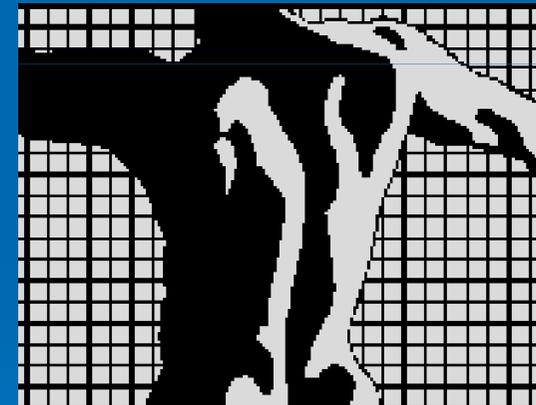


# L'Epaule et la Fatigue musculaire

**JC Jouanin (MD, PhD)**

[jcjouanin@gmail.com](mailto:jcjouanin@gmail.com)

[antony-centre-epaule@gsante.fr](mailto:antony-centre-epaule@gsante.fr)



**SFRE** Société Française  
de Rééducation de l'Epaule

[www.sfre.org](http://www.sfre.org)

*Monaco 2010*

## Fatigue: Electrostimulation historique (Marey 1875)

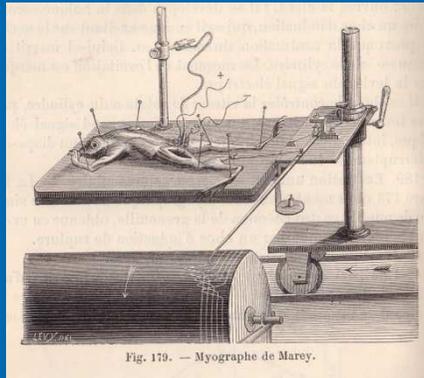


Fig. 179. — Myographe de Marey.

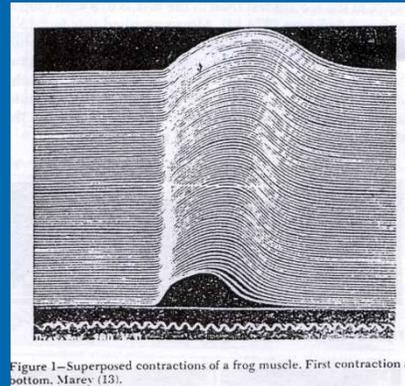


Figure 1—Superposed contractions of a frog muscle. First contraction at bottom. Marey (13).

Stimulation du gastrocnémien de grenouille

## Travail dynamique historique: Ergomètre de Mosso (1892)

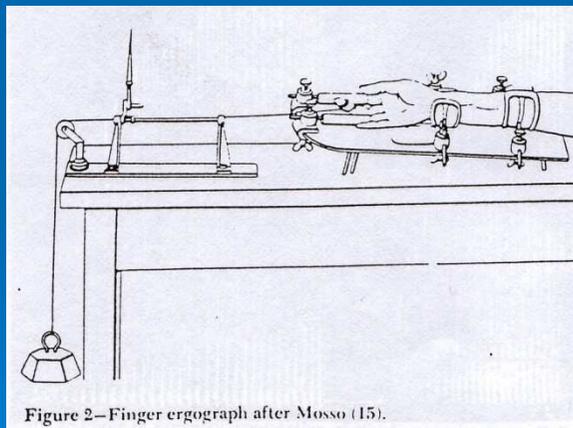


Figure 2—Finger ergograph after Mosso (15).

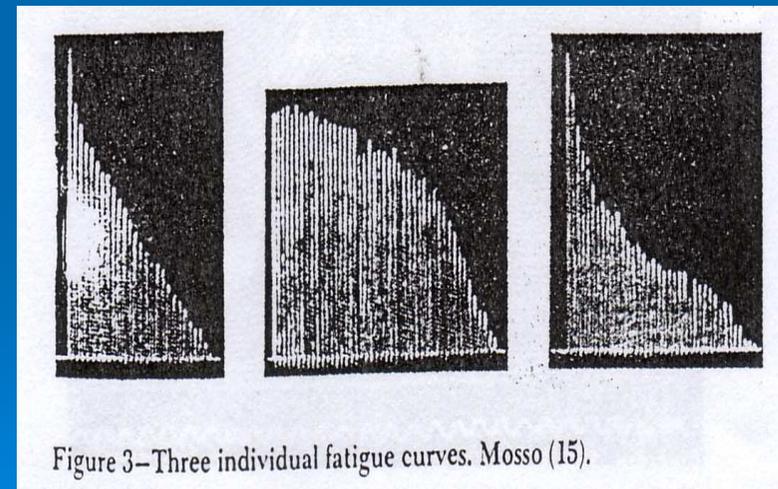


Figure 3—Three individual fatigue curves. Mosso (15).

Travail dynamique du majeur droit

# 1) Définition de la fatigue musculaire

- En physiologie musculaire la fatigue est définie comme l'impossibilité de maintenir le niveau de force ou de puissance requis (Edwards 1981)

Principe du recrutement des UM

Notion de temps-limite

Composition histologique des UM de l'épaule

# 2) Mise en évidence de la fatigue des muscles de l'épaule

L'actimétrie 3D

EMG et fatigue des UM de l'épaule

# 3) Physiopathologie et fatigue musculaire

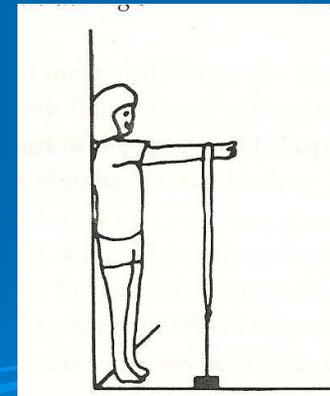
Synergies musculaires

Douleur et pression intramusculaire

Port de charge, la posture (fibres cendrillons)

Capsulite (génétique et vécu douloureux)

Syndrome du conflit de l'épaule



# 4) Répercussions de la fatigue musculaire sur le système nerveux central

# 1) Fatigue musculaire périphérique

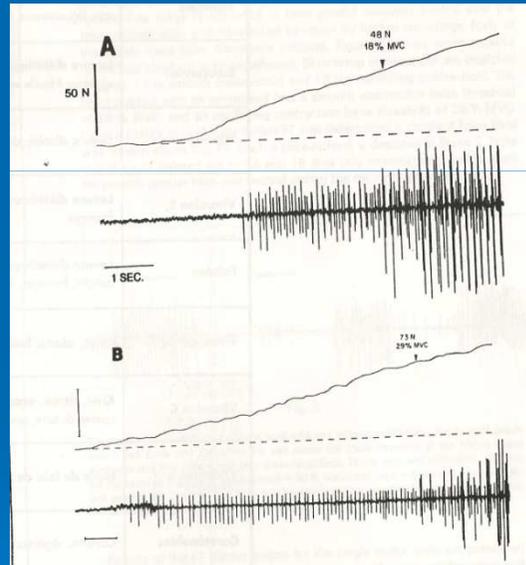
(Asmusen 1979)

Fatigue périphérique concerne l'unité motrice (UM)

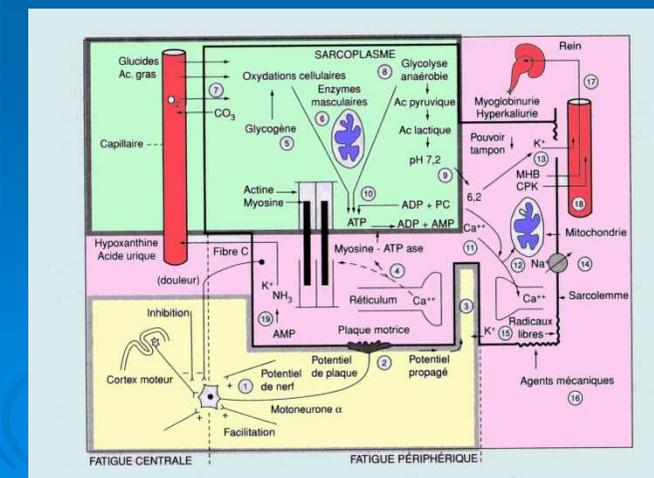
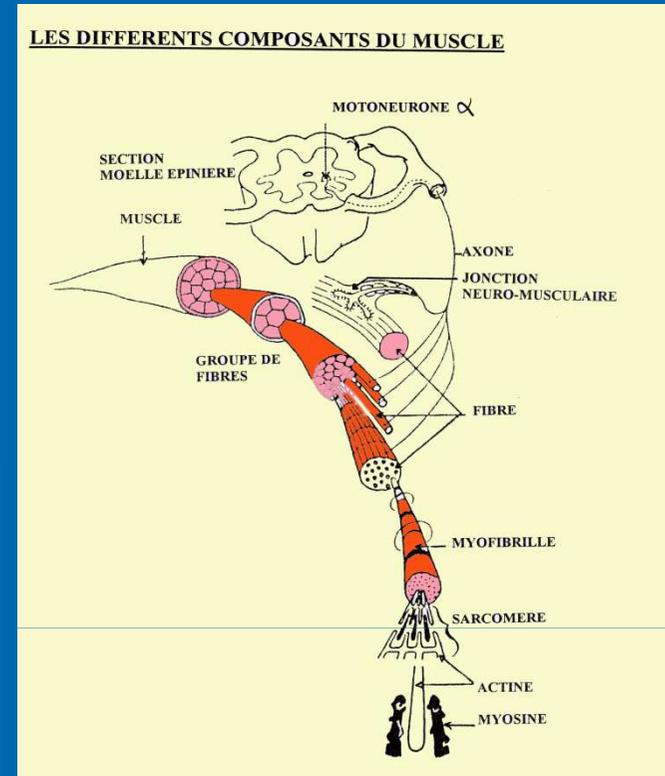
1) motoneurone, les nerfs périphériques, la plaque motrice, les fibres (ST et FT)

Principe du recrutement spatial et temporel des UM (Henneman 1965)

2) contraction: fibres musculaires (ATP)  
MAA, MAL, MA

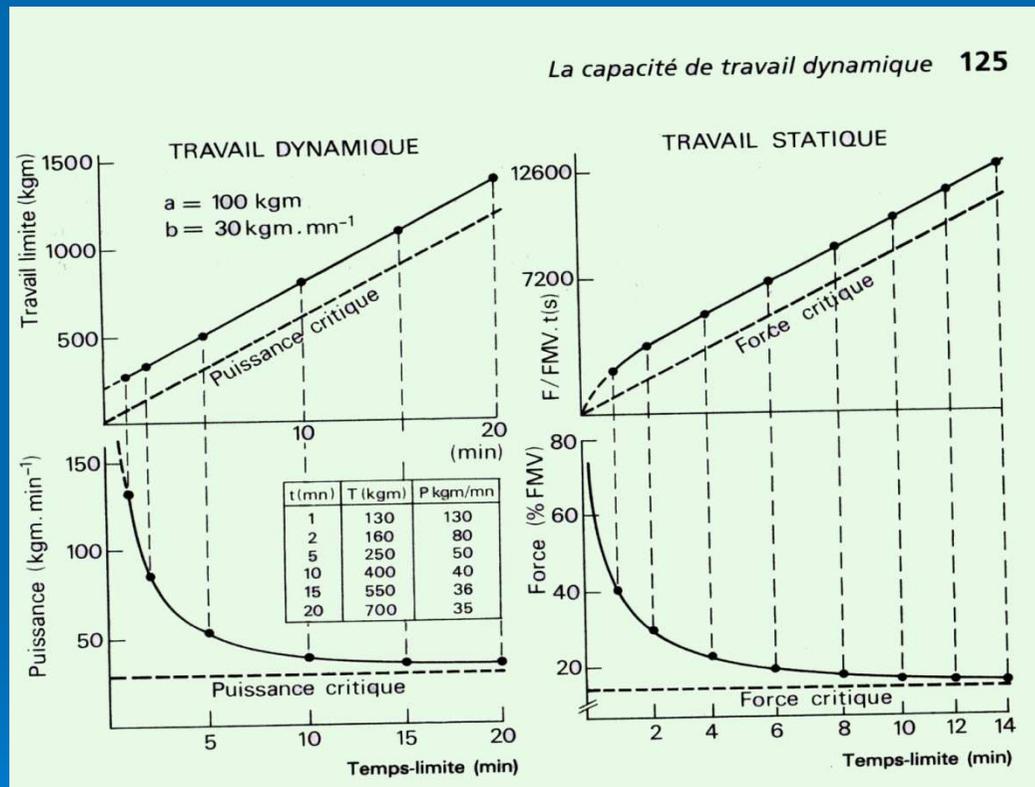


Extension genou 50% FMV (Cremer et al 1983)



# 1) Notion de temps limite – travail limite

(d'après Sherrer  
et Monod 1960)



Le TL est spécifique du  
type d'articulation.

L'articulation de l'épaule est  
la plus fatigable

(Frey Law, Avin 2010)

Le TL d'une CI à 20, 40 ou 50%  
de la FMV dépend de l'angle  
d'inclinaison de l'épaule (0°, 30°,  
60°) et de la flexion du coude à  
120°, 90°, 60°

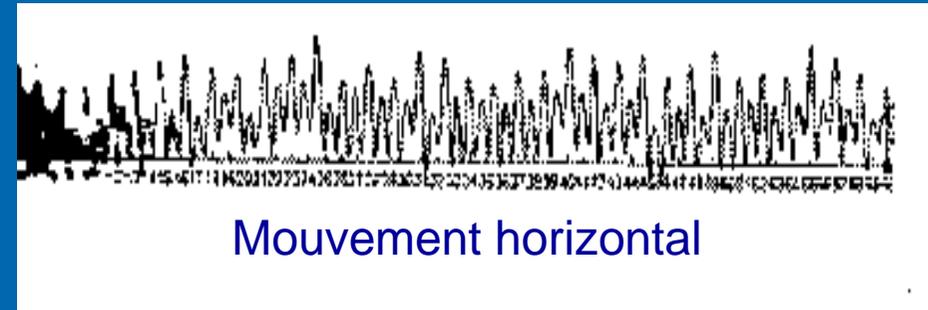
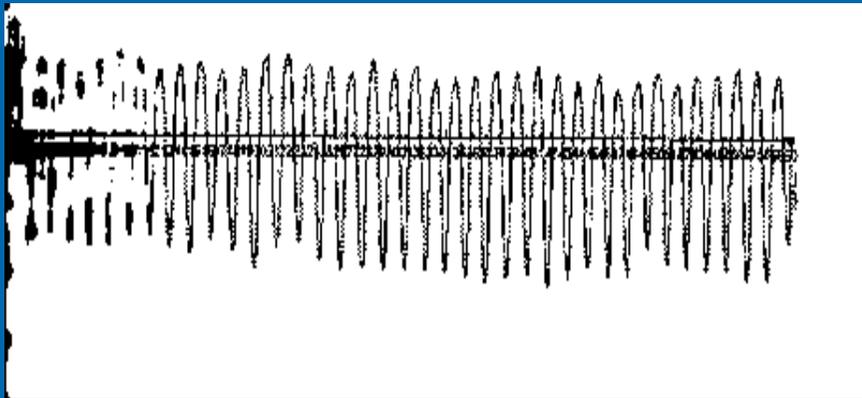
(Mamaghani et al 2002)

# 1) Composition UM épaule *(Johnson et al 1973)*

	ST (fibre I)	FT (fibre II)
Biceps brachii (surface)	42,3	57,7
Biceps brachii (profond)	50,5	49,5
Deltoïde (surperficiel)	53,3	46,7
Deltoïde (profond)	61	39
<b>Infraspinatus</b>	<b>45,3</b>	<b>54,7</b>
Pectoralis major (clavicule)	42,3	57,7
Pectoralis major (sternum)	43,1	56,9
Rhomboïd	44,6	55,4
Subscapularis		
<b>Supraspinatus</b>	<b>59,3</b>	<b>40,7</b>
Teres Major		
Trapezius	53,7	46,3
Triceps (surface)	32,5	67,5
Triceps (profond)	32,7	67,3

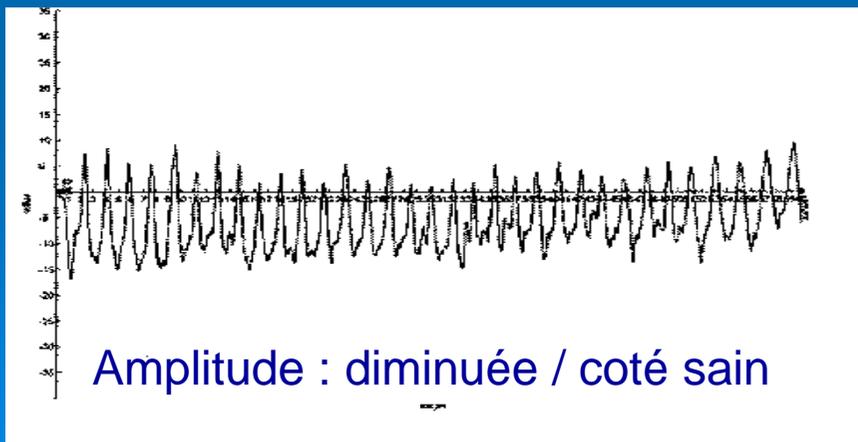
## 2) Mise en évidence de la fatigue des muscles de l'épaule, Actimétrie 3D (d'après Marc et al 2009)

1) ABD-ADD horizontale,  
38 mvts sans fatigue, bras sain



(tendinites et TMS)

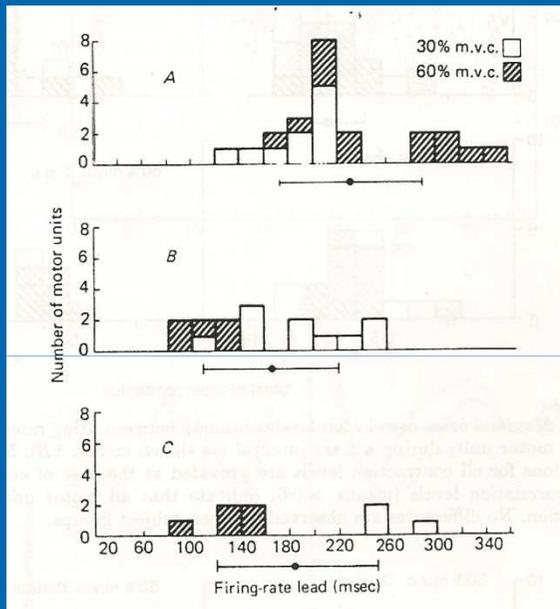
2) Courbe de fatigue, 33 mvts,  
bras pathologique



## 2) EMG et Fatigue des UM

(Deluca et al 1982, Hagberg 1989, Gerdle et al 1993, Farina et al 2003)

- Deluca: A) nageurs, B) pianistes, C) haltérophiles,
- Deltoïde et 1<sup>er</sup> interosseux dorsal: CI 30 et 60% FMV



La fréquence de décharge des UM et le seuil de recrutement des UM du deltoïde sont liés, (ST puis FT).  
L'entraînement en endurance du deltoïde allonge la fréquence de décharge des UM / sujet non entraîné, (ST ++)

*Hagberg*: EMG trapèze D et G de 0 à 100% FMV, droitiers

D: activité EMG de 0 à 40% FMV < / à G  
Différence EMG / ST++ à D > ST à G

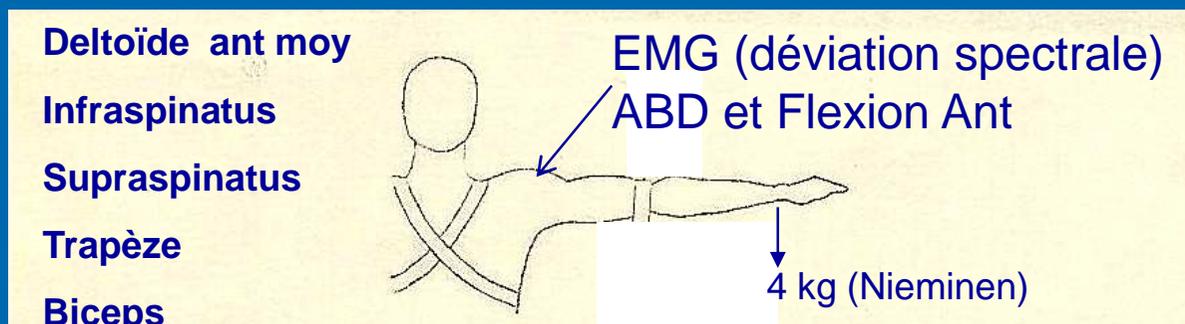
*Farina*: confirme pour les gauchers

*Gerdle*: trapèze inf, deltoïde ant, infraspinatus 18, 50% FMV.  
A 18% FMV EMG trapèze: cte; deltoïde: ↘ 40% TL (ST)  
infraspinatus ↗ 20% TL puis ↘ (FT fatigables)

Cela suggère que la capacité des muscles de l'épaule à produire de la force et à la maintenir est liée à l'homogénéité de stimulation des UM

### 3) Fatigue et Synergies musculaires

(Hagber 1981, Nieminen et al 1995, de Looze et al 2009)



*Hagberg*: Flex Ant, ABD 10% FMV  
Ap 1min: Flex Ant: supraspinatus,  
ABD: trapèze fx sup  
Ap 5 min: supraspinatus et trapèze sup sont fatigués (EMG)

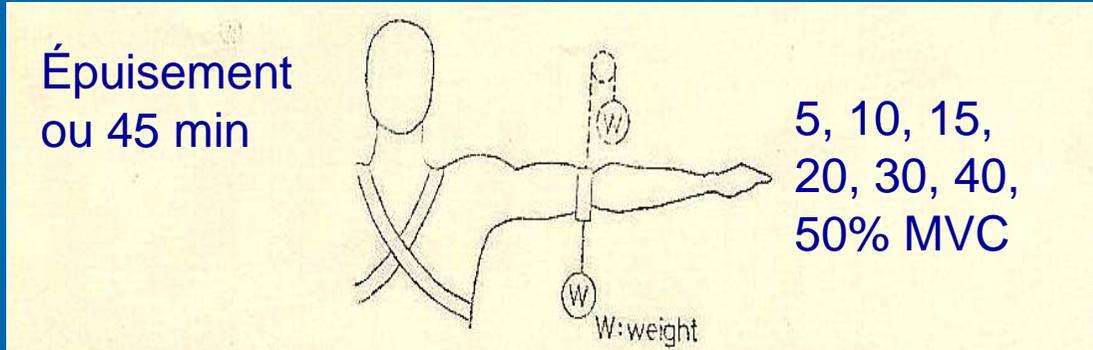
*Nieminen*: Flex Ant  
Le deltoïde ant, l'infraspinatus et le supraspinatus sont les premiers à présenter des signes de fatigue  
Le trapèze se fatigue plus lentement

*de Looze*:  $F < 20\%$  FMV / 1h  
Trapèze fx moy: fatigue EMG, extension vers partie inf du trapèze,  
(si  $F < 15\%$  FMV la tolérance est meilleure)

**Hiérarchisation temporelle  
des activations musculaires  
avec la fatigue et la force produite**

### 3) Fatigue, Douleur et réaction CV

(Ohashi et al 1987, Mathiassen 1993)



Ohashi: Sensation Deltoïde:  
A début ABD  
B lassitude, C fatigue,  
D douleur, E douleur intense  
F épuisement

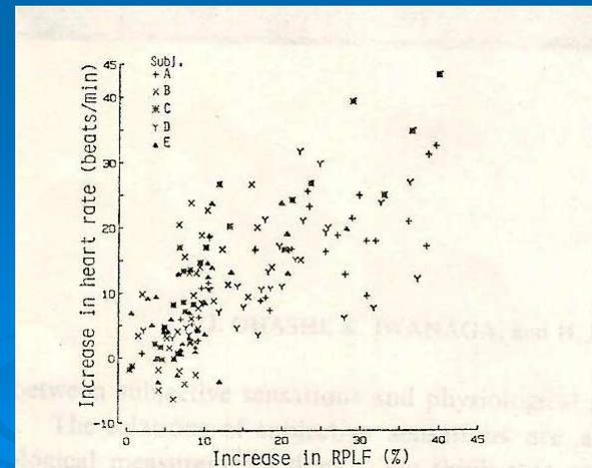
Faible CI: EMG et FC indépendants,  
Forte CI: EMG et FC sont corrélés

CI 10 à 50% FMV: FC  
augmente de A à E

Changements EMG sont plus  
nets que ceux de FC

Mathiassen: 1h à 60° ABD: 15% FMV  
4h ap 1 min à 25% FMV : récup incomplète FC, EMG

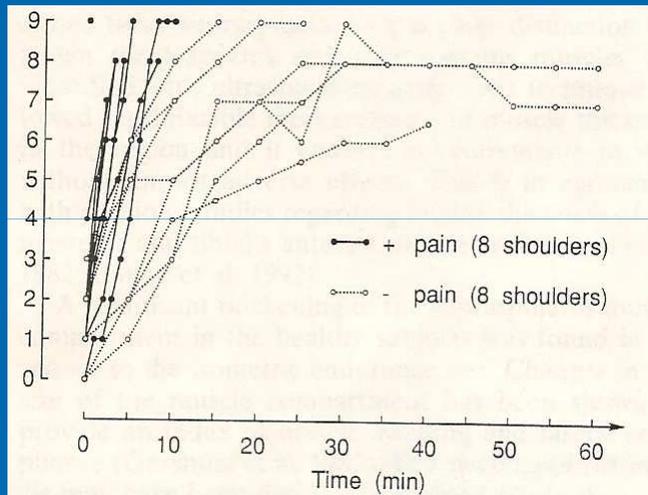
Réaction cardiovasculaire proportionnelle au  
niveau de force requis, au temps de maintien  
et à la douleur



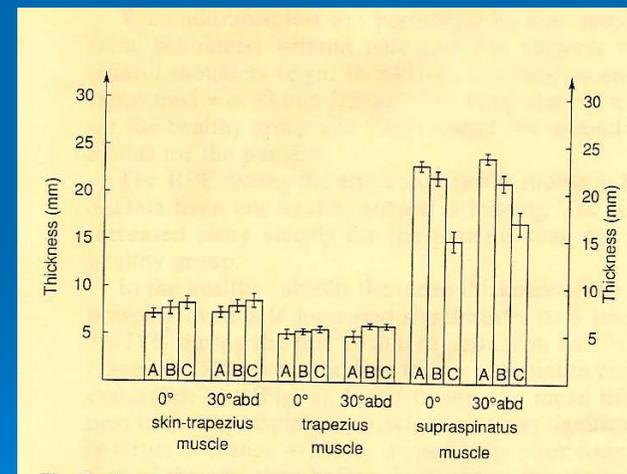
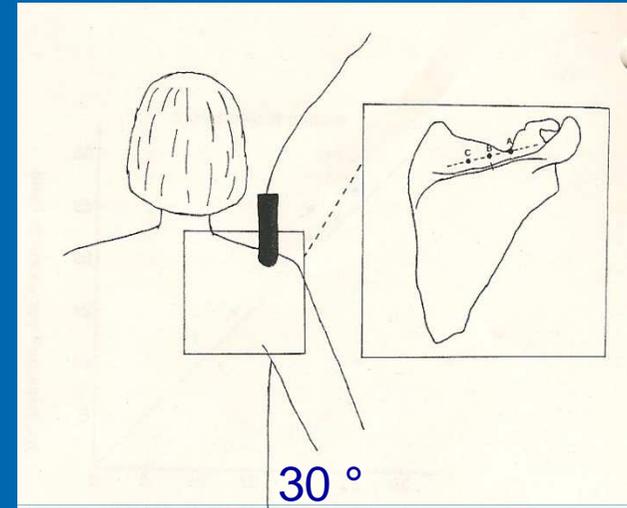
# 3) rôle de la pression intramusculaire (PIM)

(Jensen et al 1994, 1995)

- 30° d'ABD (test isométrique de l'épaule)
- TLim : 33 min sujets contrôles;  
5 min myofascial shoulder pain (fibromyalgie)



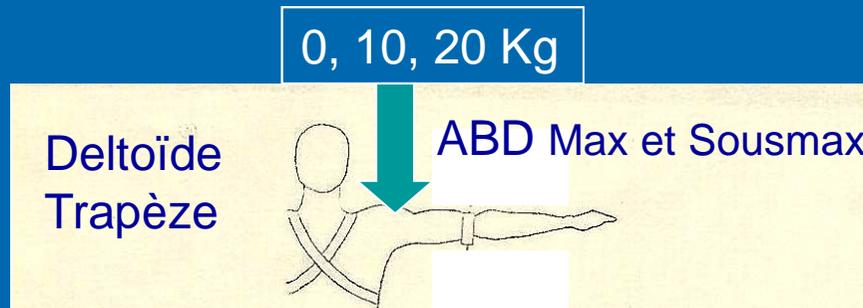
œdème:  
supraspinatus  
volume augmenté  
de 14%,  
trapezius: 0%



Cela explique en partie le rôle de la PIM dans la fatigue musculaire et la douleur

### 3) Port de charge et PIM

(Piscione et Gamet 2006, Graves et al 2007)



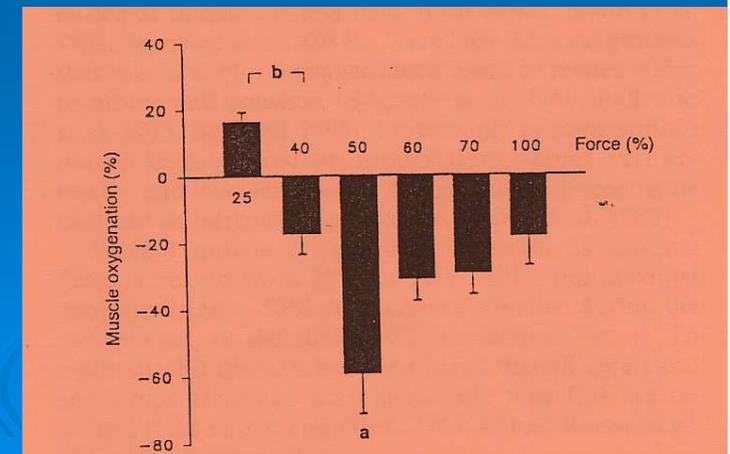
Port de charge, haltérophilie  
Œdème → Rhabdomyolyse  
du Supraspinatus par  
« overuse » (Graves et al 2007)

Compression locale: ↗ PIM et perturbation du flux sanguin musculaire

EMG deltoïde moy, trapèze fx sup

Fatigue des 2 muscles augmente avec la charge  
mais la performance max n'est pas modifiée  
Le temps-limite de la CI sousmax est diminué  
Seul le fx sup du trapèze a des signes EMG de  
fatigue (FT)

Oxygénation long supinateur  
Flex coude (Kahn et al 1998)



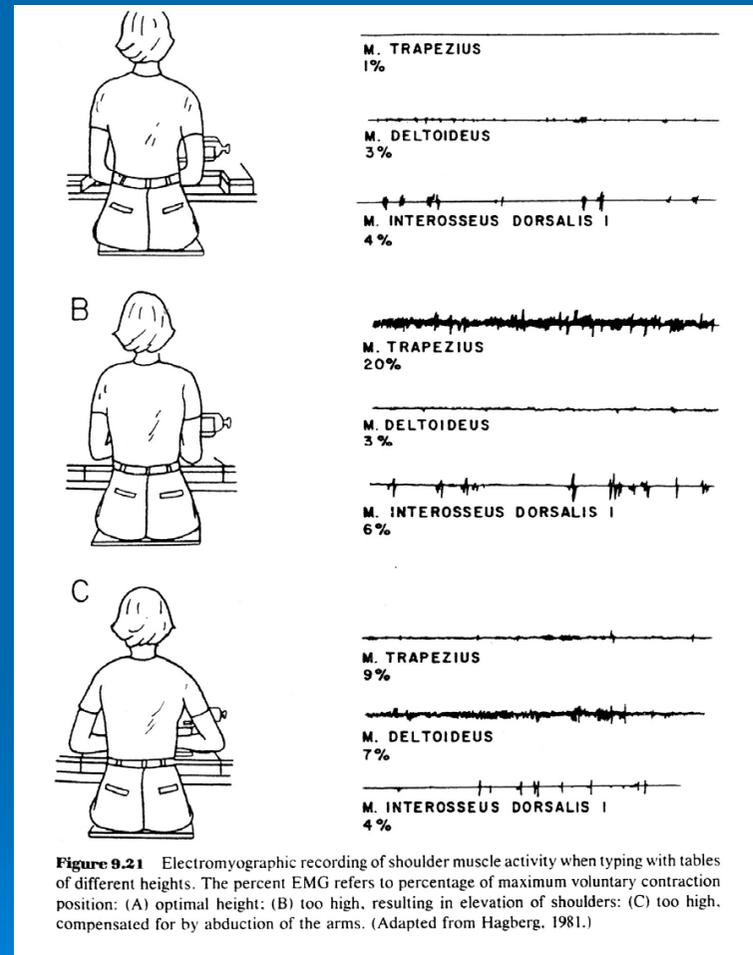
# 3) La posture: Hypothèse des fibres cendrillons

(Hägg, 1991)

1) Hauteur optimale du plan de travail

2) Trop haut compensé par une élévation des épaules

3) Trop haut compensé par une abduction des épaules  
Activités EMG du trapèze et du deltoïde lors de la frappe dactylographique



### 3) Anomalies de la commande motrice des trapèzes douloureux chroniques

Roulement des UM  
UM pause activité EMG:  $t > 0.2$  s  
FMV  $< 0.5$  %

**plus de pauses chez les sujets  
sains / sujets atteints**

- Anomalies morphologiques et histochimiques de certaines fibres de ST en cas d'exposition au travail statique continu
- Fibres loqueteuses (ragged fibres) ou mitées (moth fibres)  
Déficit en ATP et PC
- Anomalie du recrutement moteur
- Absence de relâchement musculaire (gap) de certaines UM
- Interaction avec "stress" et fatigue

### 3) Rôle des facteurs Psychol et Génétique dans la douleur de l'épaule liée à la fatigue musculaire (George et al 2008)

**catéchol-O-méthyltransferase (COMT): gène codant l'enzyme mise en jeu dans la sécrétion des opioïdes endogènes :**

3 haplotypes:

LPS faible sensibilité à la douleur

APS sensibilité moyenne

HPS sensibilité élevée

ABD 60°, Flexion 30°, Rotation neutre

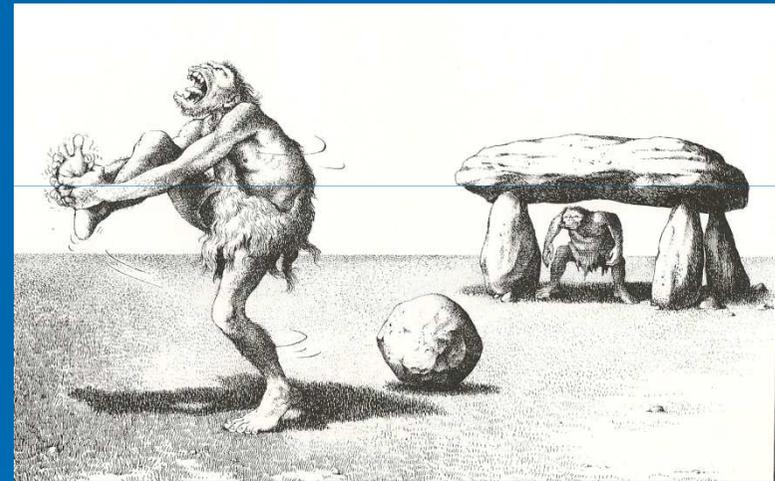
10 Contractions à 100%sec

puis 30 à 60%sec

(dynamomètre isokinétique)

Fatigue: si F résiduelle < 50% FMV

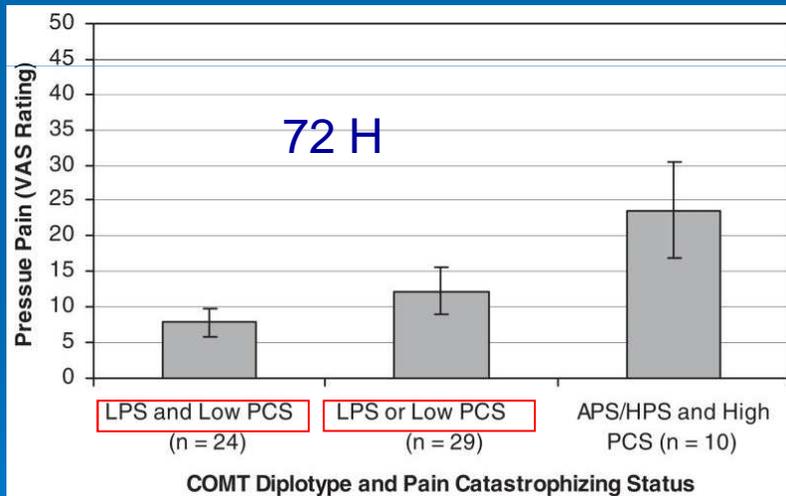
24, 48, 72 h: P = 4kg/cm<sup>2</sup> tendon coiffe rotateurs



Pain Catastrophizing Status (PCS):  
Echelle visuelle analogique (EVA) du vécu douloureux,

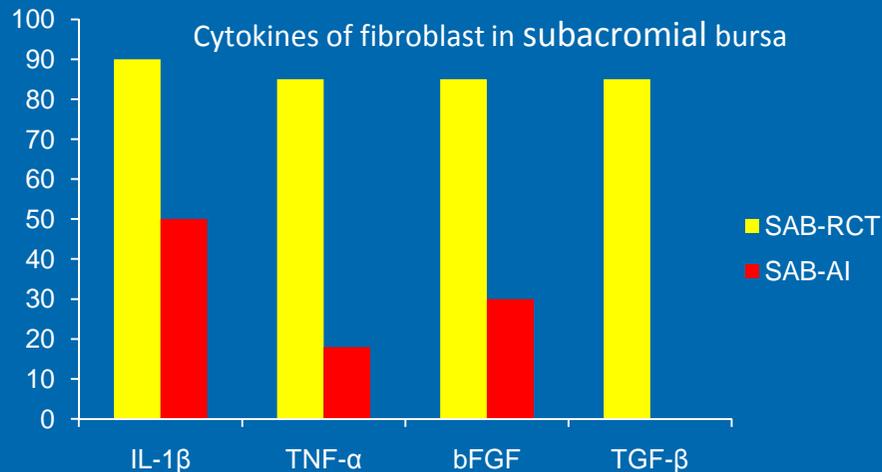
### 3) Rôle des facteurs Psychol et Génétique (suite)

	Prefatigue	24 H	48 H	72 H
Douleur intensité (EVA-PCS)	2.1 (3.3)	<u>27.2 (19.5)*</u>	<u>23.9 (20.1)*</u>	<u>19.9 (20.5)*</u>
Douleur évoquée (pression)	10.4 (13.0)	<u>18.4 (17.8)*</u>	<u>16.4 (17.9)*</u>	12.4 (16.6)
Force musculaire (N/m)	100%	76%	78%	79%
	23.7 (10.4)	<u>18.1 (8.9)*</u>	<u>18.1 (9.7)*</u>	<u>18.9 (10.1)*</u>
Impotence du membre sup	3.3 (3.8)	<u>16.5 (13.5)*</u>	<u>16.9 (14.2)*</u>	<u>13.8 (14.7)*</u>

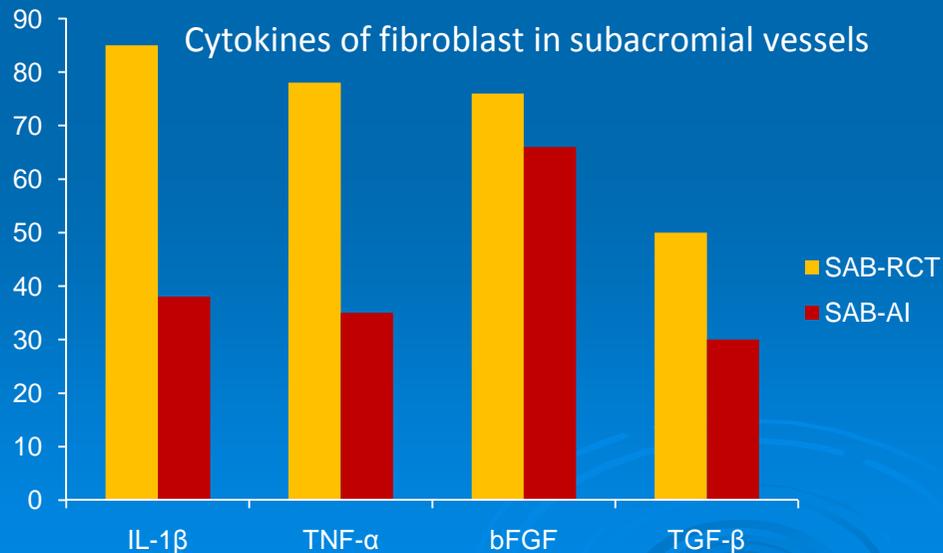


**Il existe une influence génétique et psychosociale sur la douleur de l'épaule**  
**Facteurs favorisant le Syndrome de douleur chronique de l'épaule (capsulite)**

### 3) Rôle des cytokines et du Facteur de croissance *(Sakai et al 2001)*



**Les cytokines inflammatoires et le facteur de croissance induisent la douleur et la fibrose secondaire à l'hypertrophie de la bourse sous acromiale dans les ruptures de la coiffe des rotateurs**

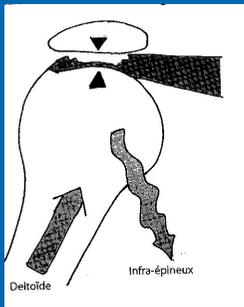


**L'expression des cytokines est moins importante dans les instabilités ant de l'épaule**

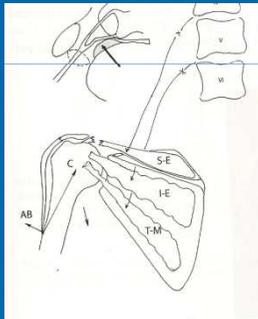
### 3) Fatigue et Synd du conflit *(Teyhen et al 2008, Myers et al 2009)*

H1: déficit fonctionnel de l'infraspinatus

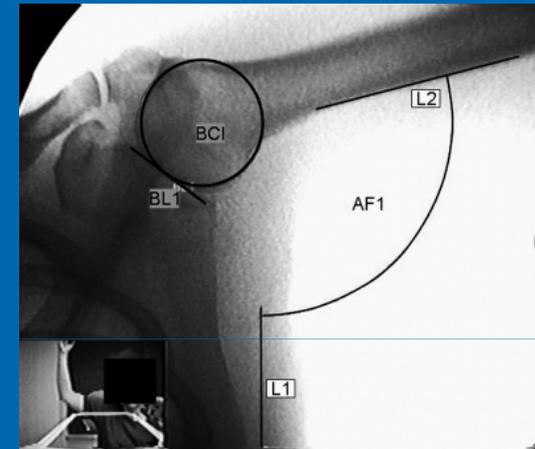
H2: théorie neurogène C4-C5-C6 (rétrécissement foreamen intervertébral) atrophie musculaire



H1



H2



N=20 ♂, étude de la migration TH avec la fatigue / Synd Conflit

ABD-RE répétées (2 s), F estimée à 5% masse corporelle

Coiffe des rotateurs F pré-fatigue (supra-infra spinatus, rotator teres)

Fatigue confirmée si F ↓ 40% / pré-fatigue

↓ **F: 54 ± 8.8%**

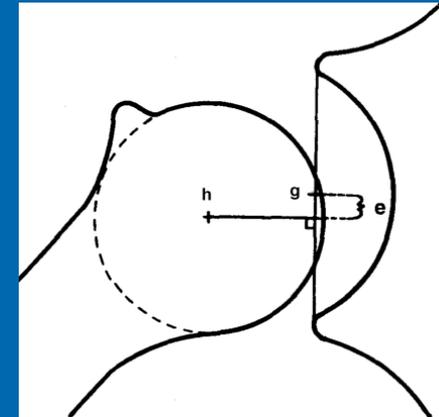
Force pré-fat: 7,2 ± 1.6 kg

Force post-fat: 3.2 ± 0.3 kg

TLim: ↓ **84.2 ± 21.2 sec**

### 3) Fatigue et Synd du conflit (suite)

- Post-fat: Migration TH: ~ **+ 0.79 mm**
- 6 à 40% espace sub-acromial: **(2 à 14 mm)**



Inter-action entre 3 muscles de la coiffe et le Deltoïde est modifiée à 90°

(F de translation du Deltoïde > F 3 muscles de la coiffe fatigués d'où une ascension de la TH)

Arm Elevation Angle	Prefatigue, mm <sup>a,b</sup>	Postfatigue, mm <sup>a,b</sup>
Arm at side (approximately 0°)	-1.48 ± 1.82	-0.39 ± 1.73
45°	-0.85 ± 1.14	+0.32 ± 1.49
90°	-0.73 ± 2.15	+0.32 ± 1.75
135°	+0.22 ± 2.14	+0.07 ± 2.58

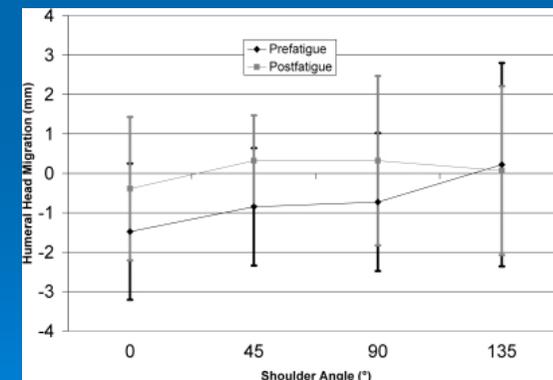
<sup>a</sup> Negative values indicate that the center of the humeral head was inferior to the center of the glenoid line.

<sup>b</sup> Positive values indicate that the center of the humeral head was superior to the center of the glenoid line.

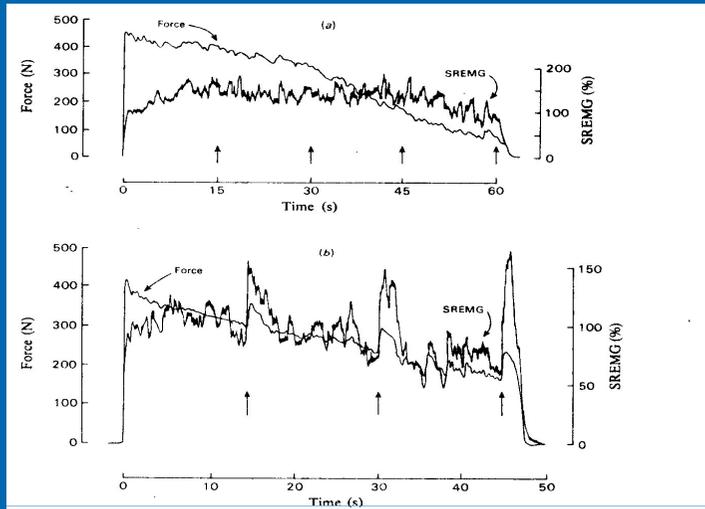
Entre 0 - 30° d'élévation: ↘ coactivation subscap ularis - infraspinatus  
↗ activité du deltoïde moy / sujets témoins

Entre 90 - 120° d'élévation: { douleur +++  
(Myers et al 2009) ↗ { coactivation sub scapularis – infraspinatus  
coactivation supraspinatus – infraspinatus  
+ importante / sujets témoins

- Les 3 muscles sont stabilisateurs de l'épaule et leur efficacité dépend de leur niveau de fatigue

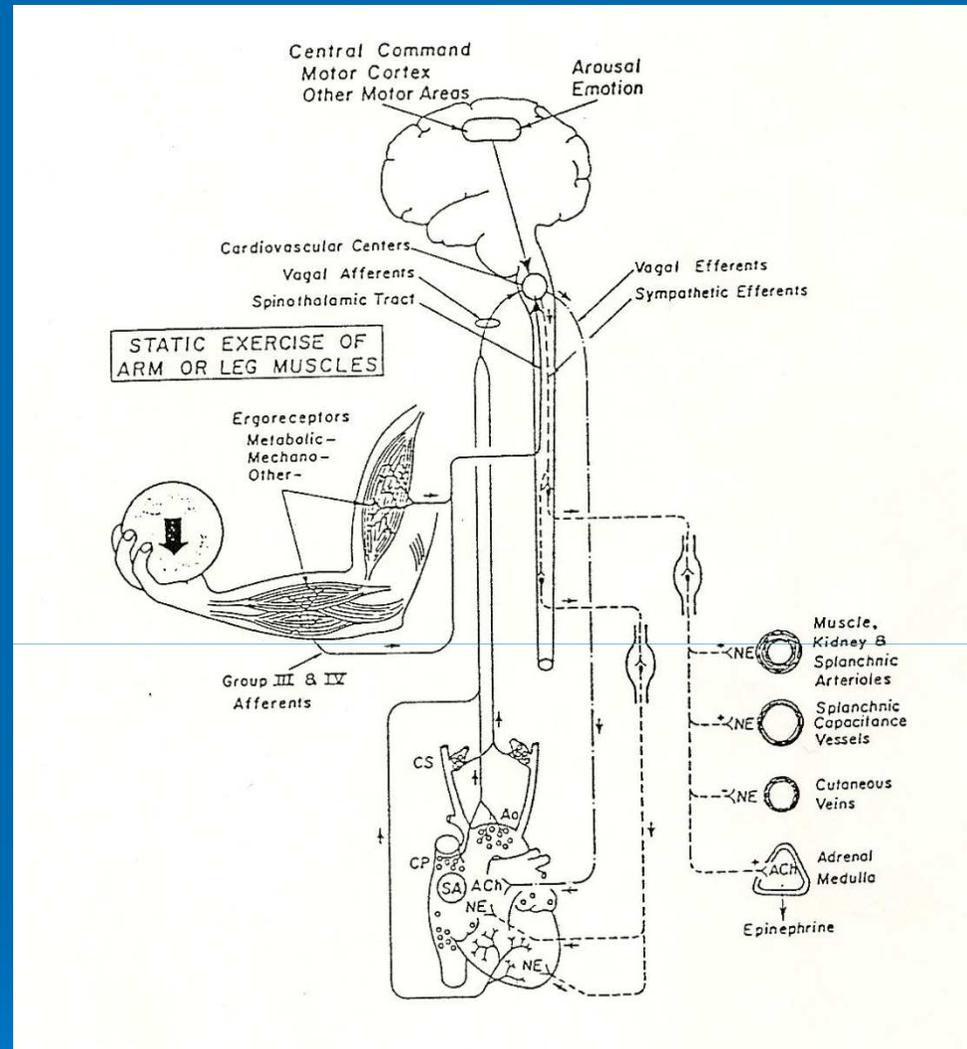


## 4) Fatigue centrale



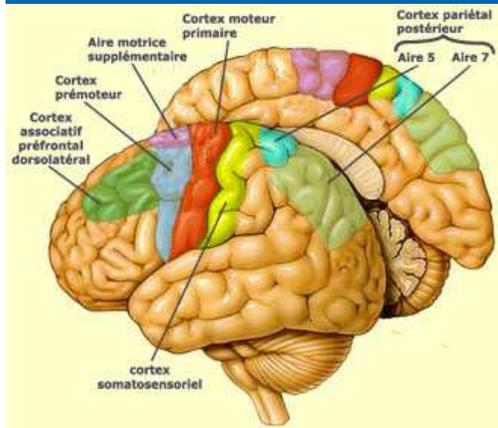
L'électrostimulation d'un muscle fatigué entraîne une augmentation de la force produite et de l'activité EMG (Bigland-Ritchie et al 1978)

TMS ↘ d'activation du cortex moteur avec la fatigue musculaire (Gandevia 2000)



**La décroissance de la force est due à 89% à la Fatigue périphérique et à 12% à la Fatigue centrale (Schillings et al 2003)**

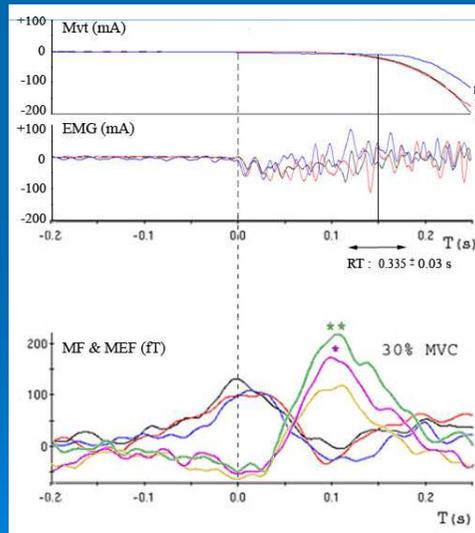
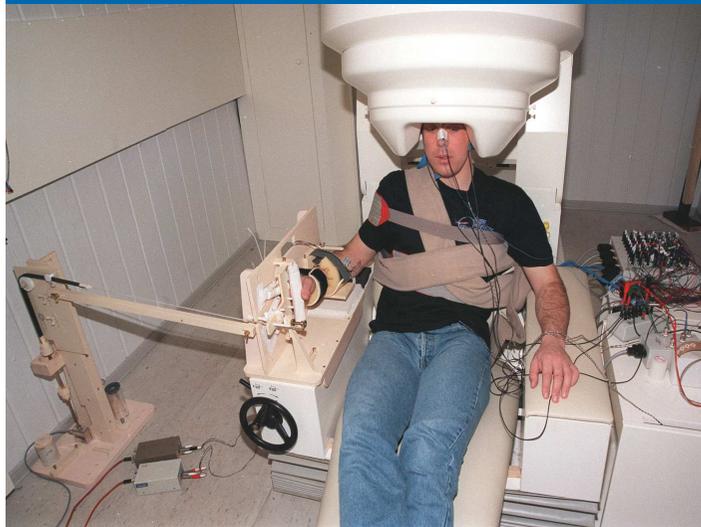
# 4) Impact d'une tâche musculaire fatigante sur le l'activité spatio-temporelle du cortex moteur: CI 30% FMV (Handgrip, Flex Majeur D)



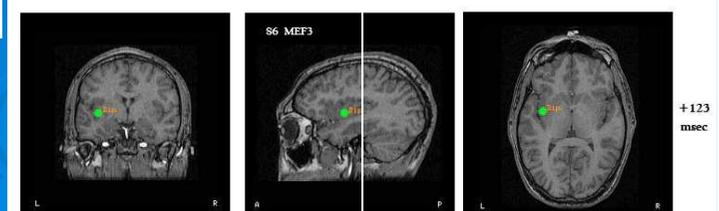
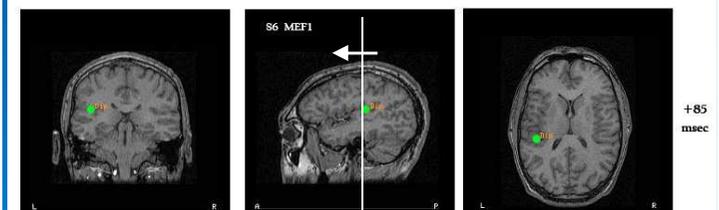
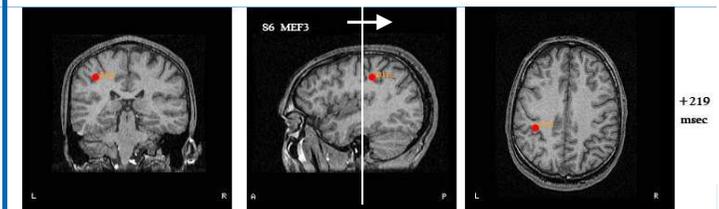
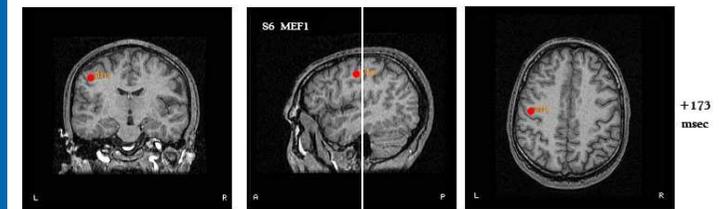
IRMf Aire M1 (A4, A6), et S1 (A3, A1, A5)  
 Cortex préfrontal, Gyrus cingulaire (GC)  
 Aire motrice supplémentaire (SMA)  
 Lobes Cérébelleux

MEG: Activation de l'Insula  
 Précède le cortex sensori-moteur

*(Liu et al 2003, 2005)*



*(Jouanin et al 2009)*



# Conclusion

- La fatigue des muscles de l'épaule a un impact important sur la survenue des pathologies chroniques de l'épaule
- Le vécu douloureux est un facteur fondamental dans l'évolution de la pathologie de l'épaule et l'efficacité de la rééducation



*Monaco 2010*

UN CHAT RETOMBE  
TOUJOURS SUR SES PATTES



Centre  
Epaule 92.

Générale  
de santé  
HÔPITAL PRIVÉ  
D'ANTONY

Merci pour  
votre  
attention



SFRE | Société Française  
de Rééducation de l'Epaule

[www.sfre.org](http://www.sfre.org)

Monaco 2010