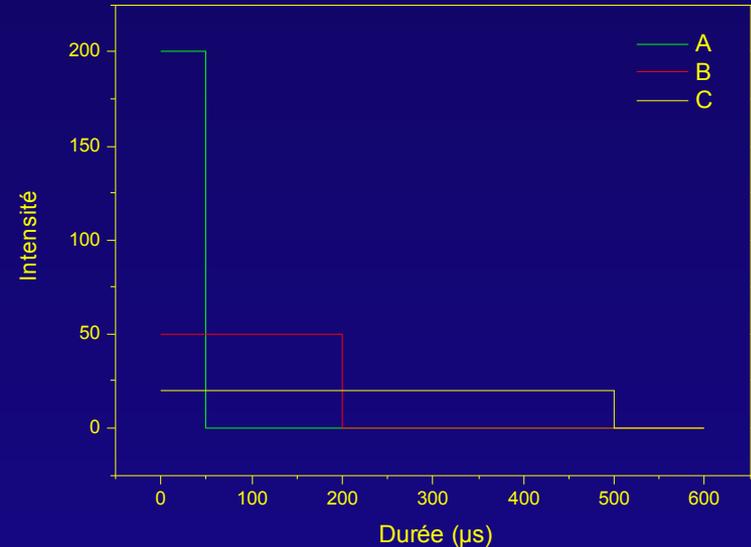
Choix de l'intensité et de la durée des impulsions

✿ Raisons technologiques:

Il est plus facile de réaliser une impulsion faible et longue qu'intense et courte.

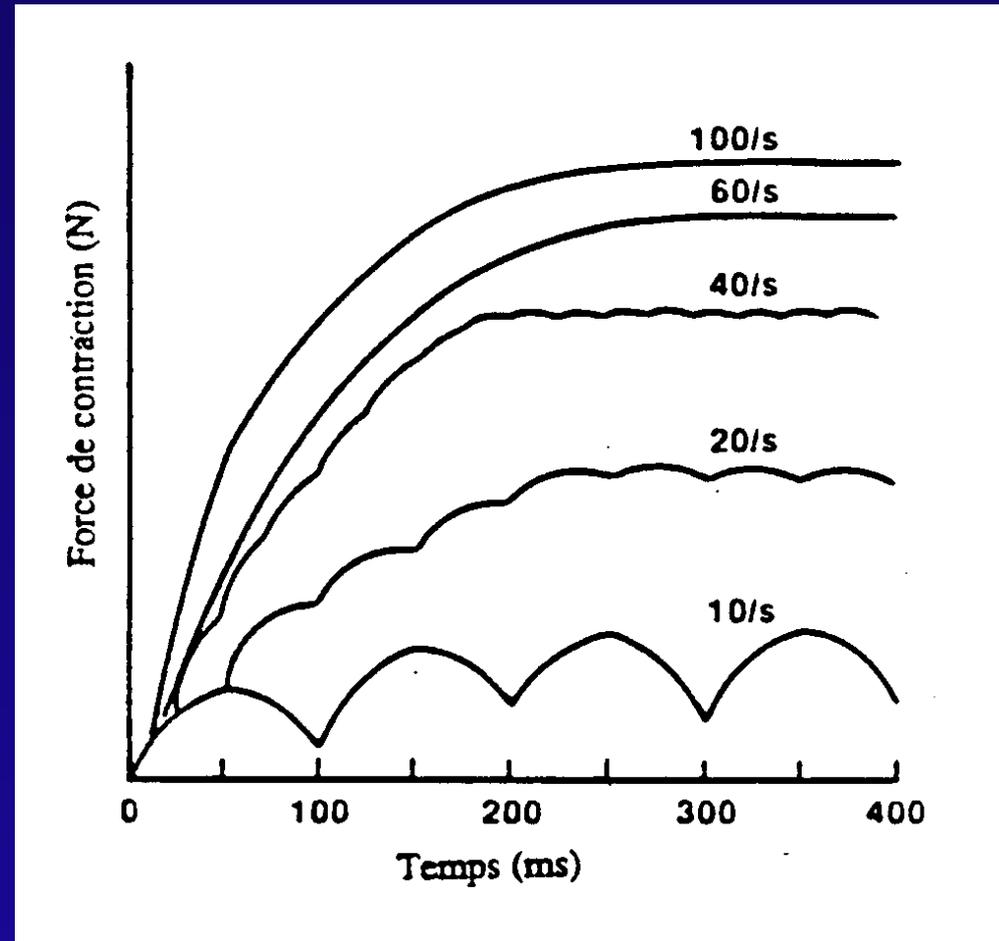
✿ Raisons physiologiques:

Les tissus ont une fonction de filtre passe-bas. Les impulsions sont d'autant mieux transmises qu'elles sont longues.



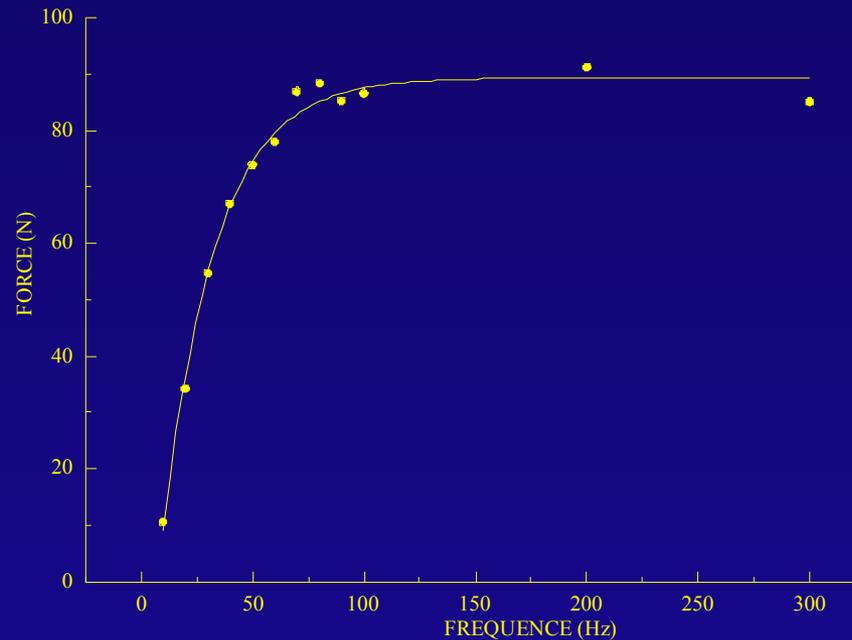
Effet de la fréquence

- ✿ Twitch (secousse) à partir d'une impulsion unique
- ✿ Sommation des secousses si les impulsions sont envoyées avant la relaxation du muscle
- ✿ Sommation temporelle



Relation Force-Fréquence

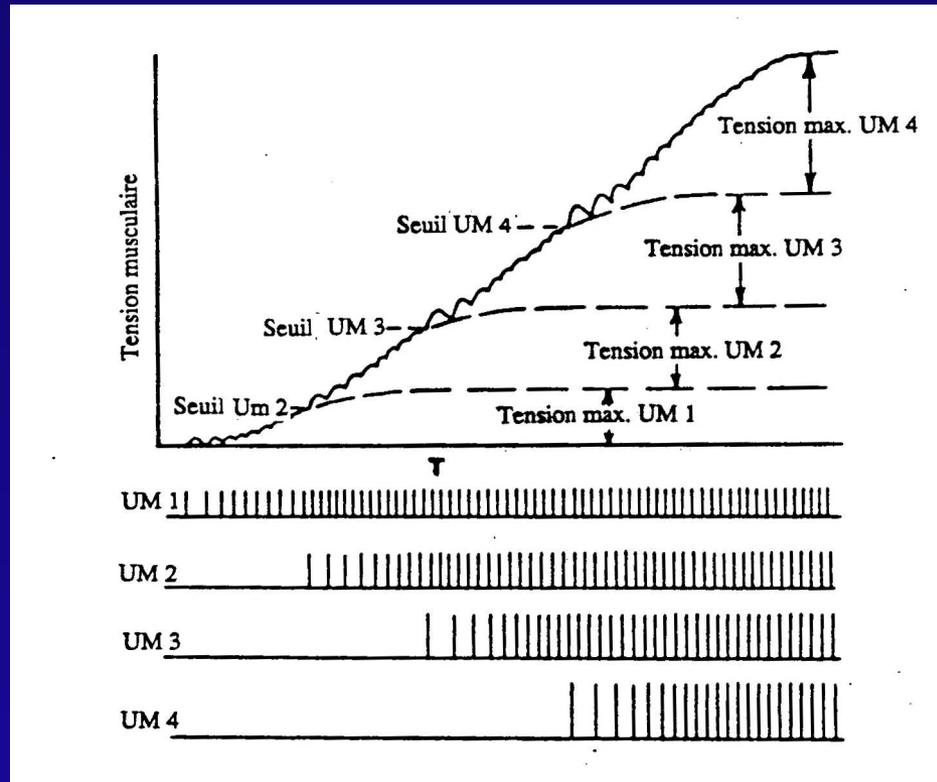
- ☼ Somme des secousses, jusqu'à l'obtention d'un tétanos complet.



- ☼ La fréquence de fusion tétanique est fonction du type d'unité motrice recruté.
- ☼ Elle est de l'ordre de 30 Hz des UM lentes, 80 Hz pour des rapides.
- ☼ La fréquence n'influence que le degré de fusion tétanique

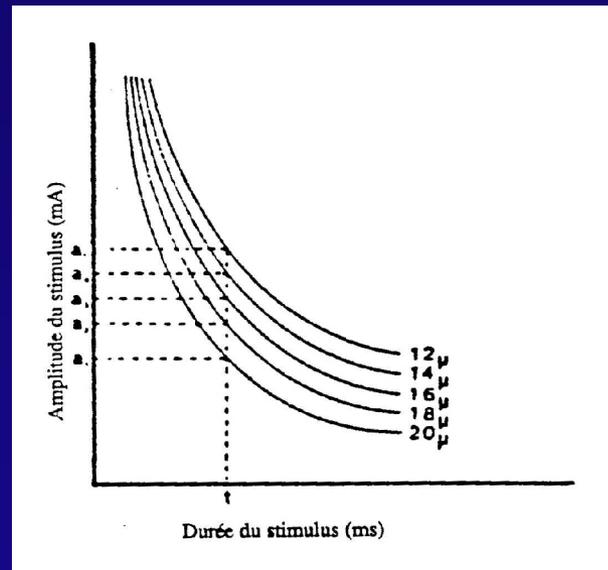
Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Lors de CV, recrutement d'UM type lentes, puis rapides.



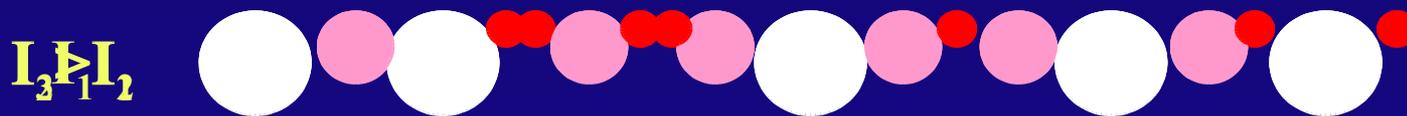
Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Les UM de type II étant plus excitables, la stimulation électrique inverse-t-elle l'ordre de recrutement ?

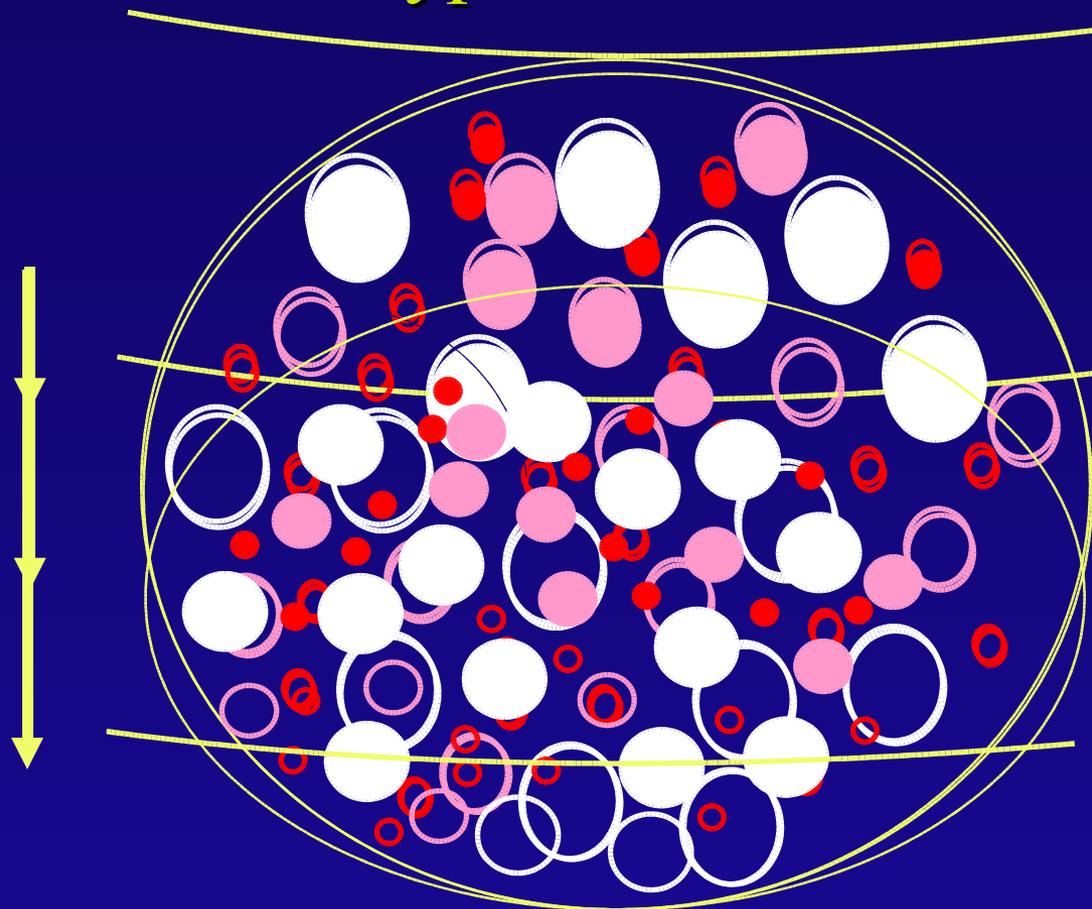


- ✱ Estimation par les caractéristiques de la secousse.
- ✱ Estimation par la fréquence de fusion tétanique.
- ✱ Estimation par la vitesse de conduction.
- ✱ Estimation par le coût énergétique des contractions

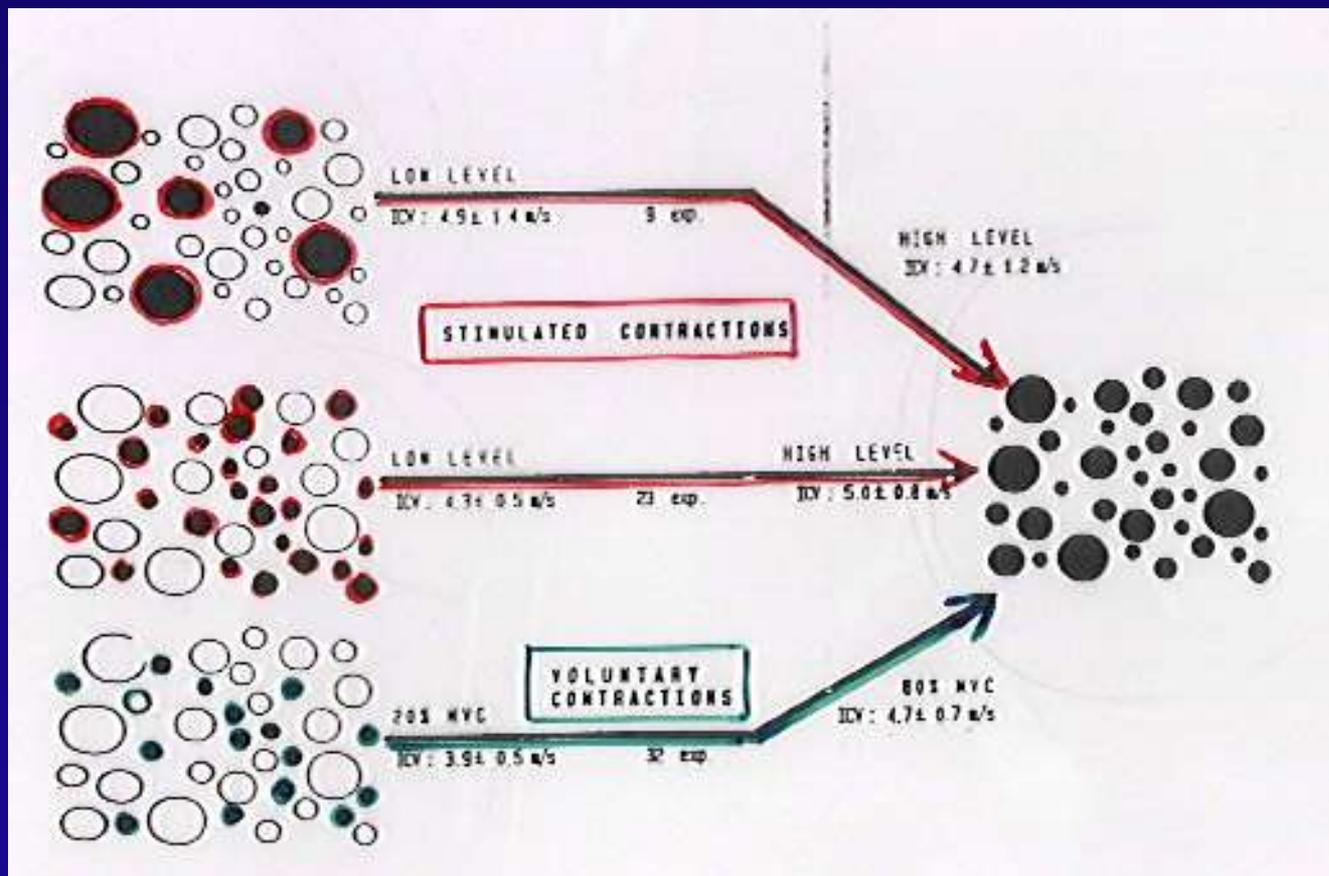
Recrutement « théorique »



Recrutement des différents types de fibre



Recrutement des différents types de fibres



Knaflitz et al (1990)

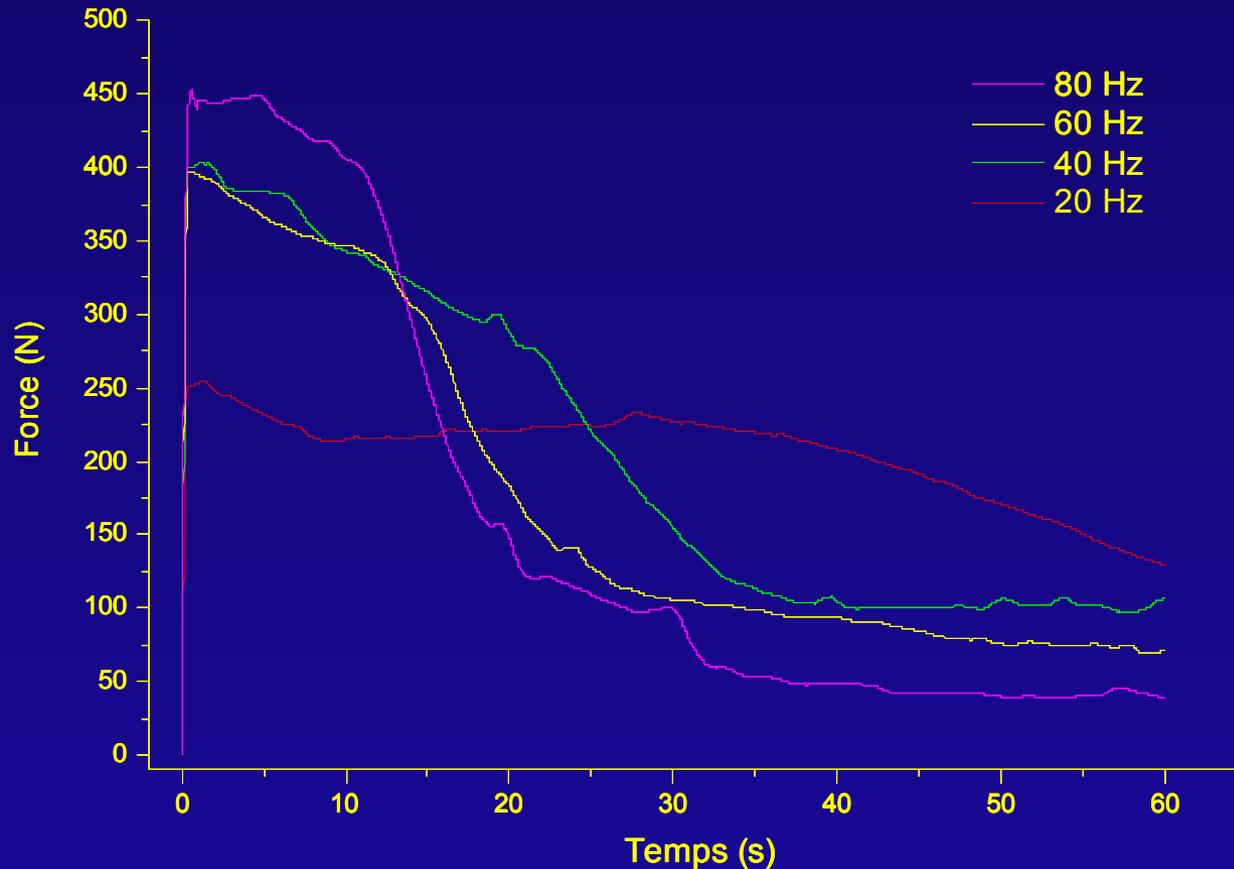
Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Feiereisen 97 (Duchateau)
- ✱ Mesure de l'activation de 302 UM
 - contraction volontaire ou électro-induite
 - de 1% à 88% MVC
- ✱ Contraction volontaire: ordre de grandeur pour 94 % des cas
- ✱ Contraction électro-induite: ordre inverse dans ~ 30 % des cas

Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Quand on augmente l'intensité ou la durée des impulsions, le recrutement dépend surtout de la disposition des fibres nerveuse à l'intérieur du nerf.
- ✱ Recrutement aléatoire et non prédictible, différent de celui observé en CV.

Electrostimulation en régime continu: effet de la fréquence:



Fatigue électro-induite et fréquence de stimulation

- ✱ Fatigue de type haute fréquence (80 Hz):
 - Fréquence de décharge non physiologique.
 - Périodes trop courtes pour que les échanges Na^+/K^+ puissent se faire.
 - Récupération lente à court terme, rapide à long terme.

- ✱ Fatigue de type basse fréquence (20 Hz):
 - Fatigue au niveau du couplage excitation-contraction.
 - Récupération rapide à court terme, lente à long terme

Choix des paramètres de stimulation

- ✱ Intensité et durée d'impulsion maximale.
 - Durée d'impulsion $> 200 \mu\text{s}$
- ✱ Adaptation de fréquence de stimulation.
- ✱ Adaptation du temps de contraction.
- ✱ Adaptation du temps de récupération.

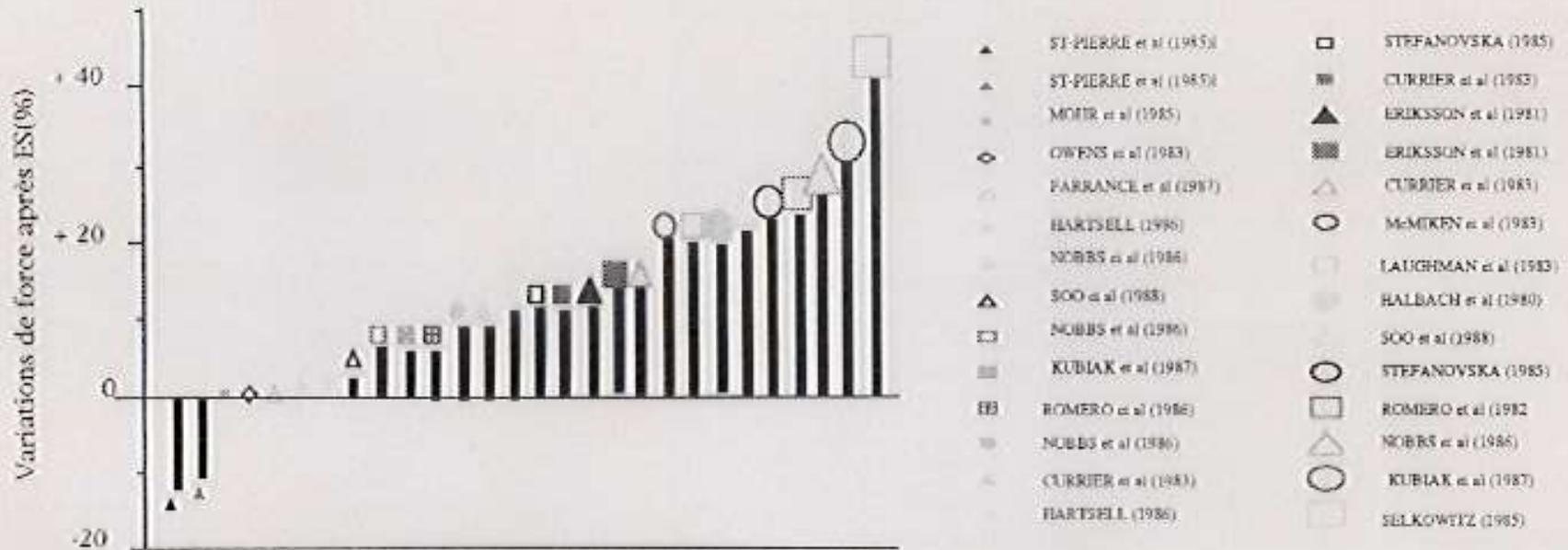
Différences entre contraction volontaire et électro-induite

- ✿ Rôle du SNC
- ✿ Activation asynchrone/synchrone des UMs
- ✿ Fréquence de décharge des motoneurones variable/constante
- ✿ Rotation des UMs avec la fatigue
- ✿ Ordre de recrutement des UMs

Electrostimulation et entraînement de la force

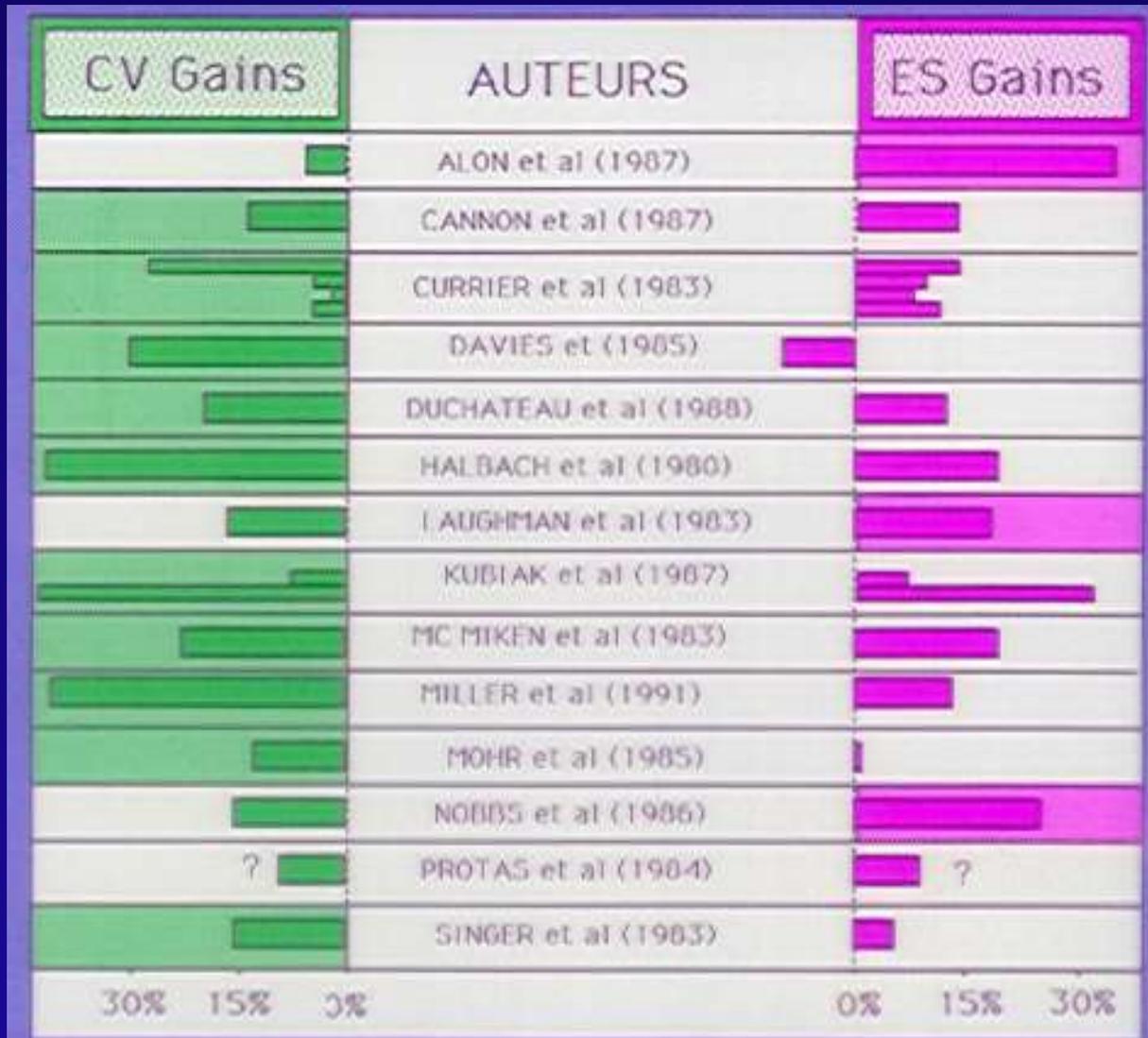
- ✱ Efficacité de cette technique ?
- ✱ Comparaison avec l'entraînement par CV
 - Amélioration de la force
 - Comparaison des gains
 - Rentabilité de l'entraînement
 - Processus adaptatifs
 - Nature (neurologique ou musculaire)
 - Entraînement à l'endurance

Efficacité de la technique



- ✱ Grande variabilité des gains
- ✱ Reflet de la variabilité des protocoles d'entraînement et des techniques utilisées.

Comparaison ES vs. CV



Comparaison ES vs. CV

- ✱ Avantage pour l'entraînement par contraction volontaire
- ✱ De plus, on peut émettre des réserves dans les cas de gains plus importants avec l'électrostimulation
 - Alon et al.: le groupe témoin a progressé le plus
 - Laughman et al.: entraînement combiné ES + CV

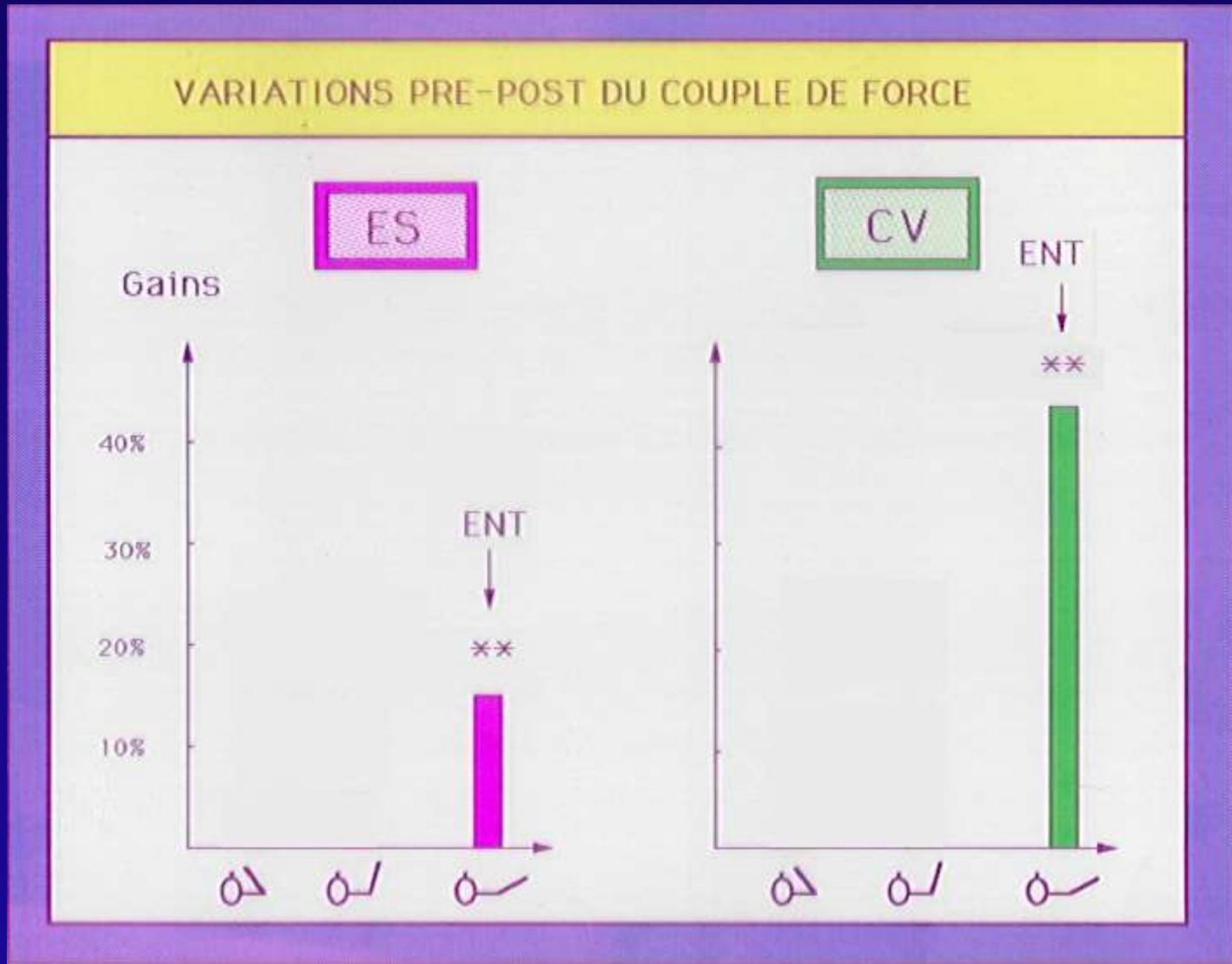
Entraînement de la force

- ✱ Entraînement sur 5 semaines
- ✱ 5 contractions isométriques de 5s - 25 s de repos
- ✱ 5 séries séparées d '1 min de repos
- ✱ Groupe contractions volontaires: 80% MVC
- ✱ Groupe électrostimulé: intensité maximale supportable

Miller et al (1991)



Comparaison des gains Es vs. CV



Groupe électro-stimulé

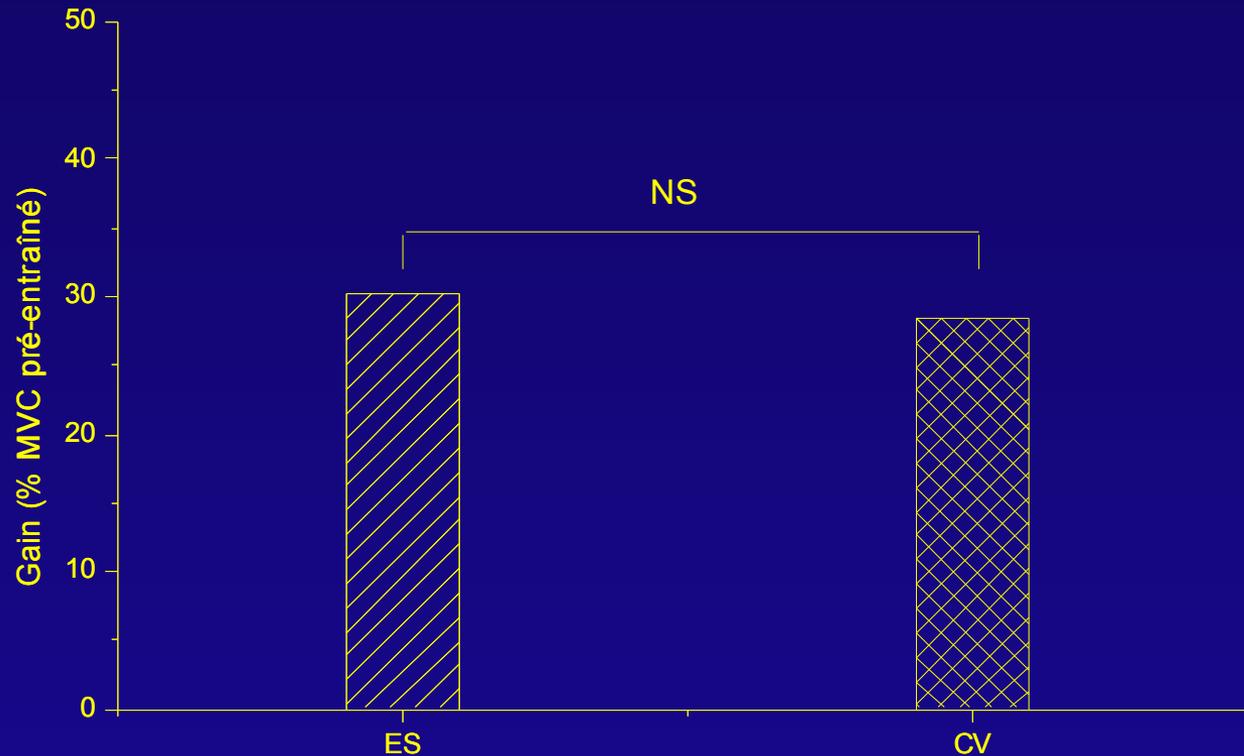
- ✱ Gains très hétérogènes: de 0 à 50 %
- ✱ Les gains les plus importants correspondent à ceux qui avaient la force électro-induite la plus importante
 - Phénomène similaire observé en entraînement volontaire
- ✱ Adaptation à l'électrostimulation au cours des séances



Rentabilité de l'entraînement

- ✱ Il est difficile de comparer un groupe s'entraînant à 10 % de MVC avec un autre à 80 % MVC
- ✱ On fait s'entraîner le groupe volontaire au même pourcentage de MVC que le groupe électrostimulé

Rentabilité de l'entraînement

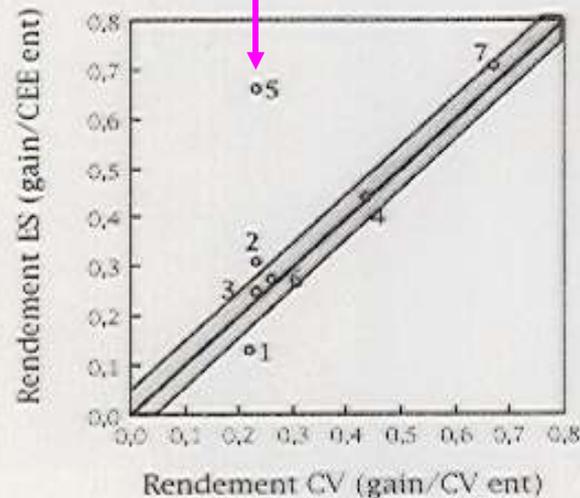


$$\text{Rendement} = \frac{\text{Gain}}{\text{couple d'entraînement}}$$

Group	Rendement (%)	Gain (MVC)
ES	71 %	(30.3/42.7)
CV	67 %	(28.5/42.7)

Rentabilité de l'entraînement

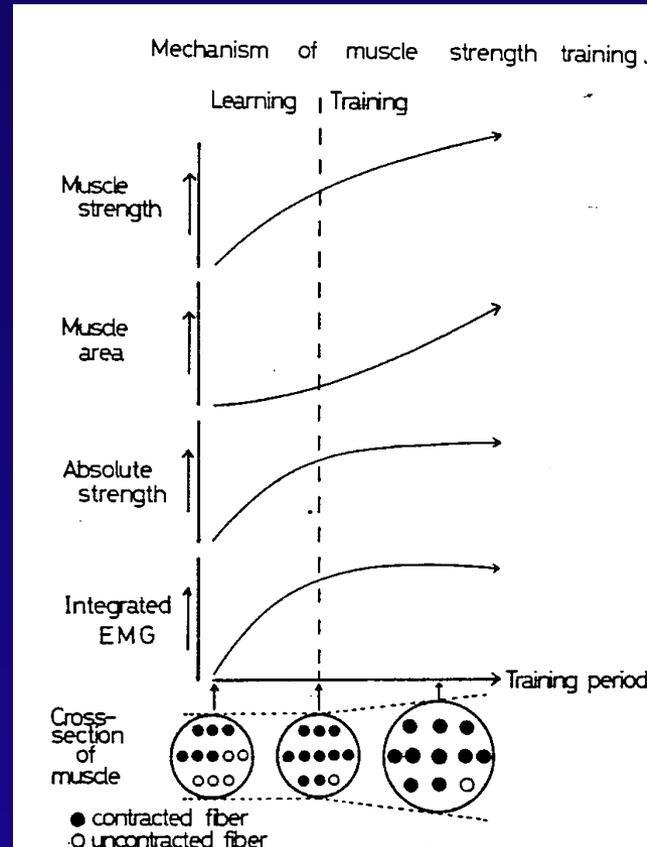
Entraînement CV + ES



$$\text{Rendement} = \frac{\text{gain de force}}{\text{intensité de contraction à l'entraînement}}$$

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1 - Duchateau et al (1988) | 2 - Caggiano et al (1994) |
| 3 - Carrier et al (1983) | 4 - Kubiak et al (1977) |
| 5 - Laughman et al (1983) | 6 - Mac Miken et al (1983) |
| 7 - Miller et al (1990) | |

Processus adaptatifs



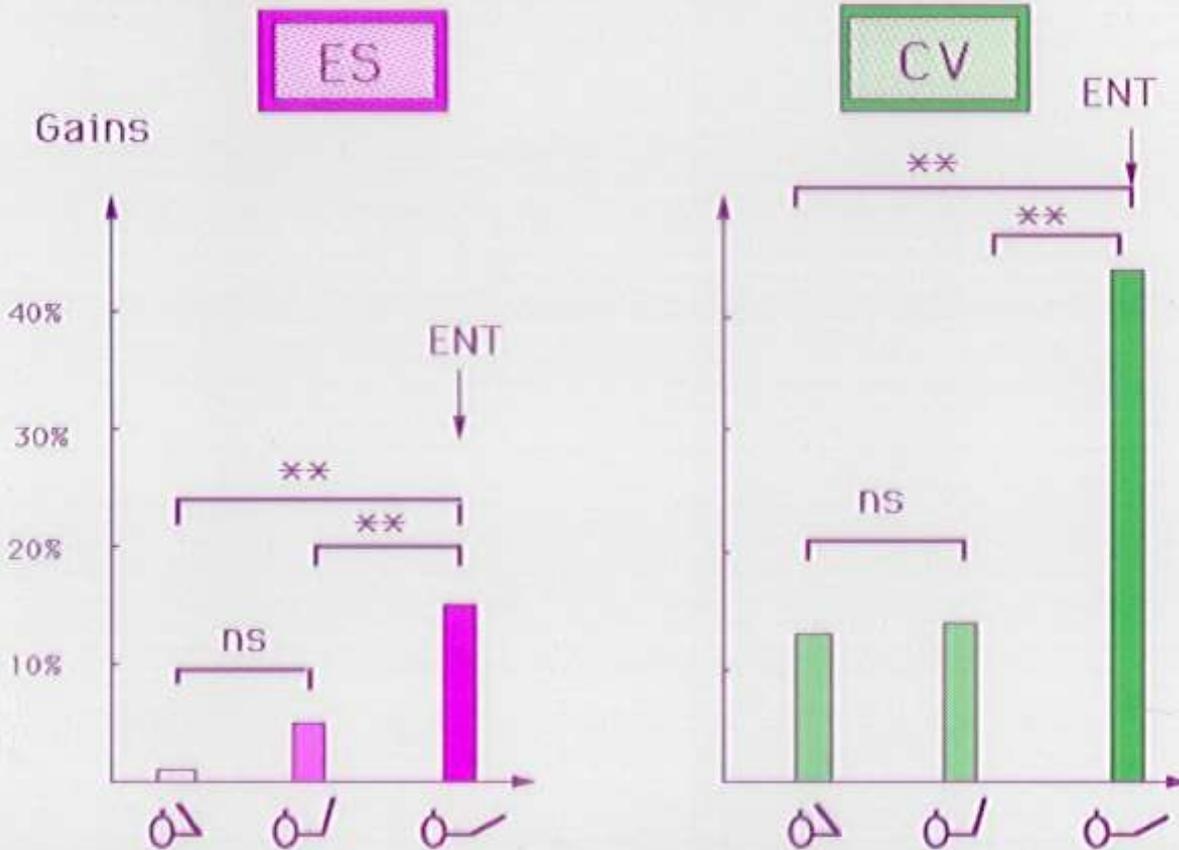
- ✿ En shuntant la commande nerveuse, l'électrostimulation permet l'hypertrophie du muscle beaucoup plus rapidement qu'en entraînement volontaire ??

Les témoins des adaptations nerveuses

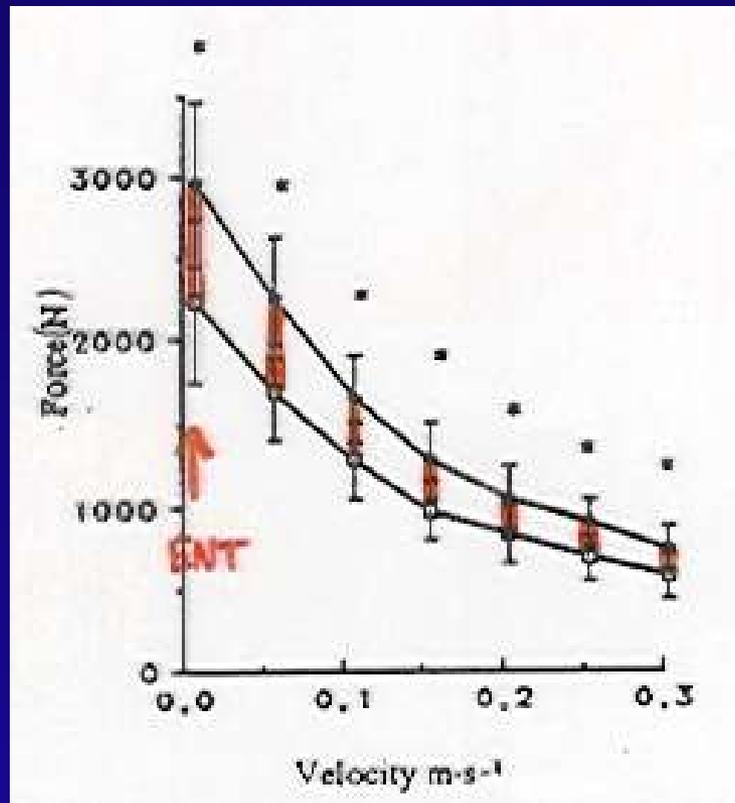
- ✱ Spécificité de l'angle
 - le gain de force le plus important s'observe à l'angle d'entraînement
- ✱ Spécificité de la vitesse
 - le gain de force le plus important s'observe à la vitesse d'entraînement
- ✱ Effet controlatéral
 - gain de force du membre controlatéral non entraîné
- ✱ Gain de force sans hypertrophie
- ✱ Modification du tracé EMG

Spécificité de l'angle

VARIATIONS PRE-POST DU COUPLE DE FORCE

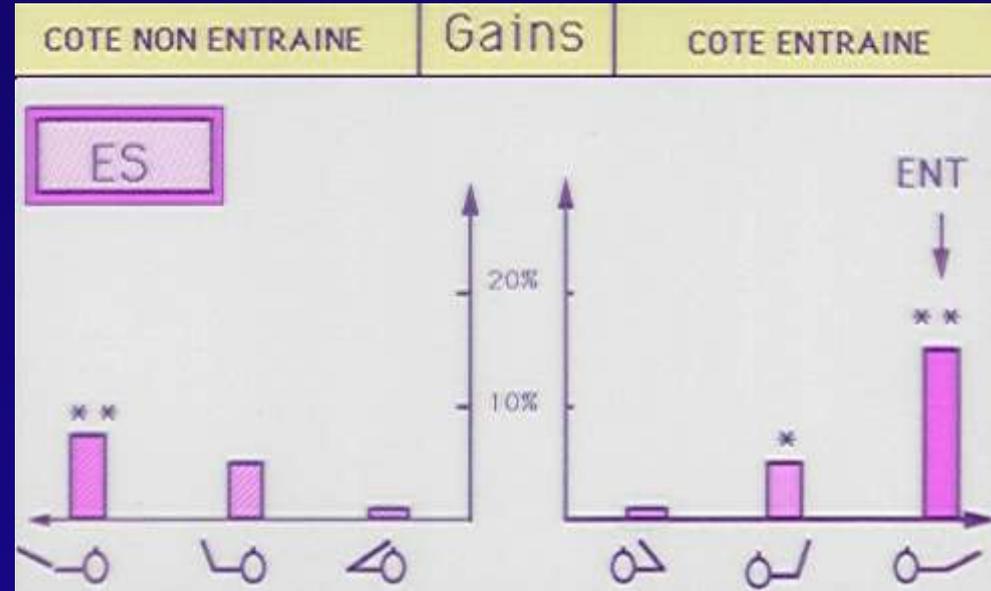
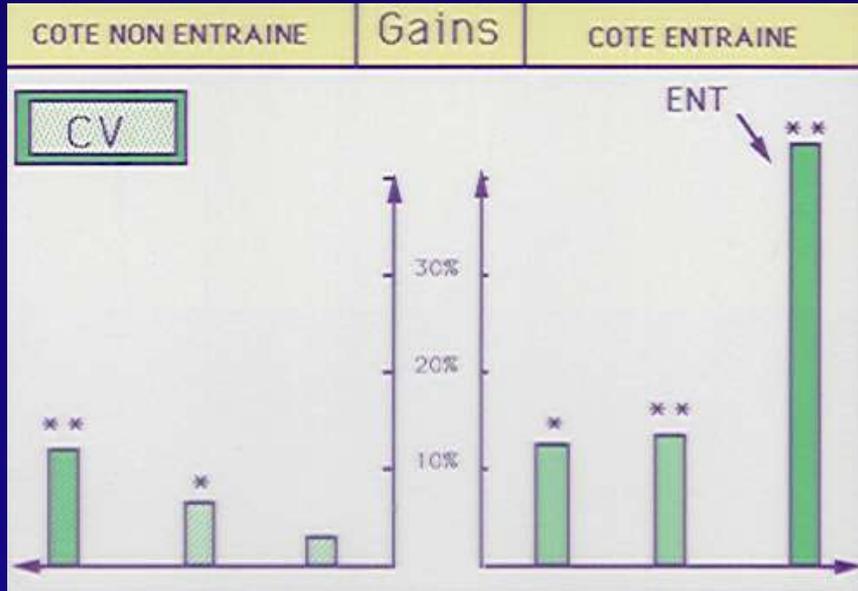


Spécificité de la vitesse d'entraînement



Martin et coll. (1993)

Gain controlatéral



Miller et al. 91

- ✱ Résultats similaires pour Cabric et al. (87), Lai et al. (88)

Effet sur la masse musculaire

Auteurs	Muscle	Gain de masse %	Gain de force	Nombre de séances
Halbach et al. (80)	Quadriceps	Aucun	22	15
Eriksson et al (81)	Quadriceps	Aucun	14 – 18	15
Cheremisin (83)	Divers muscles	1-1.5 cm	16-23	30
Anzil et al. (74)	Quadriceps	6.7	?	52

Modifications du tracé EMG

* Colson et al. (00)

- Entraînement du biceps brachii de 9 sujets
- 6 fois 6 s de contraction (70% MVC), 5 séries/j, tous les jours pendant 7 semaines

* Maffiuletti et al. (02)

- Entraînement du fléchisseur du pied de 8 sujets
- 16 session, sur 4 semaines

- * L 'augmentation de la force s 'accompagne d 'une augmentation de l 'EMG

Modification des caractéristiques musculaires

- ✱ Perez et al. (02)
- ✱ Entraînement sur les quadriceps de 15 sujets
- ✱ 45-60 Hz, 12s-8s, 30 min/j, 3j/sem, 6 semaines
- ✱ Biopsies et exercice test avant-après
- ✱ Augmentation du nombre de IIa et diminution des I et IIb
 - ▶ Transformation I, IIb → IIa
- ✱ Augmentation des capacités oxydatives des IIa
- ✱ Pas d'hypertrophie

Résultats similaires à un entraînement volontaire

Modification des caractéristiques musculaires

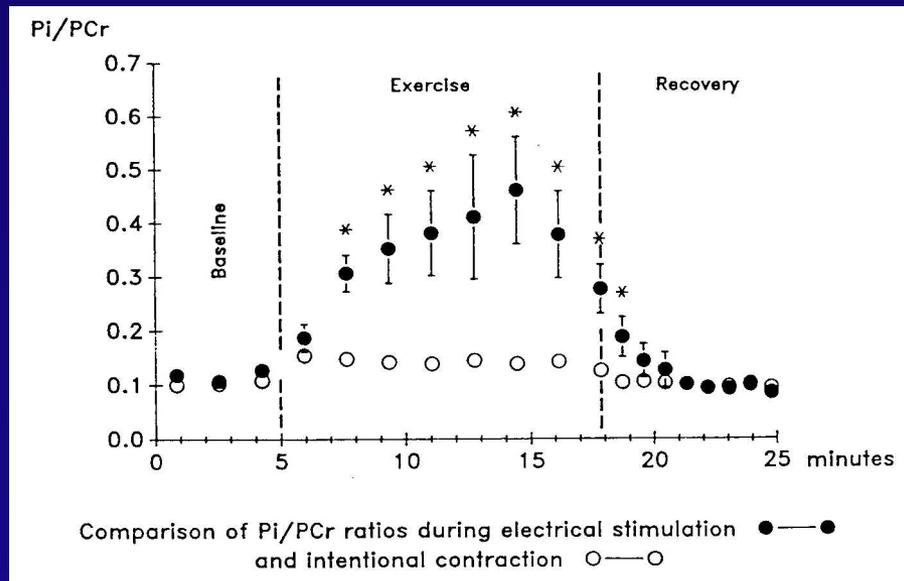
- ✱ Chan (99)
- ✱ Entraînement HF de 6 UM de l 'adducteur du pouce, sur 2 sujets
- ✱ ST: Augmentation Fmax et twitch, résistance à la fatigue inchangée
- ✱ FT: Diminution Fmax et twitch, résistance à la fatigue augmente

Résultats similaires à un entraînement volontaire



Coût énergétique

- ✿ Vanderthommen et al. (99)
- ✿ 64 contractions 5.5s-5.5s à 20 % MVC, ES ou vol.



- ✿ Pi/PCr plus élevé pour l'ES, indiquant une sollicitation anaérobie plus importante
- ✿ Recrutement préférentiel des fibres de type II ??

Coût énergétique

- * Ratkevicius et al. (98)
- * Mesure de la resynthèse anaérobie de 1 'ATP
- * Contractions volontaires ou électro-induites
- * Contractions à 40 % et 75 % MVC

- * A 40 % MVC, coût anaérobie supérieur pour les contractions électro-induites
- * A 75 % MVC, coût anaérobie équivalent entre contractions volontaires ou électro-induites

Entraînement à l'endurance

- ✿ Stimulation basse fréquence de longue durée
- ✿ Technique efficace chez l'animal en stimulation chronique
 - Modifications des caractéristiques musculaires fonctionnelles
 - Modifications des caractéristiques musculaires métaboliques
 - Modifications des caractéristiques musculaires histochimiques
 - Résistance accrue à la fatigue
- ✿ De telles adaptations peuvent-elles se retrouver chez l'homme ?



Entraînement à l'endurance

Auteurs	Stim.	Entraînement	Résultats
Alon et al (1987)	50 Hz	12 séances	Grande variabilité interindividuelle Résultats NS à l'échelle du groupe
Duchateau et al (1988)	100 Hz	20×1s - 10 fois ts les jours – 6 sem	Pas de gain d'endurance MVC=+13 %
Dubowitz et (1982)	6-10 Hz	3 fois 1h par jour 6 sem	↗ 13 % MVC cste
Edwards et al (1988)	10 Hz	3h par jour 6 sem	↗
Hartsell et al (1983)	65 Hz	10×10s, 5fois par sem 6 sem	↗ 13 % MVC=+13 %
Iehl et (1984)	50 Hz	30 min – 3 fois par sem 6 sem	↗ 53 % MVC=+14 %
Kim et al (1995)	1 Hz	1h par jour – 3 fois par sem 4 sem	↗ 82 % MVC cste
Rutherford et al (1988)	10 Hz	3h par jour – 6 fois par sem 6 sem	↗ MVC cste
Scott et al (1985)	5-10 Hz	3 fois 1h par jour 6 sem	↗ MVC cste
Thierault et al (1994)	8 Hz	8h par jour – 6 fois par sem 8 sem	↗



Entraînement à l'endurance

- ✱ Stimulation 8 Hz, 3h par jour, 6jours/sem, 6 semaines, sur 20 sujets sédentaires
- ✱ Tests de fatigues + biopsies
- ✱ Comparaison avant/après
- ✱ Comparaison avec sujets actifs et compétiteurs niveau national entraînés en endurance

Thierault et al (1996)



Entraînement à l'endurance

- ✱ Masse musculaire non affectée
- ✱ Amélioration de la résistance à la fatigue
 - Niveau similaire à celui des sujets actifs
- ✱ Biopsies
 - Diminution du nombre de fibres IIb
 - Augmentation du nombre de fibres IIa et de leur capillarisation
 - Caractéristiques similaires aux sujets actifs
- ✱ Effet comparable à un entraînement en endurance classique



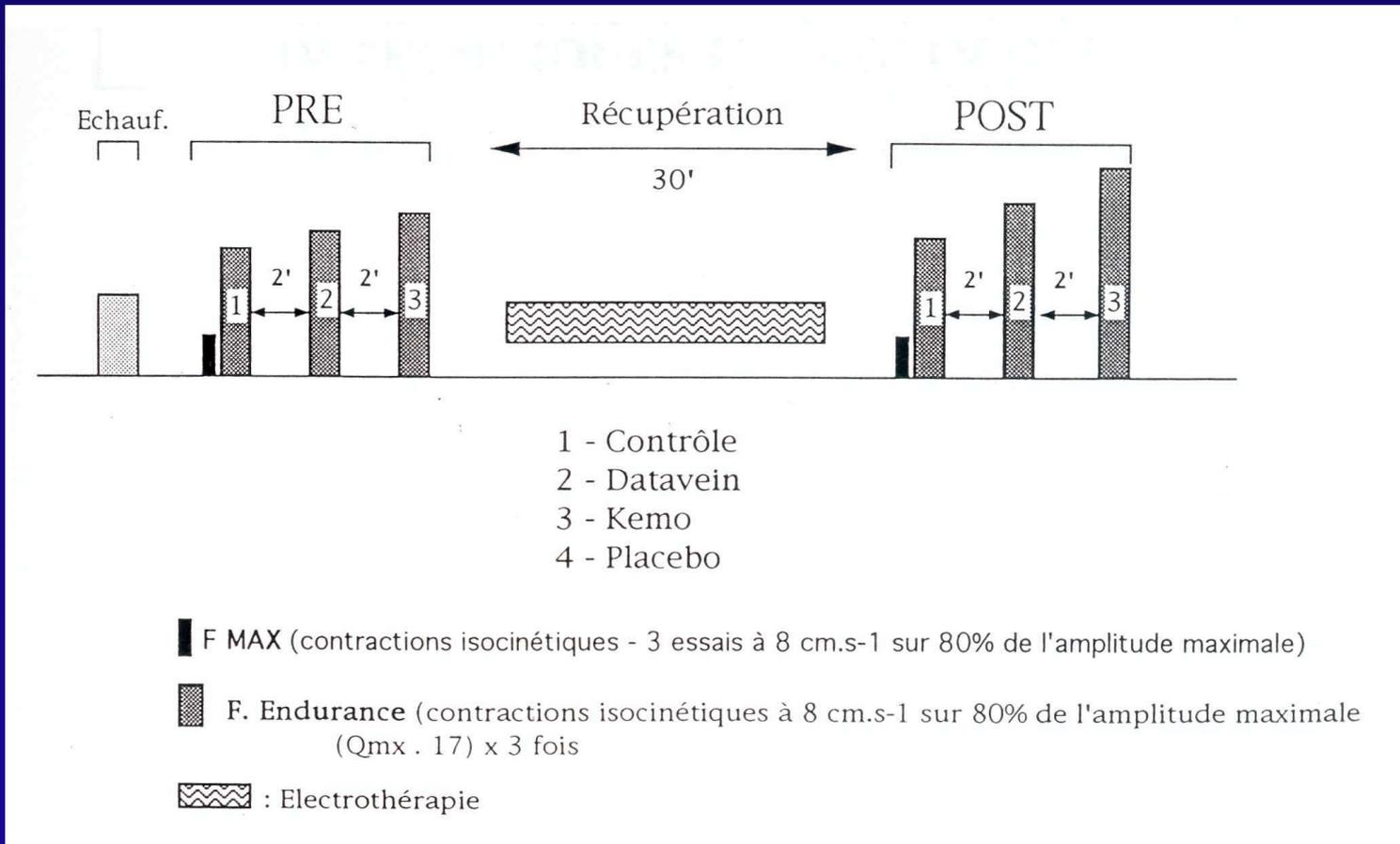
Récupération

- ✿ Maitre (00)
- ✿ Protocole de fatigue: 5 fois 10 répétitions à 80% MVC, sur presse inclinée, 3 min récup
 - 1 groupe récup passive entre les séries
 - 1 groupe récup active, ES 5 Hz
- ✿ Pas de différence de lactatémie pour les 2 groupes
- ✿ Diminution moindre de puissance et du signal EMG pour le groupe stimulé

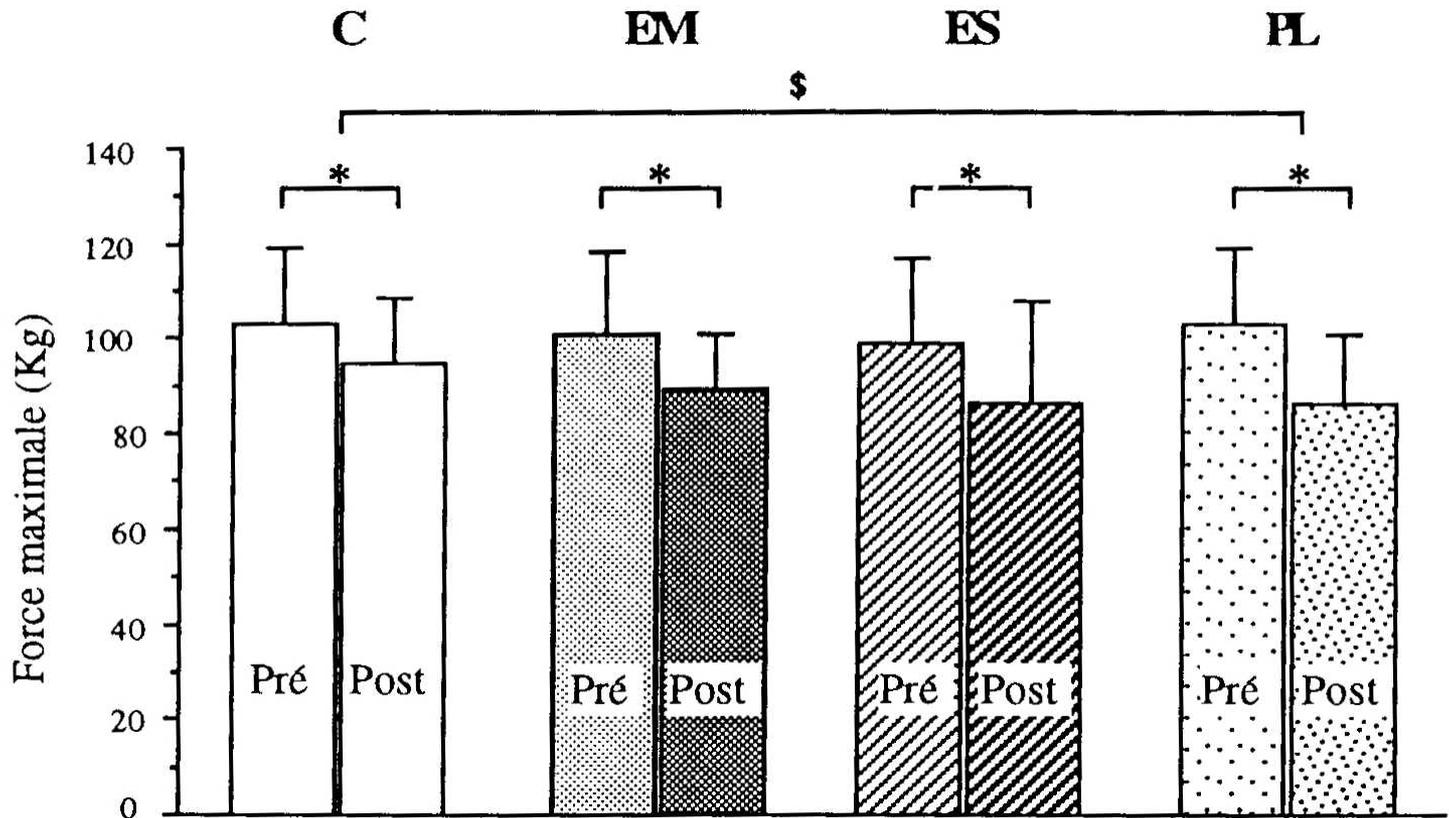
Récupération

☼ Morth (97)

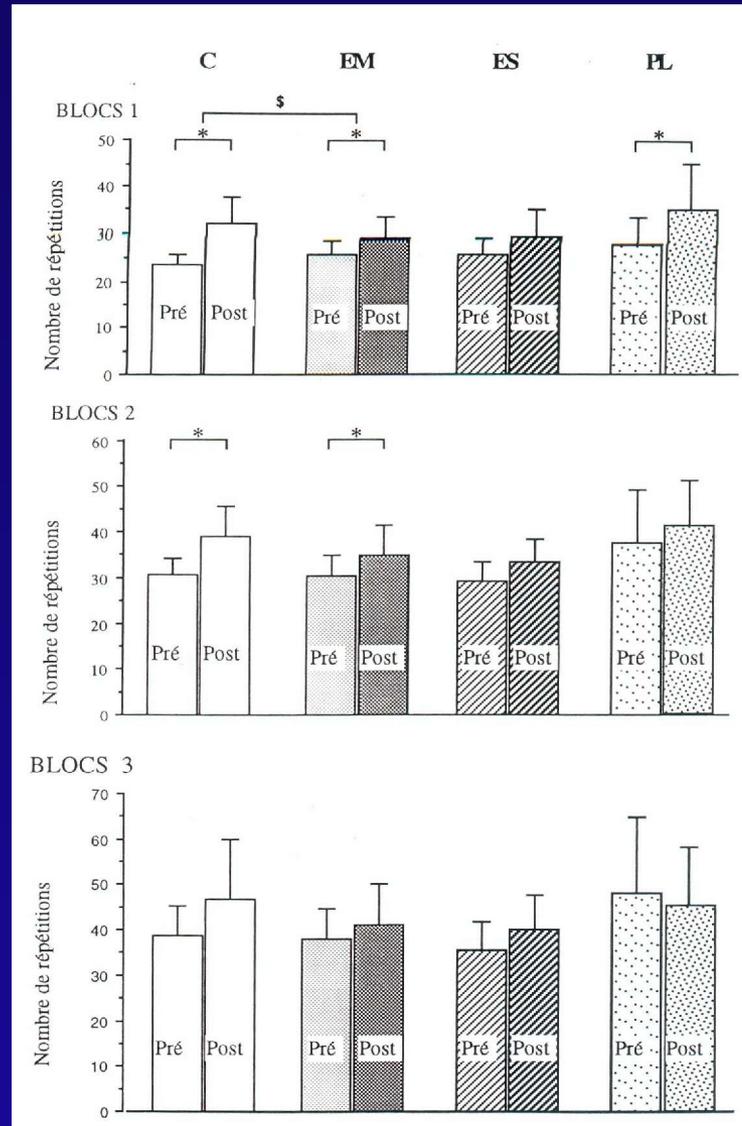
➤ 9 sujet, muscles extenseurs de la cheville



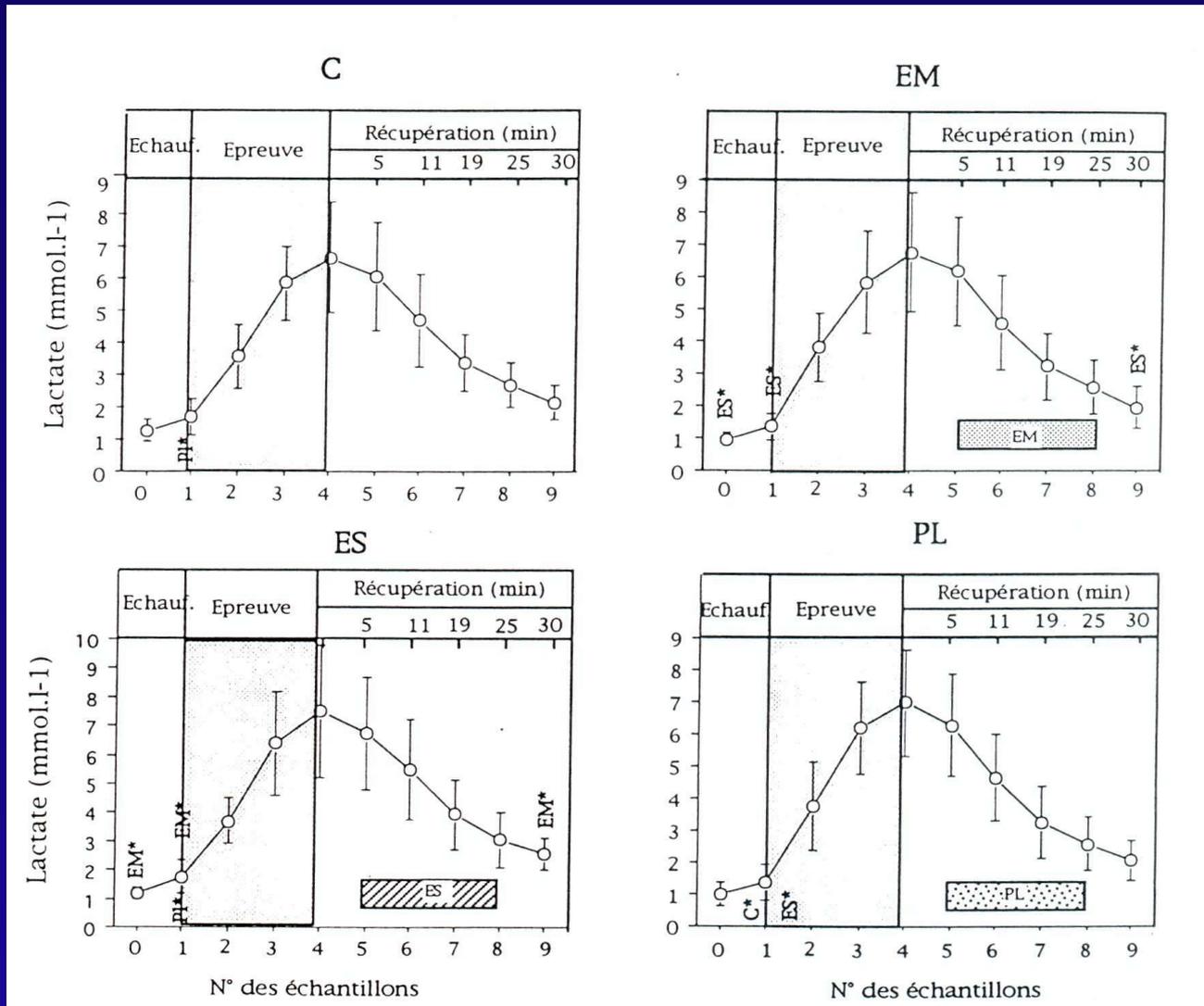
Récupération



Récupération



Récupération



Rééducation post-traumatique

- ✱ Vanderthommen (92)
- ✱ Renforcement du quadriceps après arthroscopie, 16 sujets
 - Rééducation classique par CV
 - Rééducation CV + ES: 40 Hz, 7s-7s, 20 min
- ✱ Test MVC avant l'opération et après la période de rééducation
- ✱ CV: baisse MVC de 15%
- ✱ CV + ES: pas de différence

Rééducation post-traumatique

- ✱ Wigerstad-Lossing (88)
- ✱ Renforcement du quadriceps après ligamentoplastie du croisé antérieur, 23 sujets
 - Rééducation classique CV
 - Rééducation CV + ES, 30 Hz, 6s-10s, 40 min
- ✱ Tests avant l'opération et après la période de rééducation

	CV	CV + ES
MVC	-59 %	-35 %
Section transversale du quadriceps	Diminution	NS
Surface relative occupée par les fibres I	Diminution	NS
Activité enzymatique oxydative et glycolitique	Diminution	NS

Conclusion

- ✱ Efficacité de cette technique ? OUI
- ✱ Comparaison avec l'entraînement par CV
 - Amélioration de la force
 - Comparaison des gains En faveur de CV
 - Rentabilité de l'entraînement Équivalente
 - Processus adaptatifs
 - Nature (neurologique ou musculaire) Similaire à CV
 - Entraînement à l'endurance Similaire à CV
- ✱ Récupération ?
- ✱ Rééducation OUI

Intérêt de l'électrostimulation

✱ Force maximale

- Test motivation ou fatigue lors de MVC
- Activation sélective
- Variation du type d'entraînement

✱ Rééducation

- Très bon moyen pour limiter les pertes de capacités et de performance

✱ Cas des SCI

- Limitation de l'amyotrophie
- Limitation des transformations I → II

Limites de l'électrostimulation

- ✱ Force maximale
 - Nécessité de stimulation quasi-maximale (douleur)
 - Activation sélective (importance de la coordination)

- ✱ Entraînement en endurance
 - Durée des séances

- ✱ Récupération
 - Etudes supplémentaires nécessaires

Merci de votre attention

Antoine COUTURIER

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

INSEP

11, Av. du Tremblay

75012 Paris

antoine.couturier@insep.fr