

M1 UE1 E3.1 - Performance : de l'athlète jusqu'au muscle



4H CM : Propriétés électriques du muscle → L'EMG Claire Morana

claire.morana@univ-montp1.fr

L'électromyographie

En Biomécanique, on utilise :

Variables Cinématiques :

position, vitesse, accélération

Variables Cinétiques :

Forces externes et internes

Variables Electromyographiques :

- Niveau d'activité et d'activation musculaire



- L'activité électromyographique des muscles mis en jeu, ainsi que leur degré d'activation.

PLAN

I- Les propriétés électriques du muscle

II- L'EMG

1. L'EMG élémentaire
2. L'EMG de surface
3. Traitement et interprétation du signal

III- L'EMG et la fatigue

IV- Les applications

Questions :

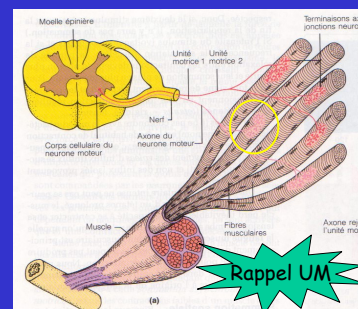
L'EMG : définition, enregistrement et traitement.

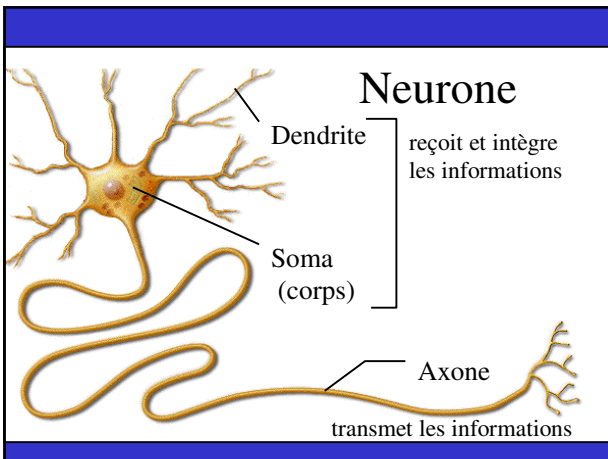
Quelles informations peut-on extraire du signal EMG ?

I. Les propriétés électriques du muscle

1. L'unité motrice et la transmission de l'information
2. Les étapes de la transmission
3. Le potentiel d'action
4. Les phases du potentiel d'action

1. La transmission de l'information





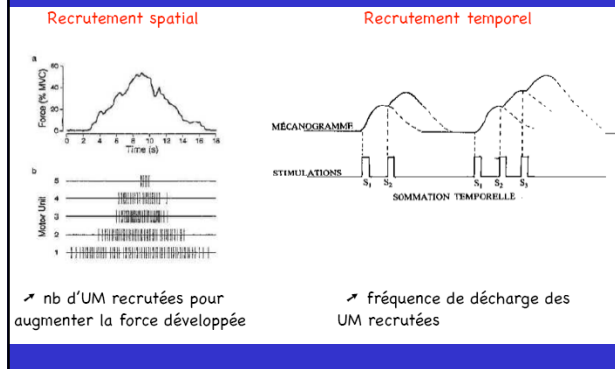
2. Les étapes de la transmission

- La génération d'un courant électrique au niveau de la cellule musculaire est provoquée par l'arrivée d'un potentiel d'action nerveux.
- La transmission neuromusculaire de l'influx nerveux au niveau de la plaque motrice est d'ordre chimique et non électrique.
- Il y a une modification de la perméabilité de la membrane et par conséquent une modification de l'équilibre électrique de part et d'autre de la cellule.
- >> **Création d'un événement électrique local** = potentiel d'action musculaire.

• La membrane post-synaptique est dépolarisée et il y a propagation du signal le long de la fibre musculaire dans les deux directions.

• Cette dépolarisation génère un mouvement d'ions le long de la membrane cellulaire du muscle produisant un champ magnétique. C'est ce champ qui va être détecté et qui est appelé **potentiel d'action musculaire**.

• Le potentiel d'action ainsi créé comprend la sommation spatio-temporelle des PA des UMs actives

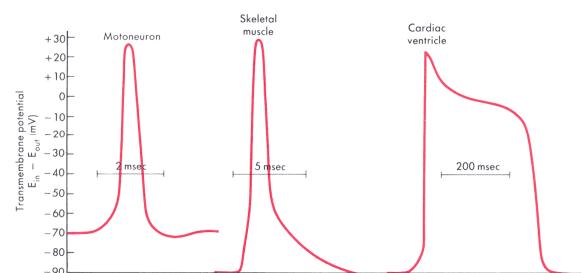


• La durée du PA est inversement proportionnelle à la vitesse de conduction du PA des fibres (2 à 4 ms).

• Un signal EMG représente la somme algébrique des potentiels d'action des UMs actives.

• La nature du signal peut être affectée par des **paramètres physiologiques** (recrutement des UMs, température du muscle, épaisseur du tissu cutané, sueur,...) et par des **paramètres techniques** (électrodes, filtres, amplification).

3. Le potentiel d'action



3. Le potentiel d'action

a) d'un neurone

Basic Neural Processes

b) PA musculaire

- Résulte d'une perturbation électrique sur la membrane musculaire
- Affecte la perméabilité de la membrane : ions Na^+ et K^+ : inversion de polarité :
 - fuite de part et d'autre de la membrane du fait de l'existence de protéines canaux.
 - + la pompe Na^+/K^+ : mécanisme actif (consom. d'ATP) située au niveau de la membrane ; elle transporte le Na^+ hors de la cellule et le K^+ dans la cellule.

$[\text{Na}^+] = 144 \text{ mM}$
 $[\text{K}^+] = 4 \text{ mM}$
 $E_{\text{Na}} = +60 \text{ mV}$
 $E_{\text{K}} = -90 \text{ mV}$
 $V_{\text{dip}} = -70 \text{ mV}$

Na^+ (extérieur) = 144 mEq/l
 Na^+ (intérieur) = 10 mEq/l
 K^+ (extérieur) = 4 mEq/l
 K^+ (intérieur) = 160 mEq/l

□ Suit la loi du tout ou rien :

Stimulation vs. Activation

→ Seuil d'excitation / potentiels infraliminaires :

Le stimulus doit avoir une intensité suffisante (> au seuil d'excitation) pour exciter la fibre, c'est-à-dire, déclencher un potentiel d'action (PA).

Intensité insuffisante = pot. infraliminaire.

4. Phases du potentiel d'action

1. *Dépolarisation*
 - Les canaux Na^+ s'ouvrent
2. *Repolarisation*
 - Fermeture canaux Na^+
 - Ouverture canaux K^+
3. *Hyperpolarisation*
 - overshoot du potentiel de repos

1. Dépolarisation :

Entrée massive de Na^+ ==> baisse de la polarité là où les canaux à sodium se sont ouverts.

$-70 \text{ mV} \rightarrow -60 \text{ mV} \rightarrow -50 \text{ mV} \rightarrow \dots$

Extérieur
Intérieur

mV
+40
0
-70
t (ms)
1.0 2.0 3.0

Au point stimulé, la polarité s'inverse.

2. Repolarisation :

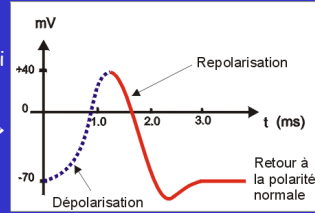
Le point dépolarisé reprend rapidement sa polarité :

Fermeture des canaux Na⁺.

Ouverture de canaux K⁺ qui étaient fermés

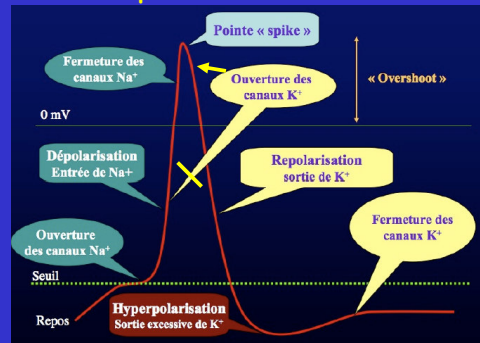
=> ↑ perméabilité au K⁺ =>

↑ sortie de K⁺

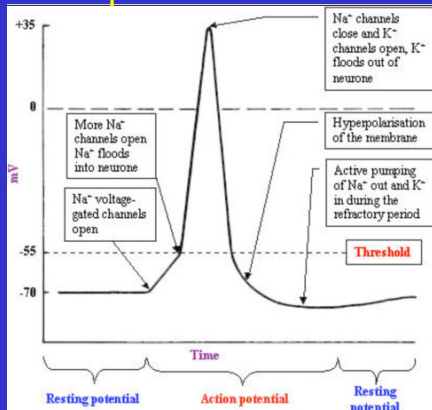


= naissance du potentiel d'action

Le potentiel d'action



Le potentiel d'action



II- L'ELECTROMYOGRAPHIE

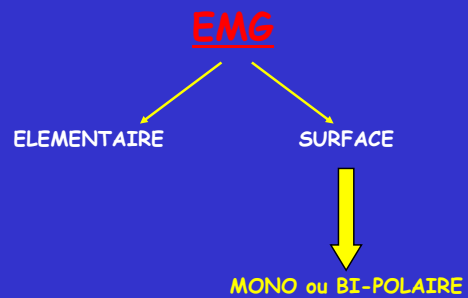
1. L'EMG élémentaire
2. L'EMG de surface
3. Traitement et interprétation du signal

• **Électromyographie (EMG) = étude de la fonction musculaire à travers l'examen des signaux électriques du muscle** (Basmajian and De Luca 1985)

- 'Electro' - électrique
- 'Myo' - muscle
- 'Graphy' - graphique

• **Pourquoi l'EMG ?**

- Déterminer *in vivo* les muscles actifs pour diverses activités
- Quantifier les activités musculaires / à différents états



1. EMG ELEMENTAIRE

Invasive (aiguilles ou fils fins implantés dans le muscle 0,25 μ m);

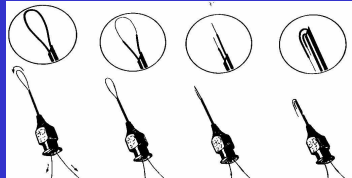
Précision (recueil de l'activité de quelques UMs);

Utilisation clinique ;

Muscles profonds ;

Généralisation au muscle entier difficile ;

Douloureux.



2. EMG SURFACE

Électrodes à gel auto-adhésives :

- technique conventionnelle

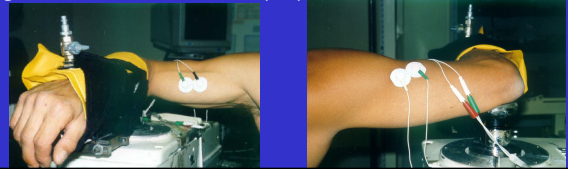
- utilisent un gel électrolytique pour améliorer la conduction ;

Non invasive ; Utilisation recherche appliquée ;

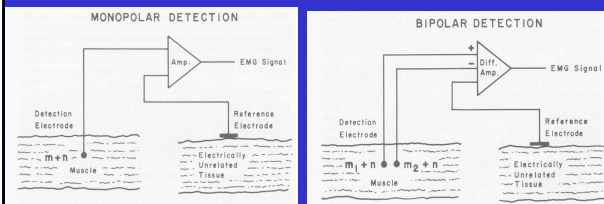
Muscles superficiels ;

Préparation de la peau (dégraissage, nettoyage) ;

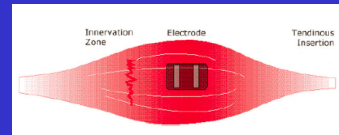
Rigueur des mesures et de la préparation



Électrodes de surface EMG



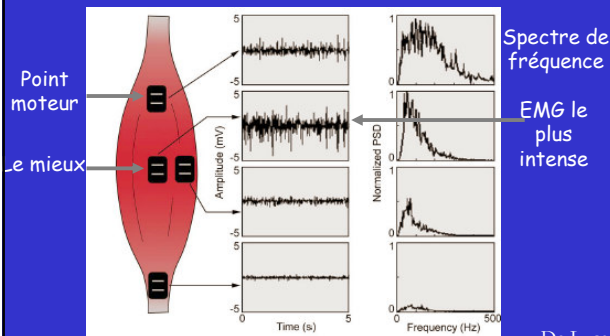
Placement des électrodes



- Placer les électrodes :
 - // aux fibres musculaires
 - Au milieu du corps musculaire
- Les fils doivent être immobilisés à la peau
- JAMAIS sur ou à côté de l'insertion tendineuse ni sur la zone d'innervation (**point moteur**)
 - Les potentiels d'action se déplacent étrangement (dans les 2 sens) et la détection EMG en est affectée (signal faible, voire nul)
- L'électrode de référence est loin et placée sur une aire neutre électriquement (os)

N.B: il doit y avoir seulement une électrode de réf. par personne.

Placement typique



De Luca

Préparation de la peau

- Réduire les effets des artefacts de la peau
 - graisse
 - poils
 - saleté
 - cellules mortes de la peau
 - transpiration
- Tous ces artefacts réduisent le signal EMG !

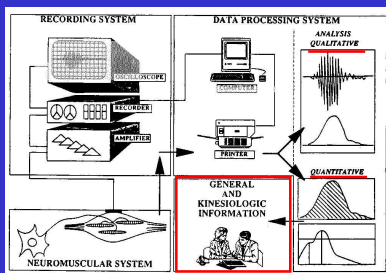
Préparation de la peau

- Enlever les poils et les couches mortes d'épiderme
- Nettoyer avec une solution à base d'alcool
- Laisser sécher
- Appliquer les électrodes
 - dans la direction des fibres musculaires
 - Sur le ventre musculaire (emplacement standardisé)
- Mesurer l'impédance des électrodes
 - < 5k Ω (norme)
 - Répéter la préparation de la peau si l'impédance est trop grande (éventuellement papier de verre)

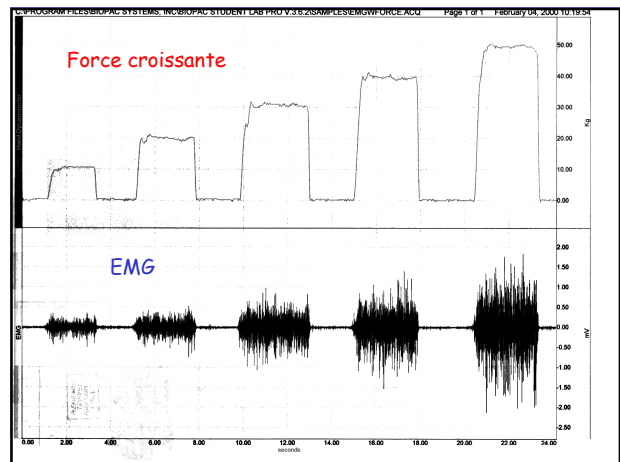
Le bruit dans le signal EMG

- Les signaux EMG sont très petits en amplitude : (entre quelques microvolts et 2-3 millivolts) = facilement contaminés →
- Bruit externe
 - Bruit électronique
 - Équipement de mesure / d'enregistrement
 - Bruit ambiant
 - TV, radio, lumières néons (50 Hz)
 - Artefacts de mouvement
 - Mouvement des électrodes ou câbles
- Muscles avoisinants : « cross talk effect »
- Conductivité de la peau
 - Varie avec transpiration, humidité ambiante, stress.

3. TRAITEMENT et INTERPRÉTATION du signal



Chaîne de mesure

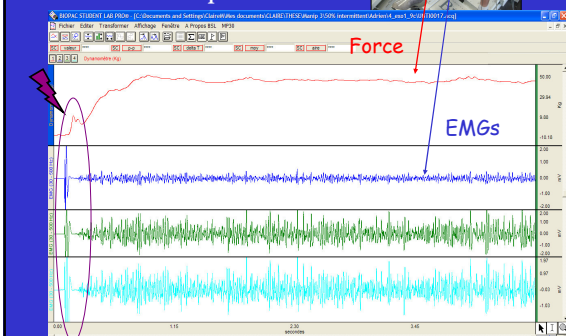


Exemple d'enregistrement :

Système d'acquisition
EMG : Biopac



Biodesx



L'onde M

Potentiel d'action "global" du muscle



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

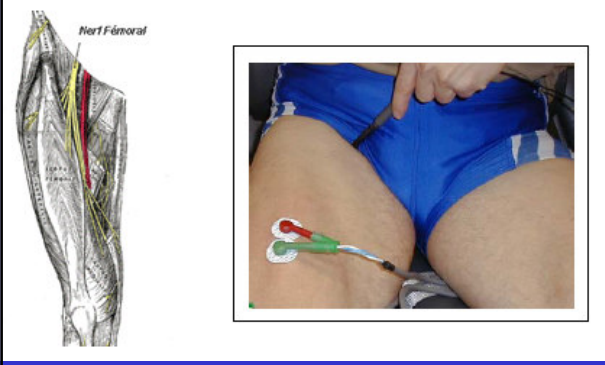
Accompagnée de la réponse mécanique avec une latence de 50 ms (durée variable)

Indice

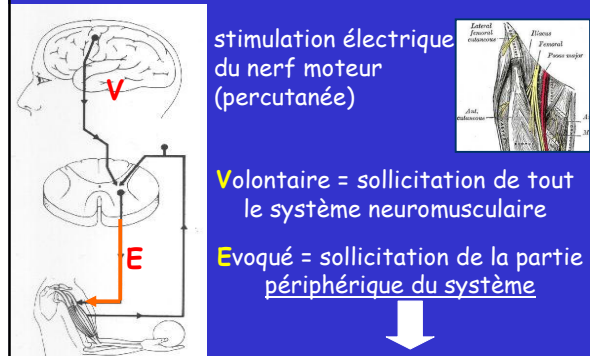
- * efficacité de la transmission neuromusculaire
- * efficacité de la propagation du signal le long du sarcolemme

Hicks et McComas, 1989

LA NEUROSTIMULATION



= contraction évoquée électriquement



stimulation électrique du nerf moteur (percutanée)

Volontaire = sollicitation de tout le système neuromusculaire

Evoqué = sollicitation de la partie périphérique du système



Étude des modifications en aval de la jonction neuro-musculaire = périphérique

↓
Technique de stimulation du nerf moteur

Analyse du potentiel d'action musculaire résultant ou onde M (EMG)

Analyse de la force produite

→ permet d'étudier des modifications de l'excitabilité, du couplage excitation-contraction et de la contractilité musculaire

a) Caractéristiques du signal



- au niveau local : PA sur muscle isolé; c'est un courant de type sinusoïdal dont l'amplitude est de 140mV et la durée de 10ms (fq: 100Hz)

- au niveau global : sur l'ensemble du muscle; l'amplitude qui peut varier de quelques μ V à quelques mV et la fréquence va de 20 à 500Hz

Remarque : si on connaît le domaine fréquentiel du signal à enregistrer on peut minimiser le domaine de fréquences appartenant au bruit par l'utilisation de filtres.

b) Amplification - Filtrage

• Les signaux recueillis peuvent être très faibles ; ils ont besoin d'être amplifiés pour les observer ; mais cette amplification ne doit pas induire une distorsion du signal.

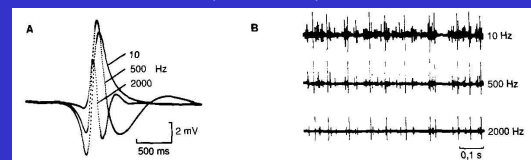
• Le filtrage des signaux est nécessaire pour éliminer les artéfacts d'enregistrement et le bruit généralement lié à l'amplification.

Fréquence d'échantillonnage :

Théorème de SHANNON : il faut enregistrer le signal à une fréquence = 2 fois la fréquence la plus rapide (pour ne pas risquer de « rater » des événements).

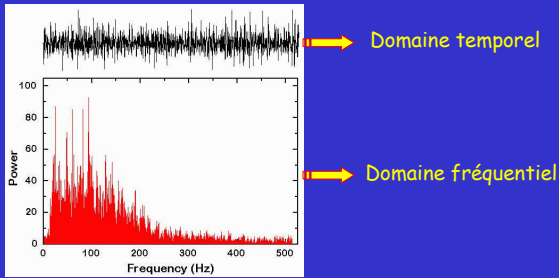
Filtre : caractérisé par une fréquence de coupure, il laisse passer les fréquences au dessous ou au dessus de cette fréquence de coupure.

Passé haut, Passé bas, Passé bande



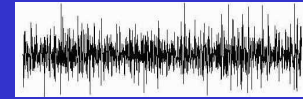
(d'après Stålberg et Trontelj 1979)

c) Traitement des signaux

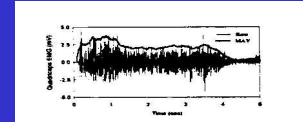


• Domaine temporel

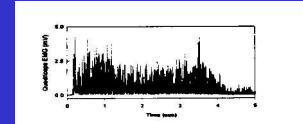
BRUT



ENVELOPPE



REDRESSE



CALCUL :

Sur signal redressé

$$iEMG = \int_1^{t+T} |EMG(t)| dt$$

Sur signal brut

$$RMS = \left[\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (EMG(t))^2 dt \right]^{1/2}$$

Root Mean Square = la racine carrée de la moyenne du carré :

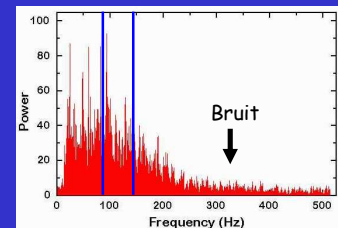
Correspond au nombre d'UMs recrutées et à leur fréquence de décharge lors d'une contraction volontaire (De Luca, 1997).

• Domaine fréquentiel

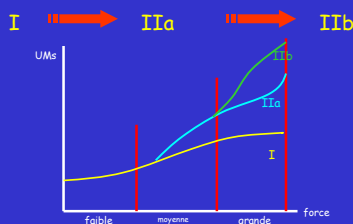
Densité Spectrale de Puissance : transformation mathématique du signal du domaine temporel au domaine fréquentiel pour l'analyse de son contenu en fréquence (c'est l'énergie qui correspond à chacune des fréquences du signal)

Fréquence Médiane : fréquence qui partage en 2 le spectre de fréquences (autant de fréquences de chaque côté)

Fréquence Moyenne : c'est une moyenne.



L'activité musculaire est en partie dictée par la loi de recrutement des UMs décrite par Henneman et coll. (1965) : recrutement des fibres de petit diamètre en 1^{er} (les + excitables) → fibres lentes (exception : mouvement explosif)



→ Le recrutement spatial est ordonné par le principe de la taille.
→ Le recrutement temporel est déterminé par la fréquence de décharge des UMs.

Le signal EMG de surface représente donc l'ensemble des caractéristiques de recrutement des UMs : le recrutement spatial et le recrutement temporel.

III- L'EMG et la fatigue

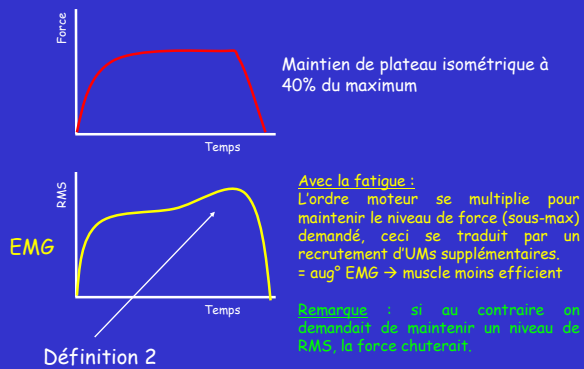
1. Définitions de la fatigue
2. Contractions sous-maximales
3. Contractions maximales
4. Fatigue centrale / périphérique
5. Limitations de l'EMG et Résumé

III- L'EMG et la fatigue

1. Définitions de la fatigue :

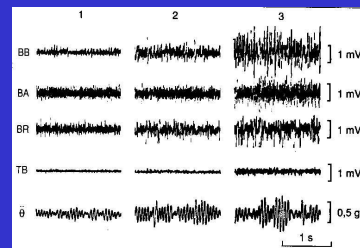
1. "La diminution de la capacité maximale d'un muscle ou d'un groupe musculaire à produire un niveau de force ou de puissance"
(Bigland-Ritchie et al. 1986b)
2. "Une diminution du rendement musculaire pour maintenir une force" (Edwards 1981).
3. "Une réduction, induite par l'exercice, de la capacité du muscle à produire une force ou une puissance, que la tâche puisse être maintenue ou non" (Barry et Enoka 2007)

2. Contractions sous-maximales :

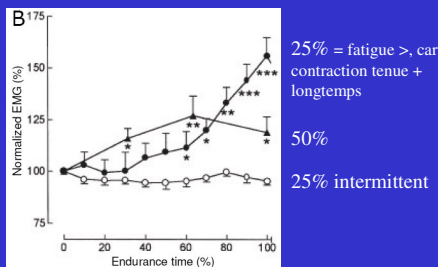


Modification de l'EMG global des fléchisseurs du coude avec la fatigue.

Trois séries d'enregistrements effectuées au début, au milieu et à la fin d'une contraction isométrique à 50% de la force maximale jusqu'à épuisement.



On observe une augmentation des amplitudes EMG ainsi que des tremblements plus importants au niveau du poignet.



B) Evolution de l'amplitude de l'EMG au cours de contractions sous-maximales soutenues à 25 % (●), 50 % (▲) de la CMV et au cours de contractions intermittentes à 25 % (○), en fonction du temps d'endurance.
* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$ significativement différente de la première valeur (d'après Duchateau et al. 2002).

3. Contractions maximales :

Encadré 3 : Appréciation de la fatigue

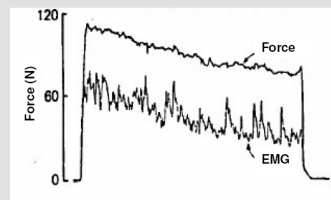


Figure 1 : Fatigue lors d'une contraction maximale (d'après Bigland-Ritchie et al. 1983).

Cette figure montre que la force et l'activité électromyographique (EMG) diminuent conjointement lors d'une contraction maximale volontaire, traduisant une diminution de la performance et le développement de la fatigue.

Effets de la FATIGUE musculaire sur le signal EMG :

Diminution de l'EMG lors de contractions max = dim° fr de décharge des UM

De Luca

La fatigue se traduit par :

- une augmentation de la puissance totale du spectre
- un déplacement vers les basses fréquences (fr)

→ Diminution de la fr moy et de la fr med
 → due à une dim° de vitesse de conduction des PA au niveau de l'EMG (liée à une acidification du milieu + recrutement préférentiel des fibres lentes avec la fatigue)

(d'après Bakirzade 1982)

Utilité de l'EMG pour prouver l'apparition de la fatigue lors de contraction max ou sous-max.

4. Fatigue centrale / périphérique :

Chaîne de commande de la production de force

Fatigue Centrale : RMS/M

Fatigue périphérique

EMG → RMS

Transmission - Excitabilité
 Couplage excitation-contraction

Onde M
 Secousse

Méthodes d'investigation de la fatigue

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

Utilité de l'EMG pour déterminer : 1. une fatigue centrale (RMS/M)
 2. l'efficacité de la transmission du PA à la fibre (M)
 3. l'excitabilité des motoneurones (H)

Un autre indice de la fatigue centrale : La co-activation

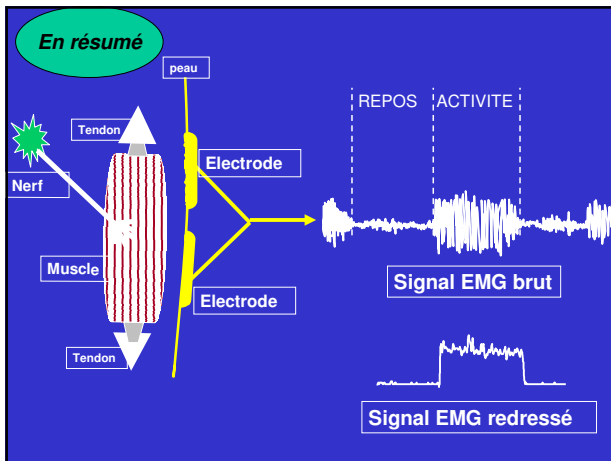
La fatigue n'influence pas seulement l'activation mais aussi la co-activation = activation de l'antagoniste :

Psek et Cafarelli, 1993

→ D'une façon générale, la fatigue affecte la coordination

5. Limitations de l'EMG

- **Problèmes possibles :**
 - Allergie à l'adhésif de l'électrode ou suite au nettoyage
 - Tests sur plusieurs jours **difficile** du au repositionnement des électrodes
 - Possible infections avec des électrodes intramusculaires
 - Difficile à comparer entre les sujets...donc utiliser %
 - EMG de surface n'est pas approprié pour tous les muscles !
 - Le positionnement des électrodes doit être rigoureux



En résumé Le signal EMG

Nous raconte l'histoire de l'activité musculaire pendant un mouvement en étudiant les potentiels électriques générés par le SNC pour la contraction musculaire.

Peut donc expliquer :

- Quand un muscle ou un groupe musculaire est actif
- La magnitude de l'activité (mV, normalisation % CMV)
- La fréquence du signal et la fatigue musculaire
- L'origine de la fatigue, en couplant à la neurostimulation + effet entraînement : aug° activation, dim° coactivation

IV- Les applications

Electromyographie

↓

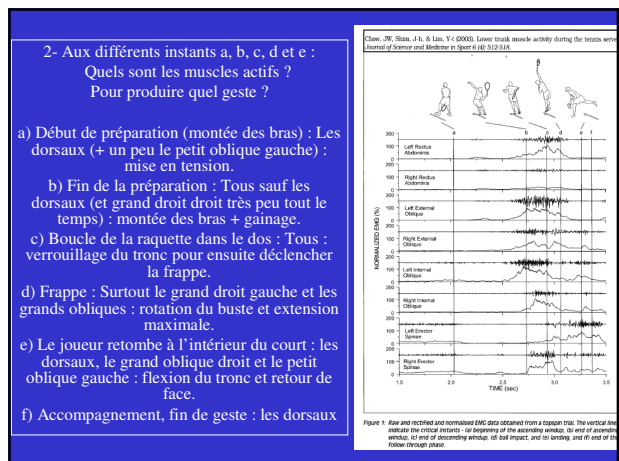
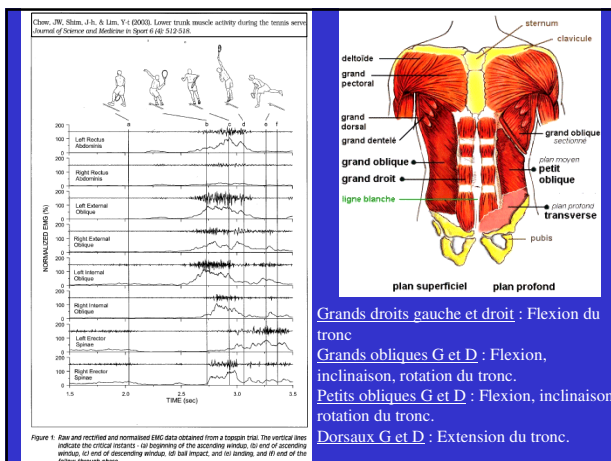
Analyse de pattern EMG lors du mouvement


Electromyographie

↓

Analyse EMG des muscles du tronc lors du service

1





Electromyographie

↓

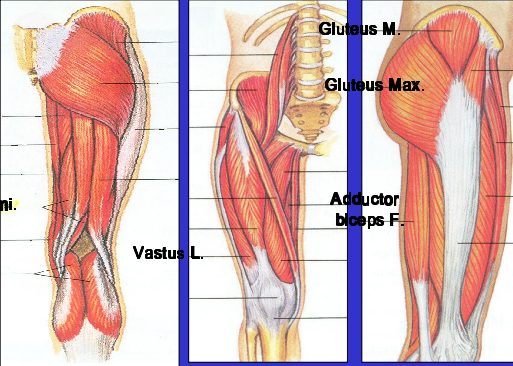
Analyse EMG de la hanche et du genou lors d'un swing de golf

2

Les méthodes

- 13 (hommes), 3 (femmes) : handicap < à 5
âge moyen : 36 ans (27-59)
droitiers
- 7 muscles étudiés : hanche & genou
 - *gluteus maximus* supérieur
 - *gluteus maximus* inférieur
 - *Gluteus medius*
 - *Adductor*
 - *biceps femoris*
 - *Semi membranousus*
 - *Vastus lateralis*

Les muscles hanche & genou



Labels in diagrams: *Gluteus M.*, *Gluteus Max.*, *Semi.*, *Vastus L.*, *Adductor*, *biceps F.*

La méthode EMG

- Oscilloscope (affichage)
- Filtre passe-bande
Enregistré sur un instrument multi-canaux
> fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz
- Signal EMG pic sur 1 s pour un muscle > test de force
– valeur d'amplitude normalisée (100%) : NIEMG

Les phases du golf

■ Jambe "qui accompagne"
■ Jambe "qui conduit"

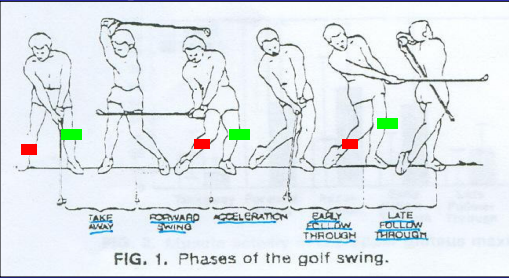
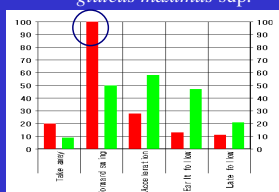


FIG. 1. Phases of the golf swing.

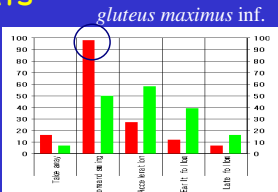
Résultats

■ Jambe "qui accompagne"
■ Jambe "qui conduit"

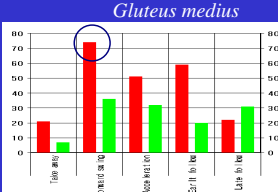
gluteus maximus sup.

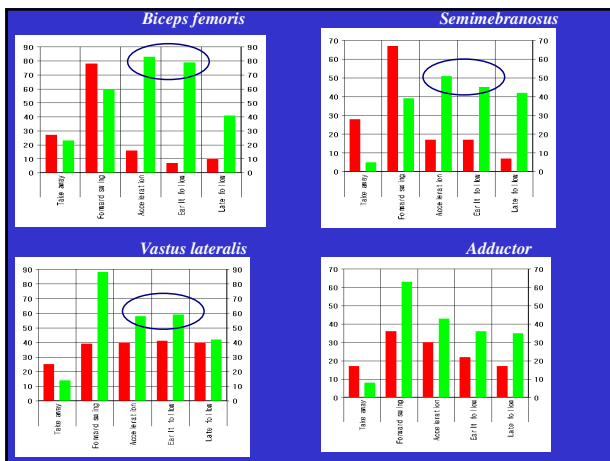


gluteus maximus inf.



Gluteus medius





Discussion

- Phase de préparation
- Swing vers l'avant
- Accélération
- Frappe d'accompagnement précoce
- Frappe d'accompagnement tardive

Conclusion

- Les extenseurs (*gluteus*) & adducteurs de la hanche de la jambe qui accompagne le mouvement, initient la rotation du bassin lors du swing vers l'avant
- Les muscles de la jambe qui conduit le mouvement stabilisent le genou lors de la rotation du bassin
- IMPLICATION en termes : de gestuelle technique (mouvement « idéal ») ; de renforcement musculaire

Electromyographie

↓

Analyse de pattern de la marche chez l'enfant avec atteinte cérébrale

3

EMG et atteinte cérébrale

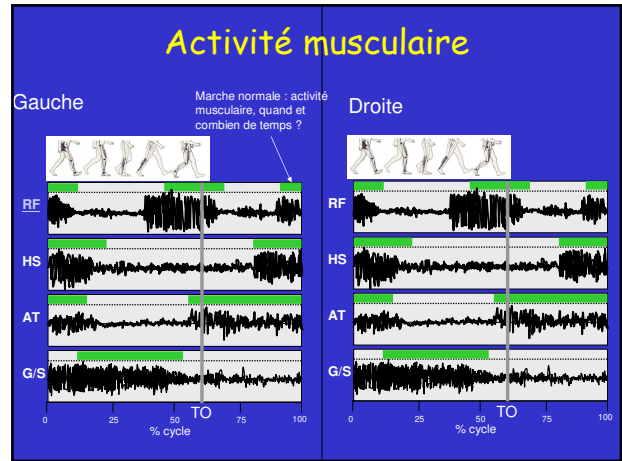
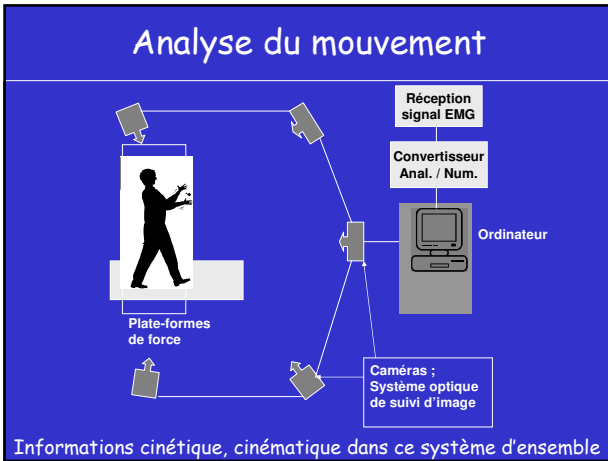
- Comparer le timing de l'activité musculaire chez ces patients avec des patterns 'standard' pour déterminer si les muscle(s) se comportent de manière approprié ou sont alors anormalement pathologique
- Révèle les muscles produisant l'anormalité dans les patterns du mouvement (ex: la spasticité)
- Recommandations appropriés pour interventions chirurgicales (diagnostic renforcé dans l'analyse fonctionnelle du mouvement)

Cycle locomoteur de la marche

balancer Final talon contact pied plat orteille opposé talon lever Opposé foulée talon orteille sans contact balancer Phase

Quels muscles sont affectés, et à quel(s) moment(s) de leurs contractions lors du cycle de marche?

- agir pour augmenter la force : rôle de l'entraînement



Étude de cas EMG et ergonomie :
Être bien assis : Comment ?

Apport de l'EMG + Analyse biomécanique pour la recherche de confort, de bonnes attitudes...

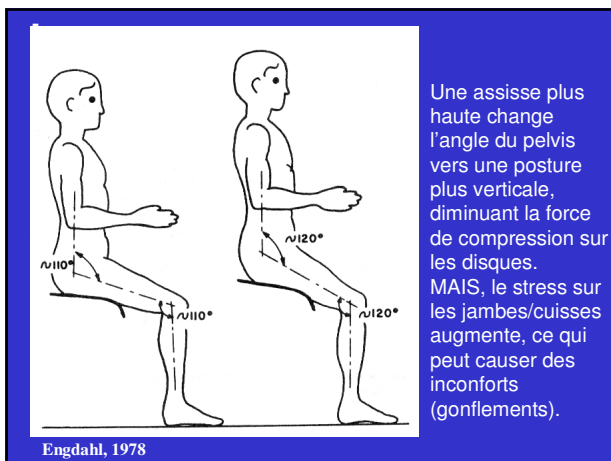
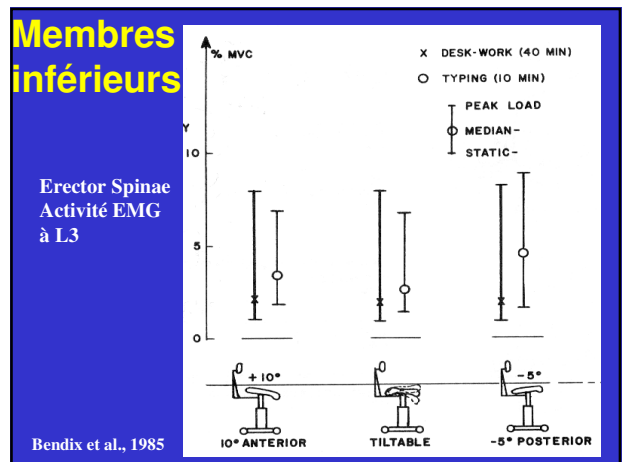
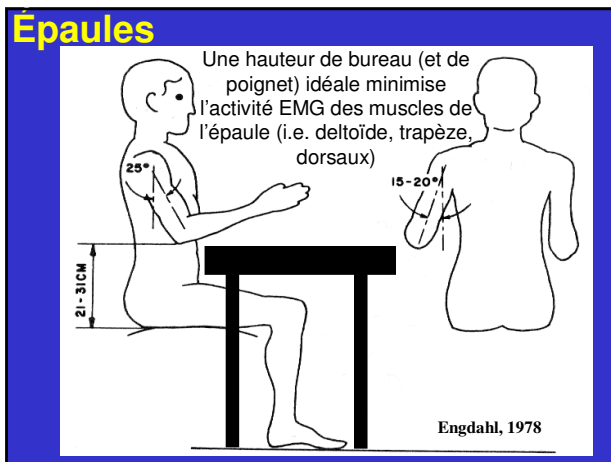
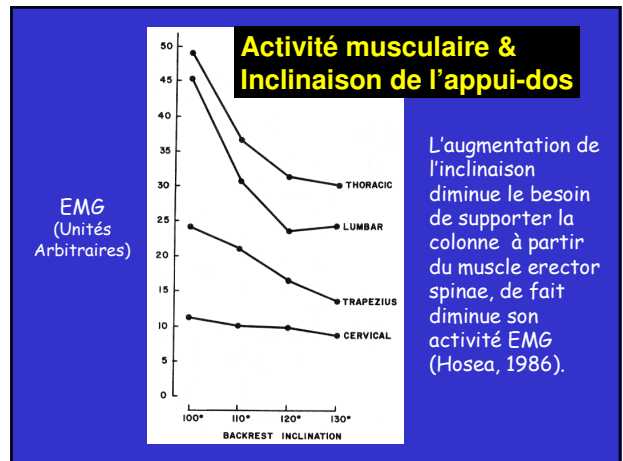
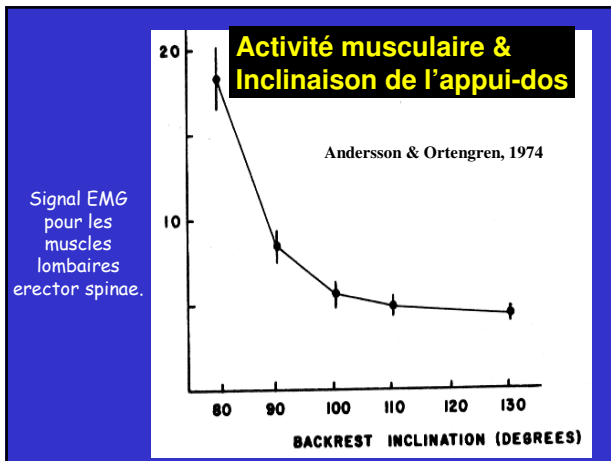
4

- ### Aperçu
- Bas du dos : activité musculaire (rôle de l'EMG)
 - Bas du dos : force des disques lombaires (analyse biomécanique)
 - Considérations design pour une bonne assise >> ergonomie

Le bas du dos : activité musculaire

Muscle Erector Spinae

- étendre le dos
- impliqué dans les flexions latérales du dos & les activités d'extension ; ex : maintien de la posture du dos pour quelque position assise
- plus l'activité EMG est grande, plus sera importante la force de compression sur les disques intervertébraux



Une assise plus haute change l'angle du pelvis vers une posture plus verticale, diminuant la force de compression sur les disques. MAIS, le stress sur les jambes/cuisses augmente, ce qui peut causer des inconforts (gonflements).

CONCLUSION

Signal EMG : petit signal (quelques mV) mais une grande quantité d'informations !