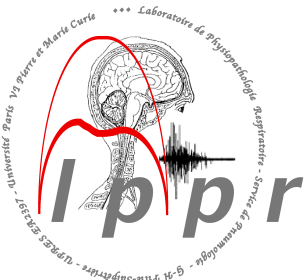


muscles striés respiratoires

Alexandre DEMOULE

*Unité de Réanimation, Service de Pneumologie,
Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière
Paris, France*



plan de l'exposé

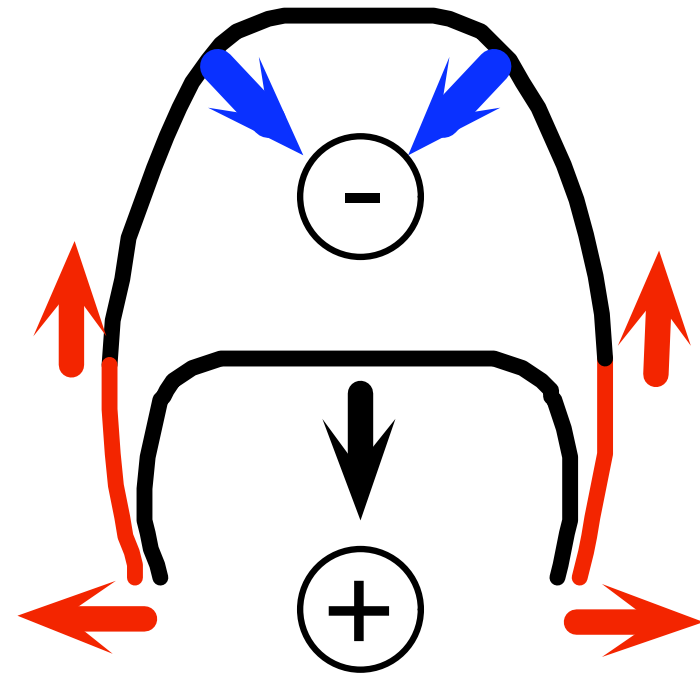
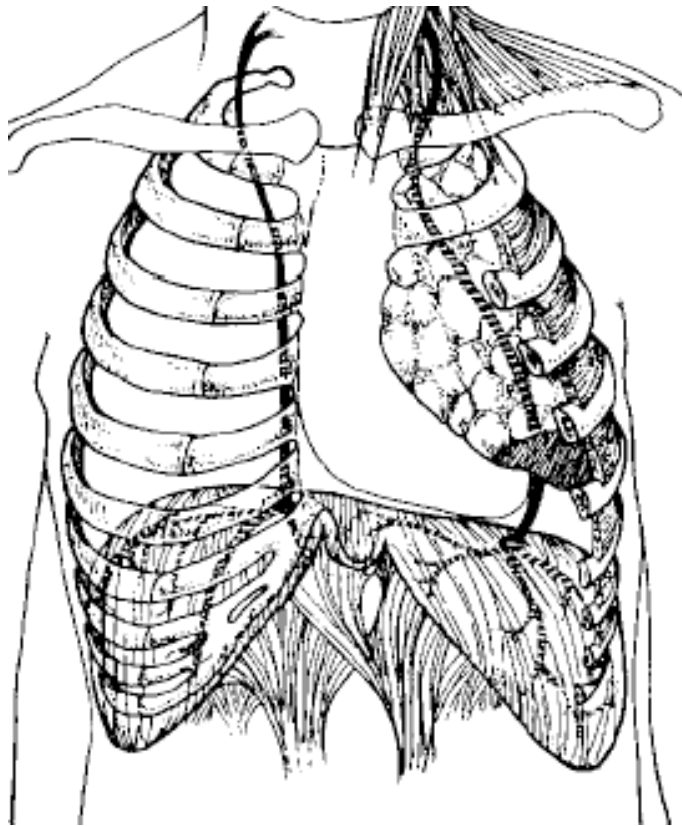
- **préambule : déterminants de la ventilation**
- **I action des muscles respiratoires**
- **II spécificités du diaphragme**
- **III explorations en pratique clinique**

muscles respiratoires - physiologie

3 messages

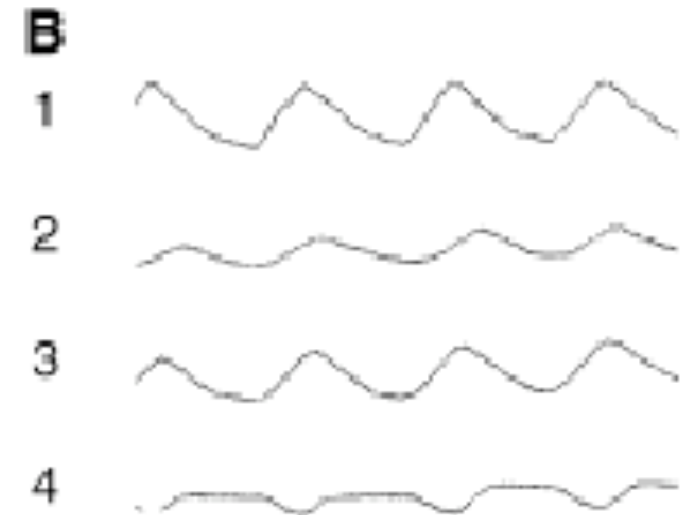
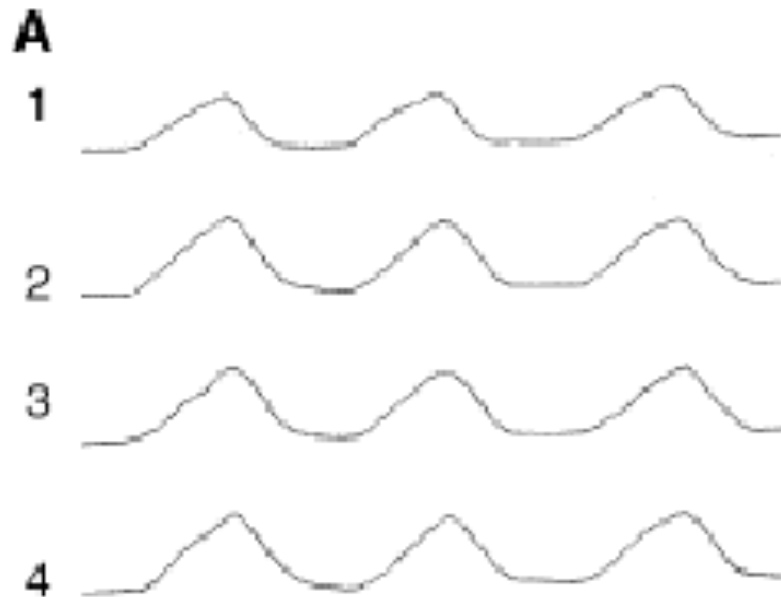
- inspiration → coordination entre muscles
 - muscles inspiratoires : diaphragme, stabilisation cage thoracique, voies aériennes supérieures
 - ± muscles expiratoires
- force dépendante des propriétés mécanique de l'appareil respiratoire
- activité sous contrôle de la commande ventilatoire centrale

diaphragm - 1 - action



diaphragme - 2 - coordination !!!

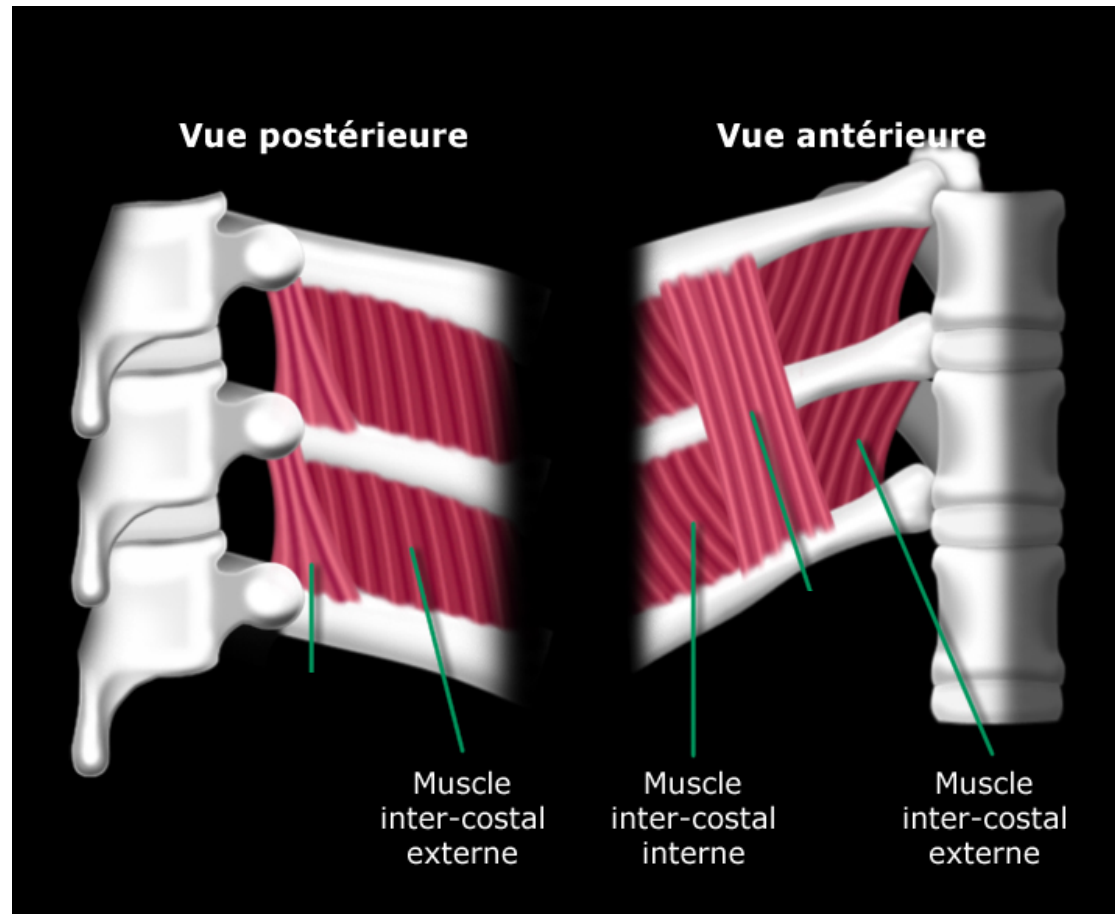
- --- > diaphragme (« principal », mais pas « le seul »)



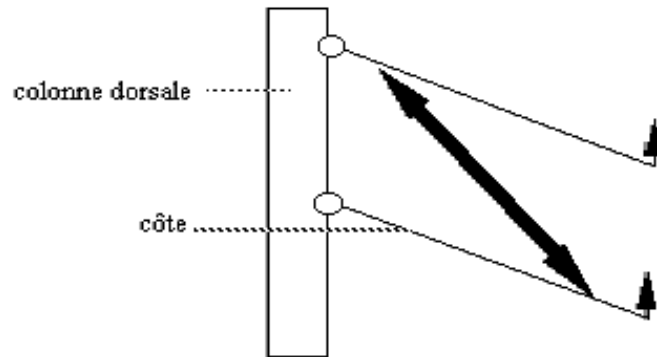
1- AB 2- RC inf, a-p 3- RC inf, transv 4- RC sup, a-p

- --- > **stabilisation de la cage thoracique**
 - 1) muscles intercostaux externes
 - 2) muscles scalènes

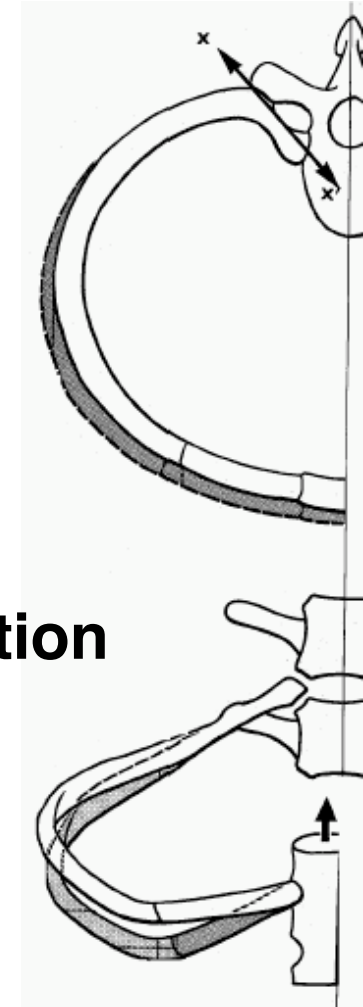
muscles intercostaux externes



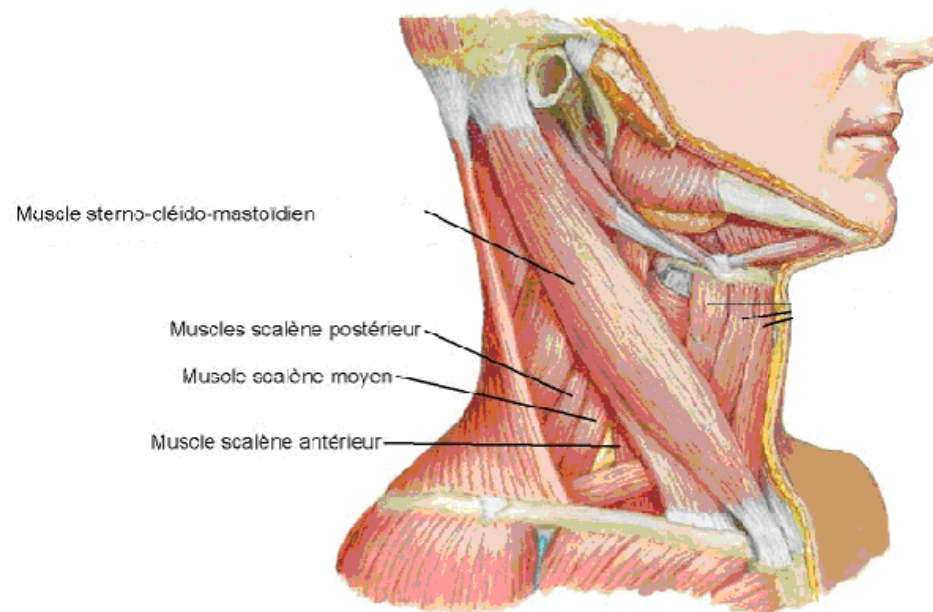
muscles intercostaux externes



- **contraction → élévation des côtes → inspiration**
- **contraction isolée produit -15 cm H2O**

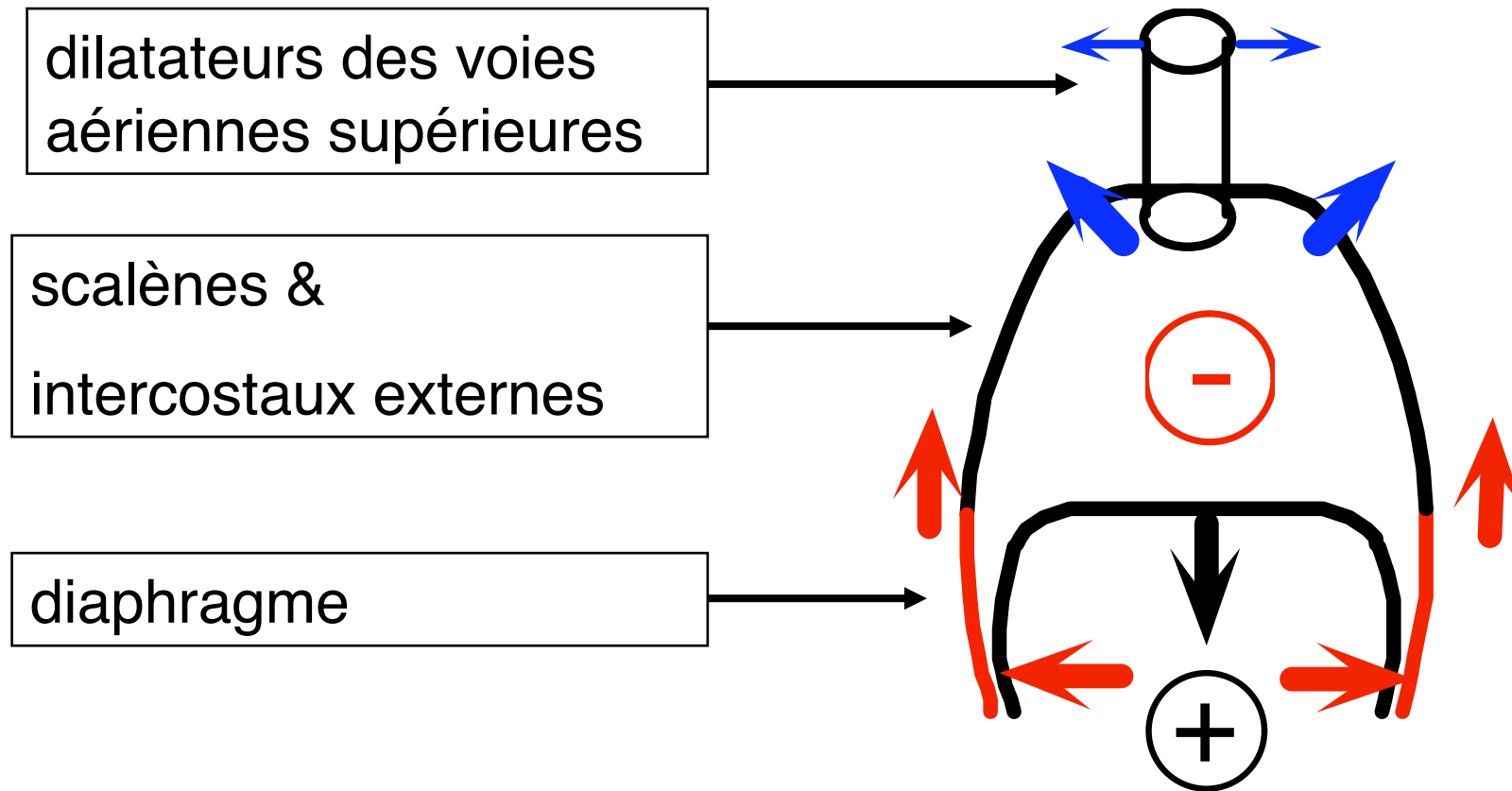


scalènes



- 3 faisceaux : vertèbres cervicales → 2 premières cotes
- s'opposent à la déflation inspiratoire de la partie supérieure du thorax

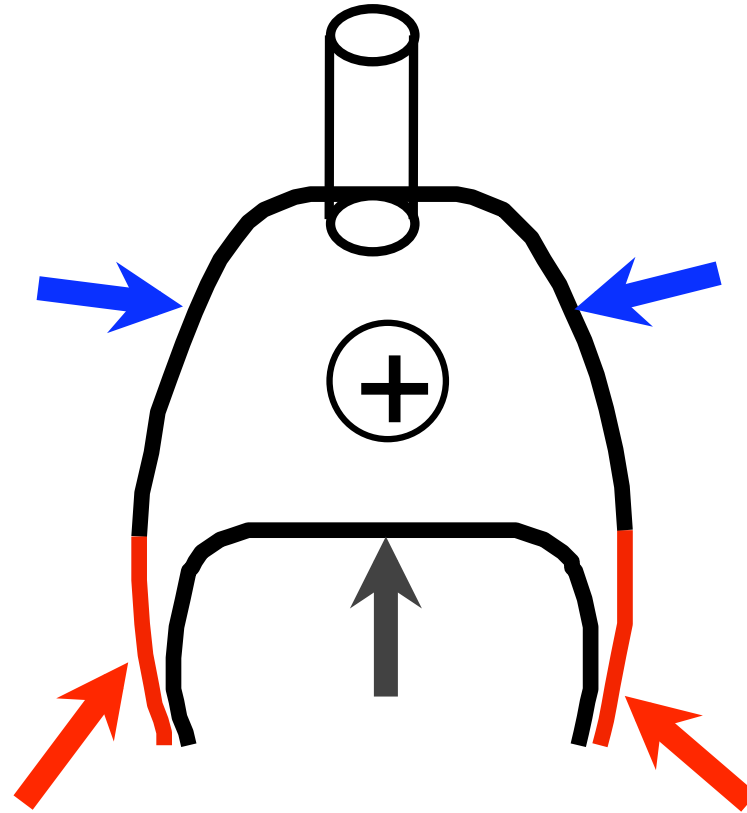
action coordonnée des muscles inspiratoires



d'autres muscles respiratoires...

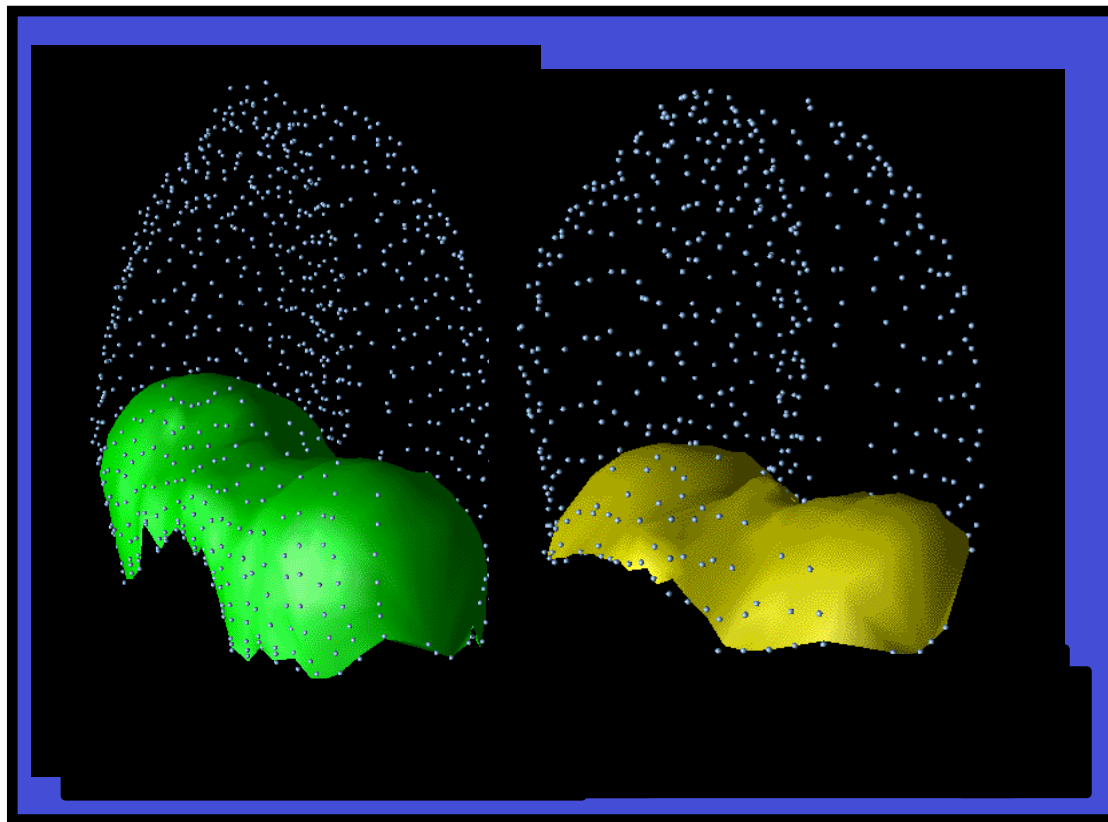
- inspiratoires accessoires
 - sterno-cleido-mastoidiens (détresse respiratoires)
 - ...
- expiratoires
 - expiration normalement passive
 - active dans certaines circonstances : tachypnée
 - intercostaux internes
 - abdominaux

action des muscles expiratoires

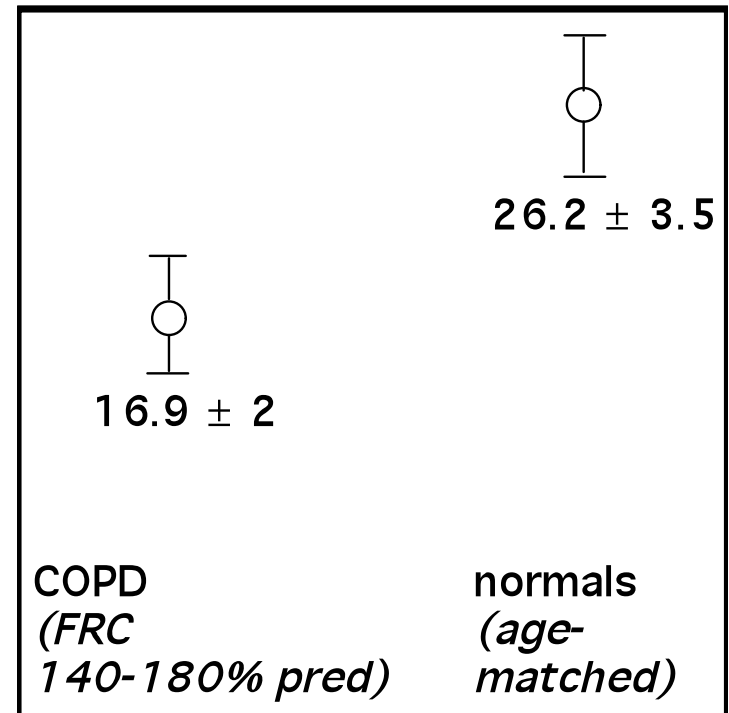


propriétés mécaniques de l'appareil respiratoire

distension thoracique

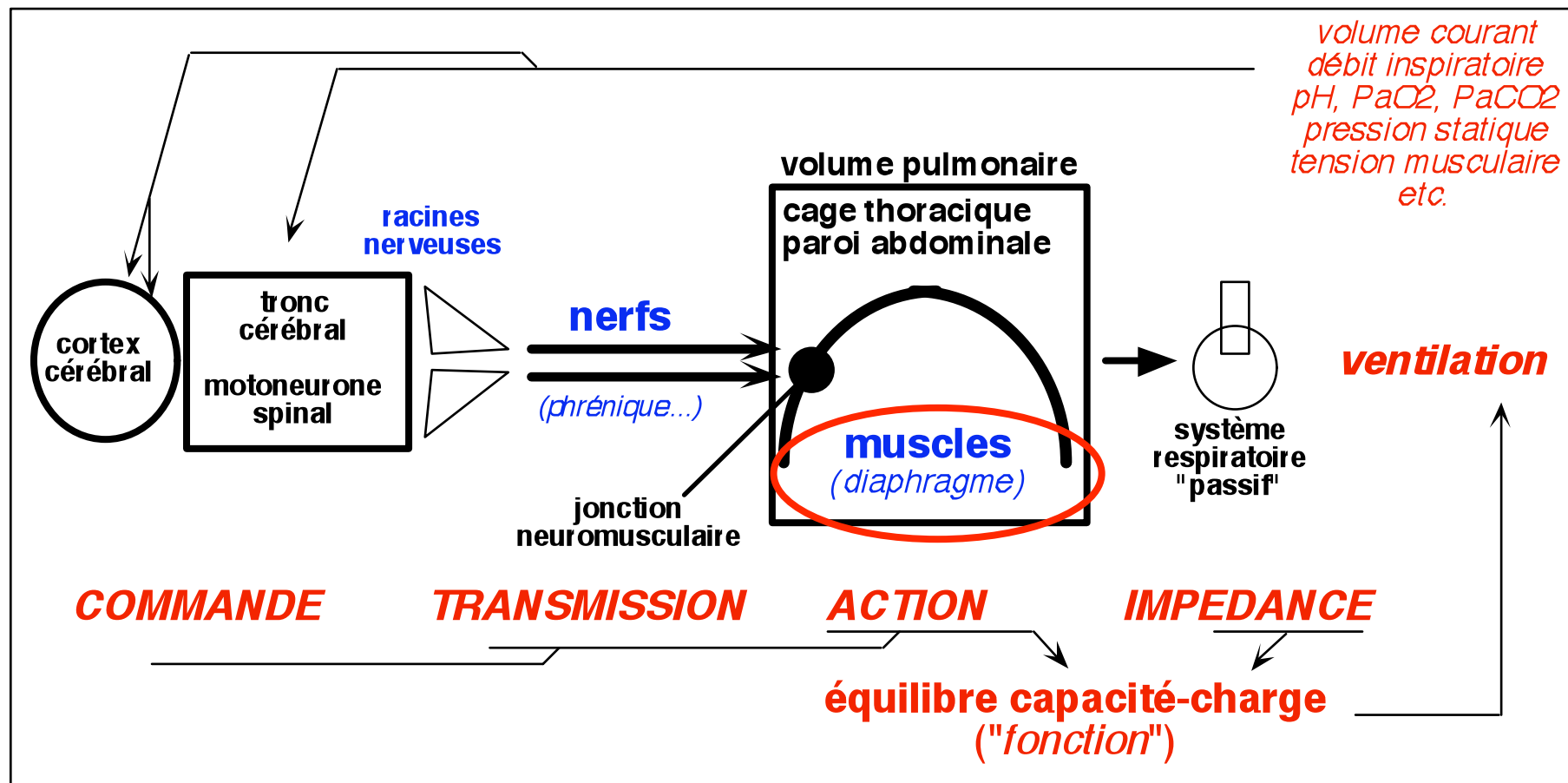


Pdi (cmH₂O)
(phrenic stimulation)



Similowski et coll. New Engl J Med 1990

déterminants de la ventilation



spécificités du diaphragme - 1

constat

- double commande : automatique/volontaire
 - automatique :
 - contraction cyclique continue : la vie...
 - homéostasie
 - volontaire → fonctions multiples :
 - respiratoire
 - extra respiratoires : parole, accouchement...
- anatomique : barrière abdomen/thorax

spécificités du diaphragme - 2

implique des propriétés particulières

- composition en fibres : fonction multiples
 - contraction cyclique permanente
 - autres fonctions
- couplage excitation contraction :
 - contraction cyclique permanente
 - similitude avec myocarde
- métabolisme aérobie prépondérant
 - capacités oxydatives
 - vascularisation
- propriétés immunologique : fonction de barrière

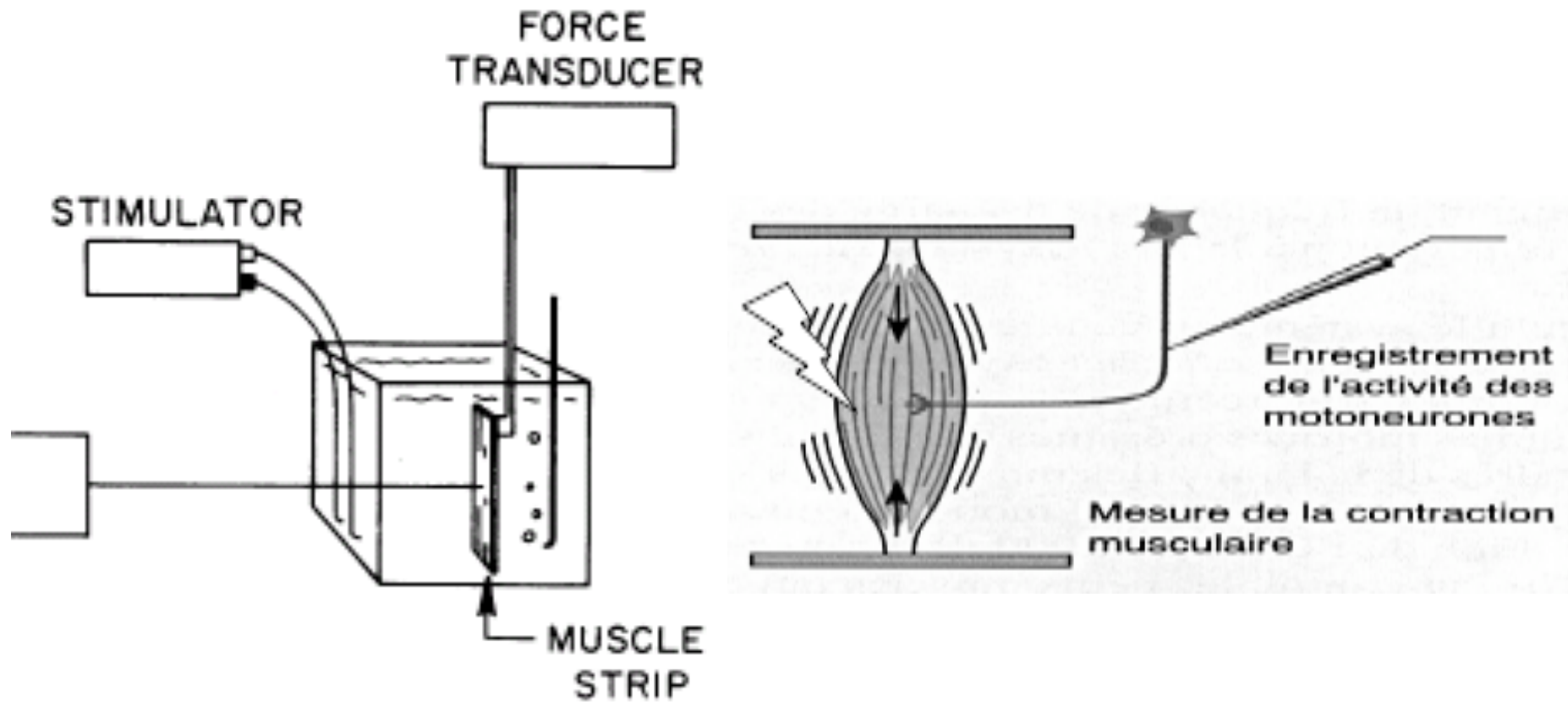
spécificités du diaphragme - 2

implique des propriétés particulières

- composition en fibres : fonction multiples
 - contraction cyclique permanente
 - autres fonctions
- couplage excitation contraction :
 - contraction cyclique permanente
 - similitude avec myocarde
- métabolisme aérobie prépondérant
 - capacités oxydatives
 - vascularisation
- propriétés immunologique : fonction de barrière

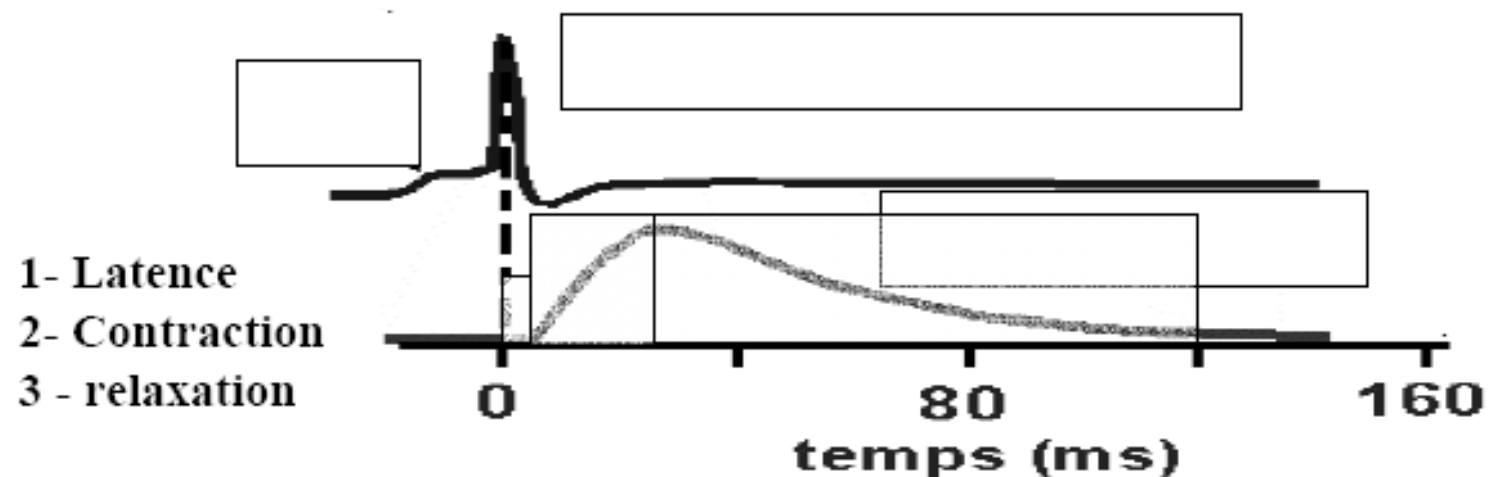
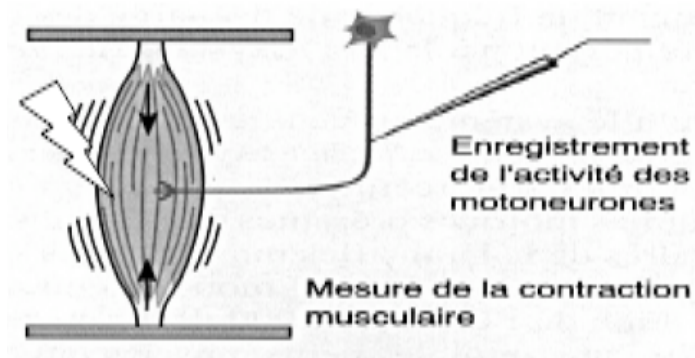
composition en fibres

étude de la contractilité



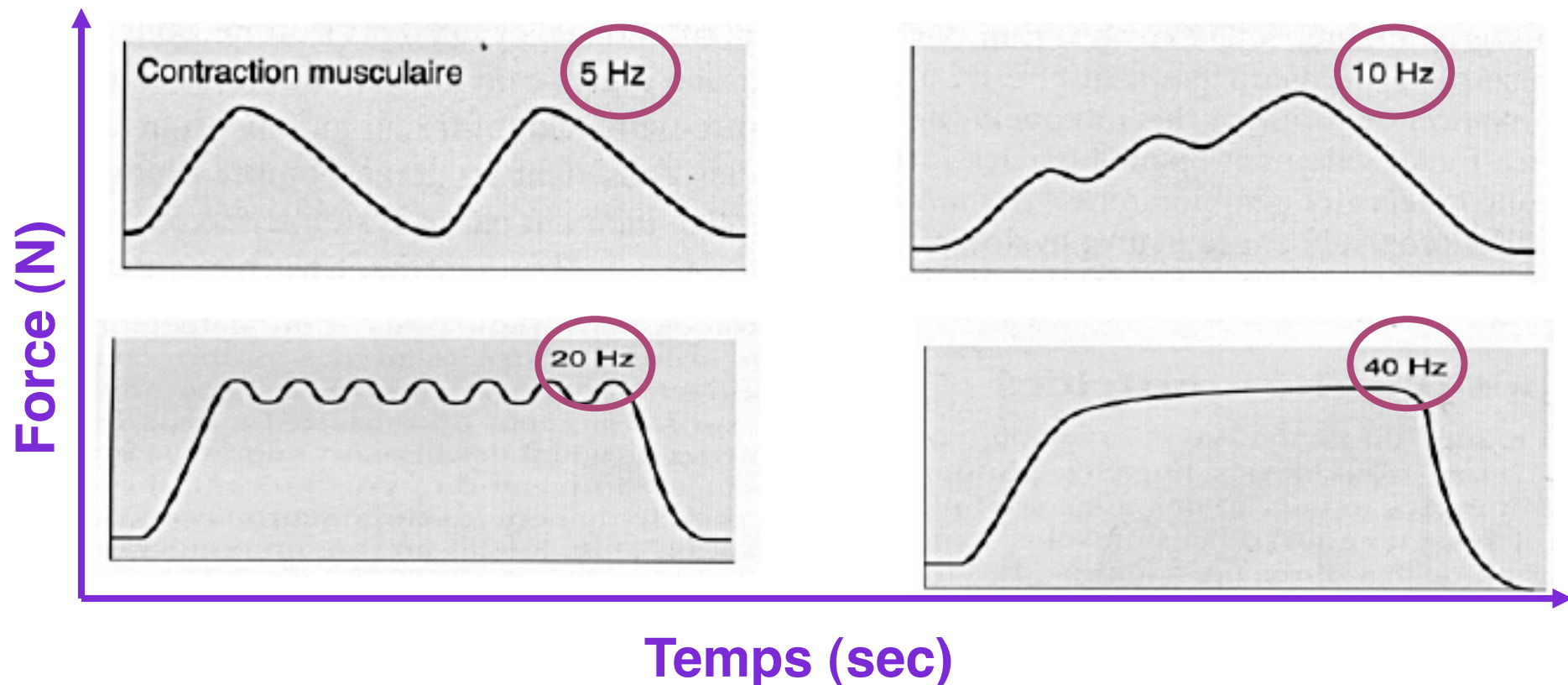
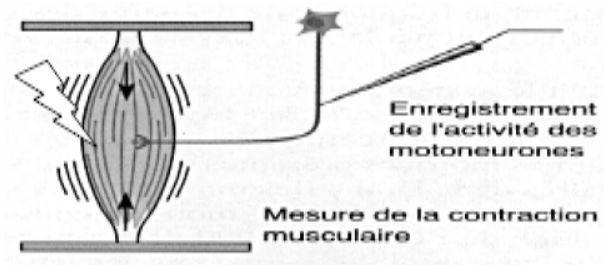
composition en fibres

choc unique

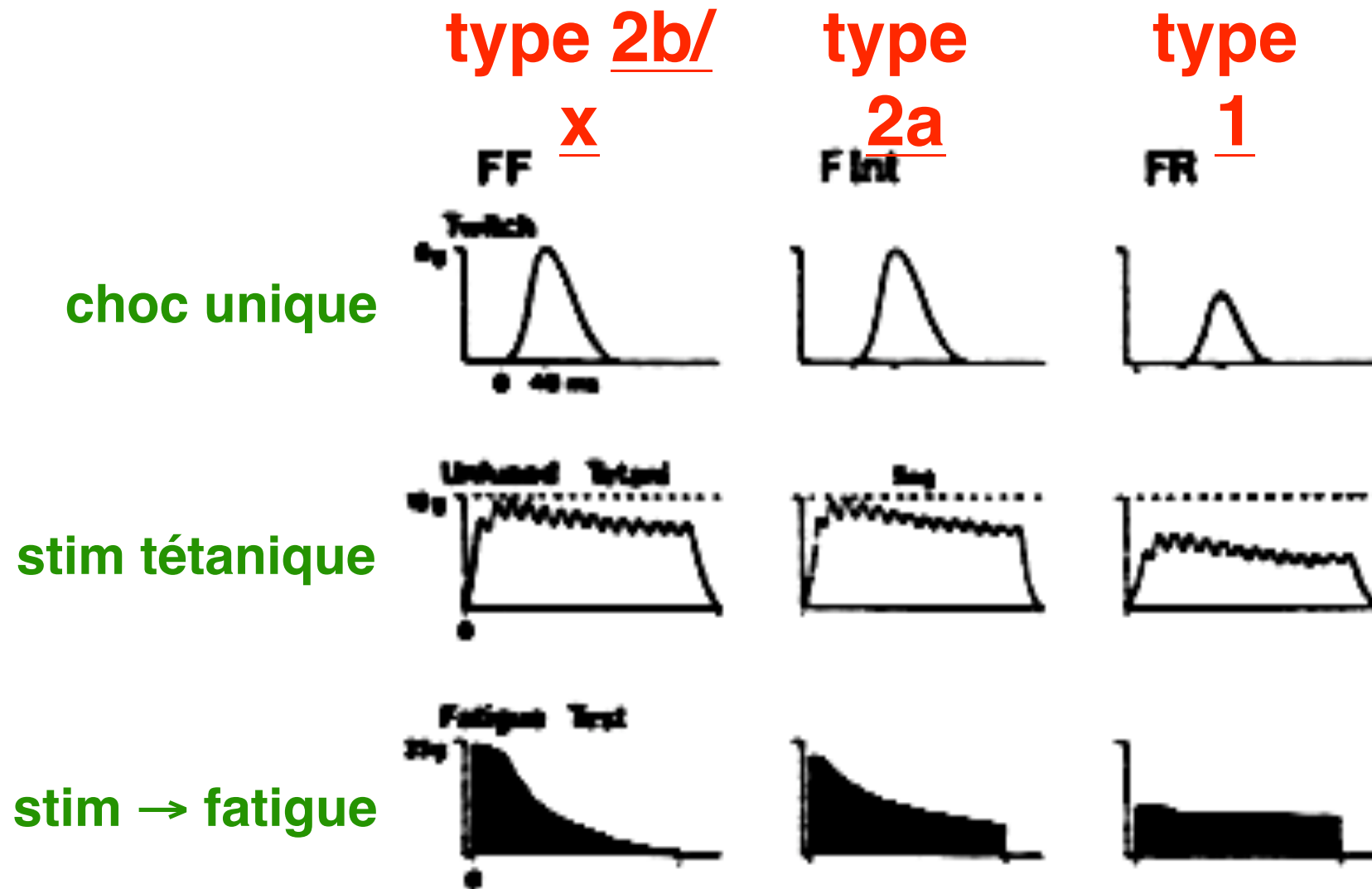


composition en fibres

stimulation « tétanique »



composition en fibres



composition en fibres

	1	2a	2b/x
mitochondries	+++	++	+
enzymes glycolytiques	+	++	+++
n fibre/unité	+	++	+++
vit contraction	+	++	+++
résistance fatigue	+++	++	+
diaphragme	50 %	25 %	25 %

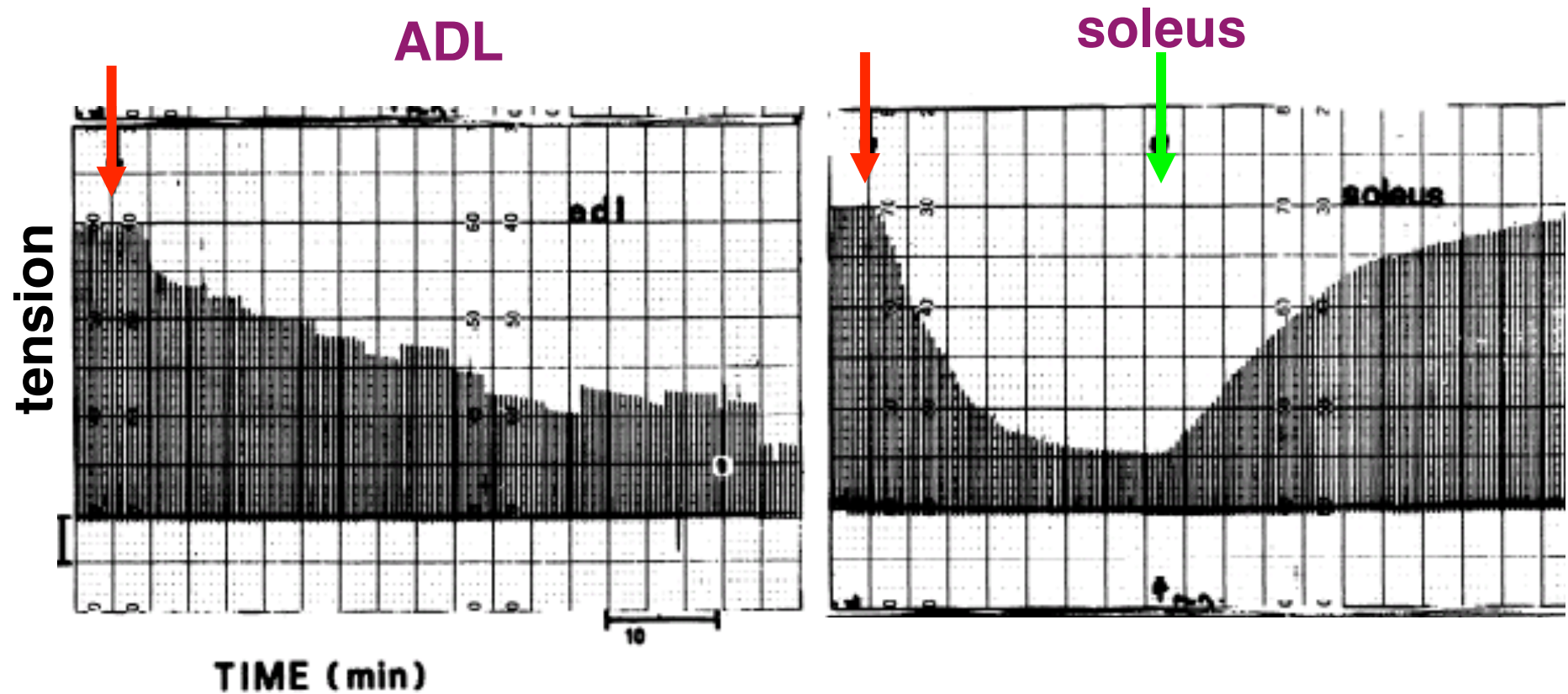
spécificités du diaphragme - 2

implique des propriétés particulières

- composition en fibres : fonction multiples
 - contraction cyclique permanente
 - autres fonctions
- couplage excitation contraction :
 - contraction cyclique permanente
 - similitude avec myocarde
- métabolisme aérobie prépondérant
 - capacités oxydatives
 - vascularisation
- propriétés immunologique : fonction de barrière

couplage excitation-contraction

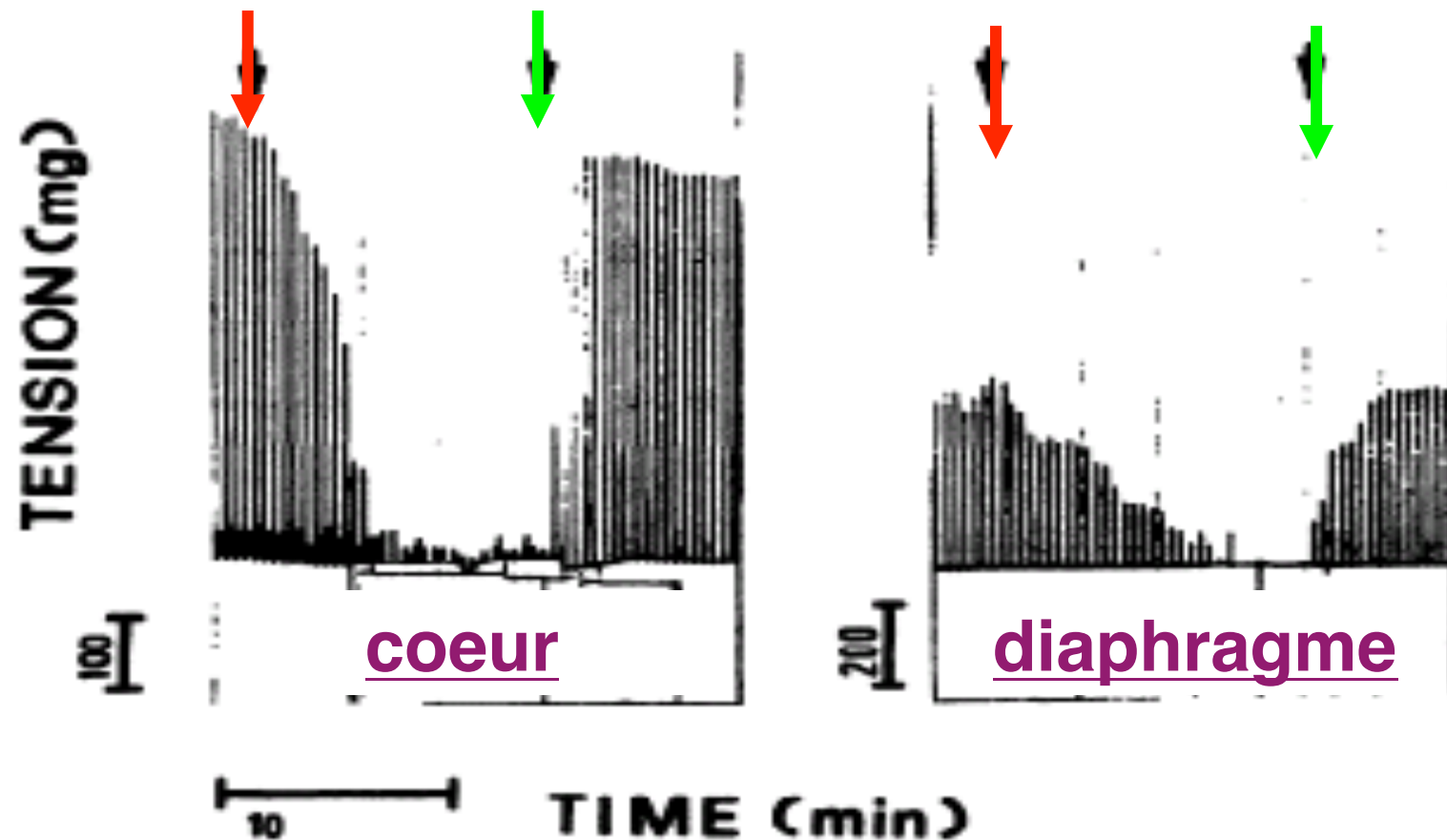
rôle du Ca extracellulaire



Viires, N et al. *J. Appl. Physiol.* 1988

couplage excitation-contraction

rôle du *Ca* extracellulaire



Viïres, N et al. *J. Appl. Physiol.* 1988

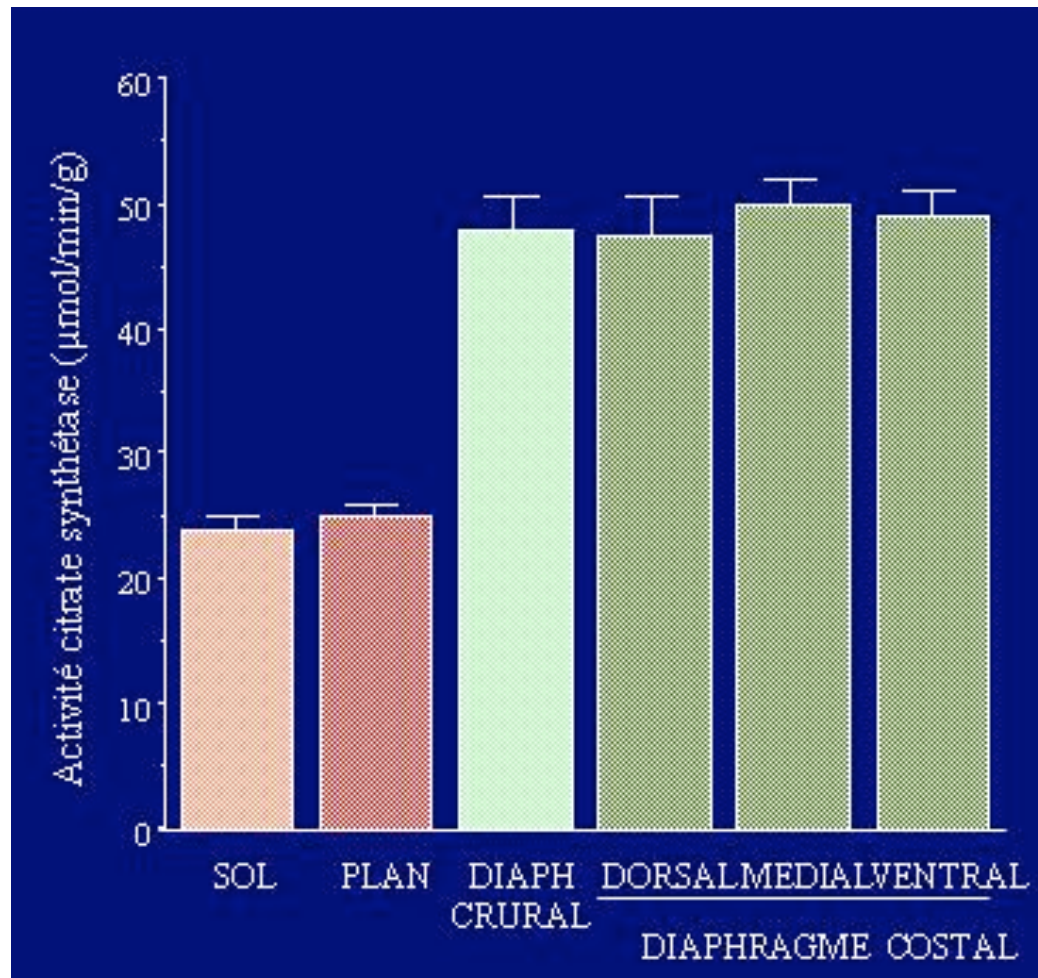
spécificités du diaphragme - 2

implique des propriétés particulières

- composition en fibres : fonction multiples
 - contraction cyclique permanente
 - autres fonctions
- couplage excitation contraction :
 - contraction cyclique permanente
 - similitude avec myocarde
- métabolisme aérobie prépondérant
 - *capacités oxydatives*
 - vascularisation
- propriétés immunologique : fonction de barrière

capacité oxydative

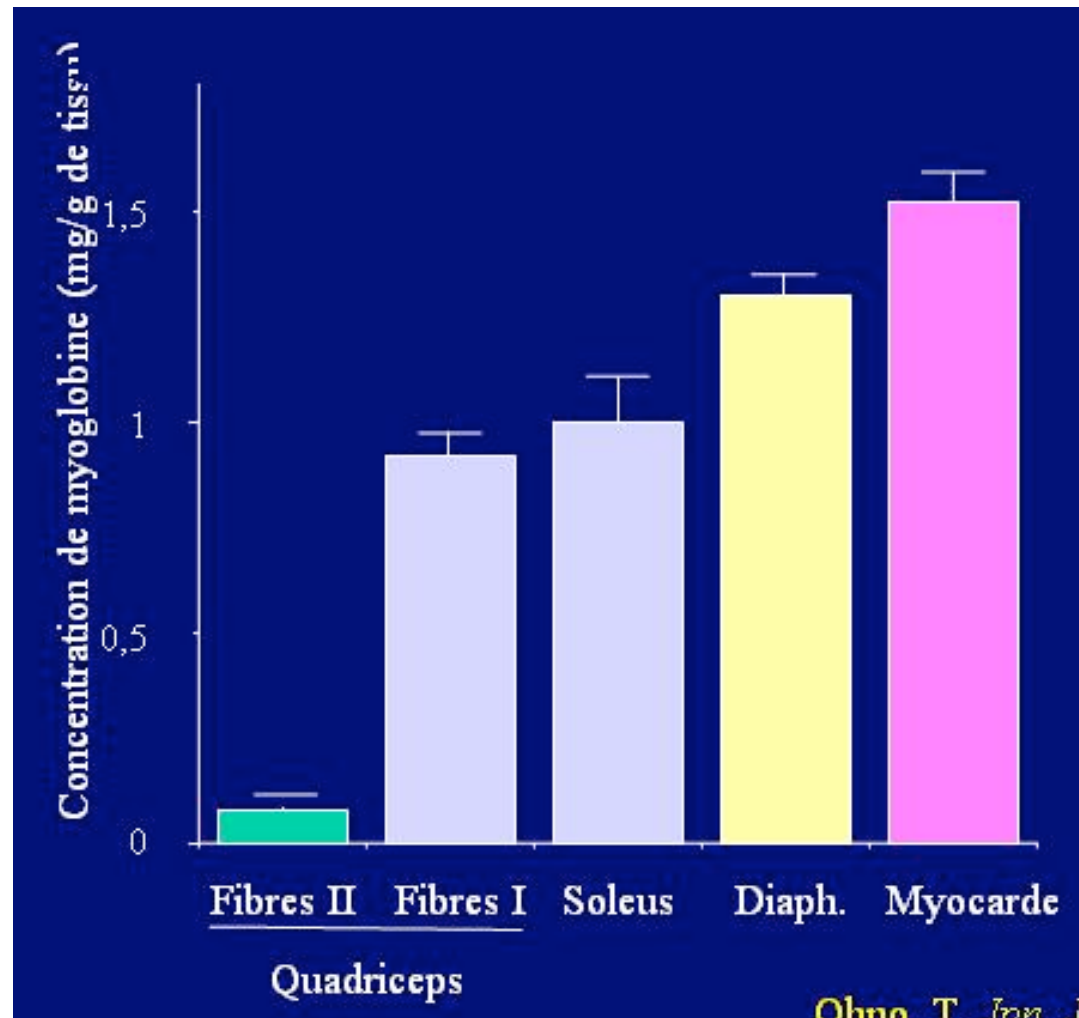
activité de la citrate synthétase



Sexton, WL et al. Respir. Physiol. 1995

capacité oxydative

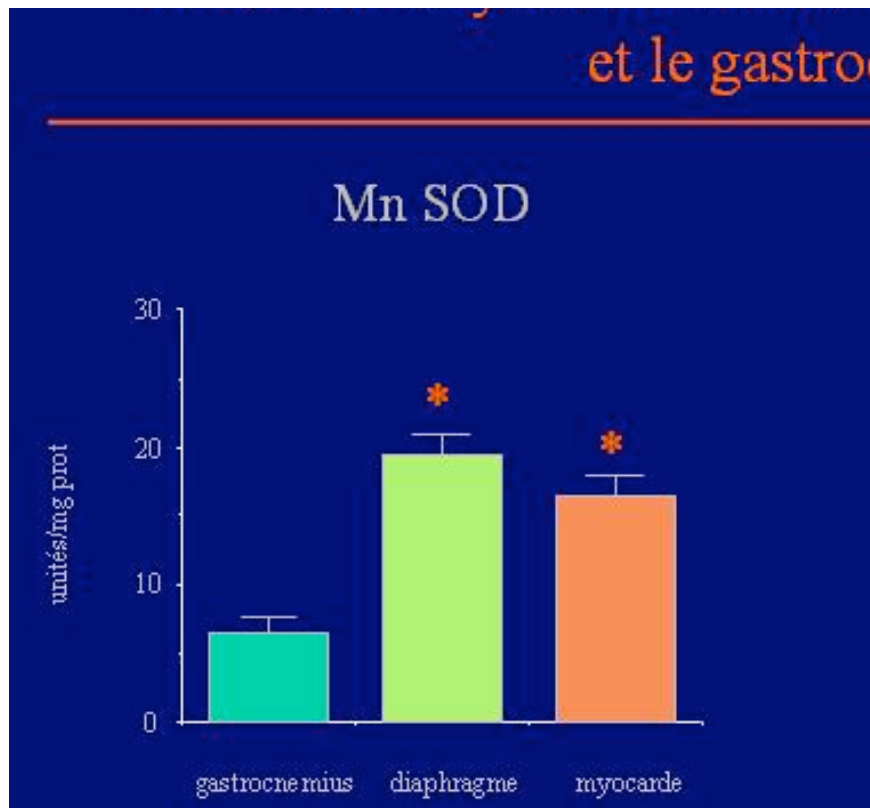
contenu en myoglobine



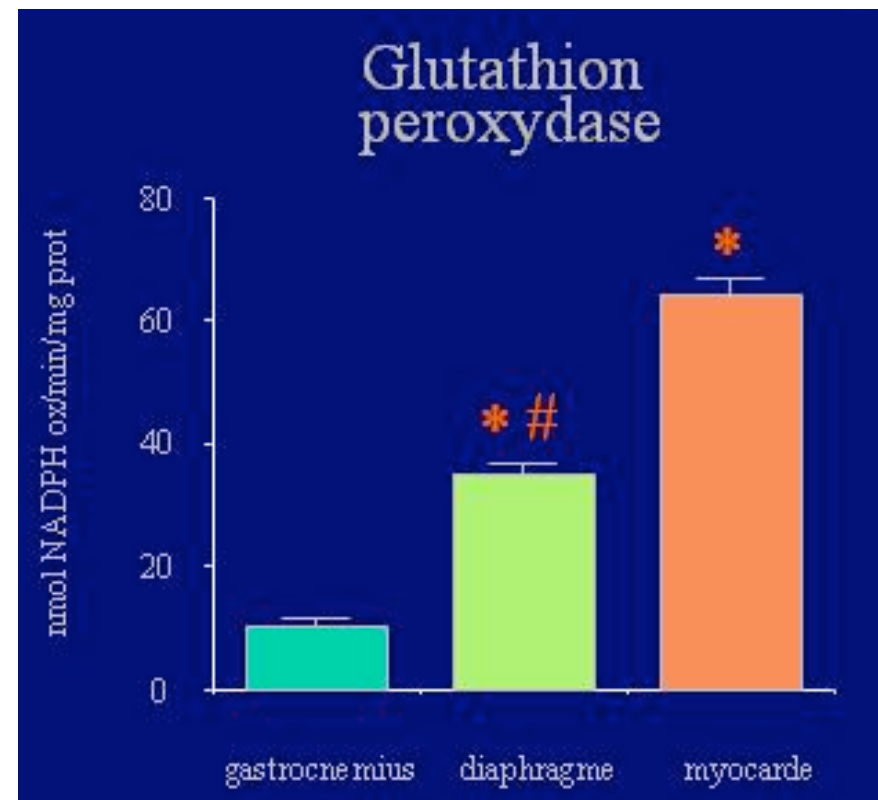
Ohno, T. J. Physiol. 1986

capacité oxydative

voies anti-oxydantes



Vertechy, M. Exp. Gerontol. 1989



Ragusa, RJ. J. Neurol. Sci. 1996

spécificités du diaphragme - 2

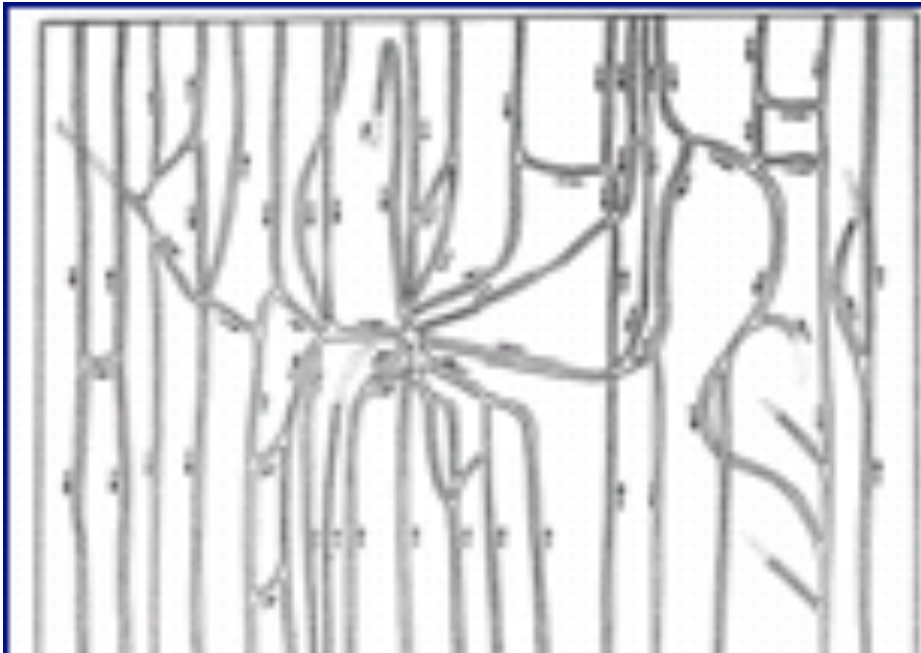
implique des propriétés particulières

- composition en fibres : fonction multiples
 - contraction cyclique permanente
 - autres fonctions
- couplage excitation contraction :
 - contraction cyclique permanente
 - similitude avec myocarde
- métabolisme aérobie prépondérant
 - capacités oxydatives
 - *vascularisation*
- propriétés immunologique : fonction de barrière

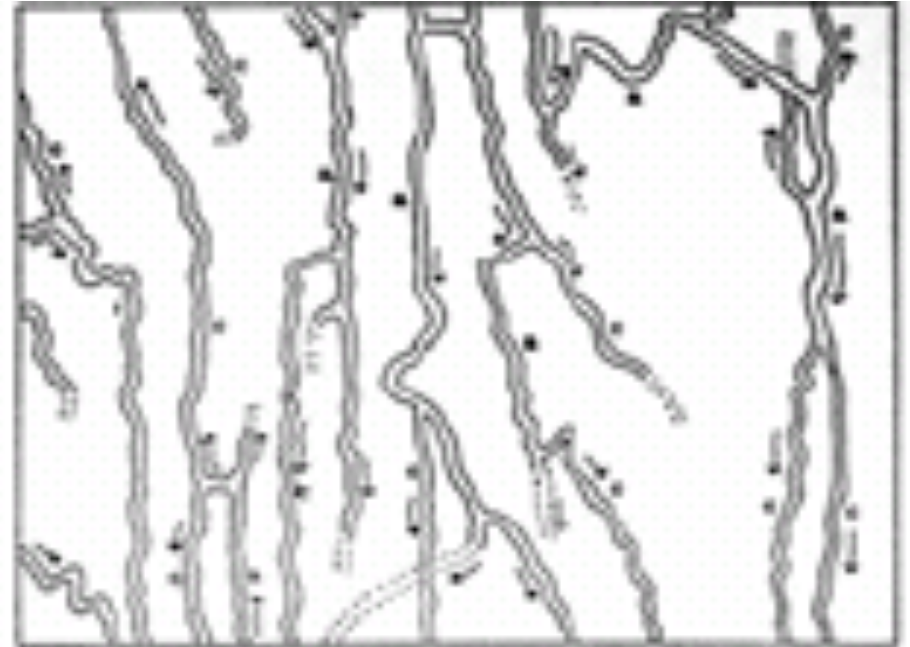
densité capillaire

capillaroscopie

diaphragme



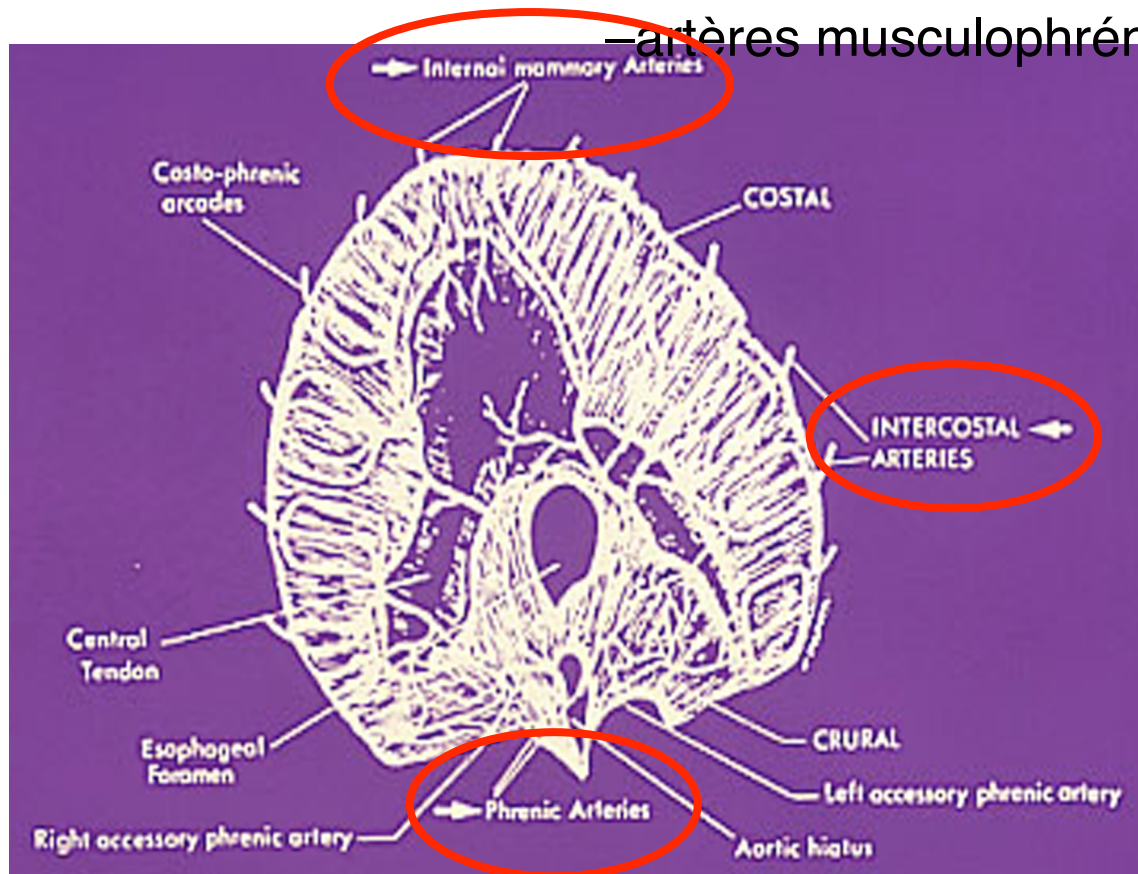
soleus



anastomoses vasculaires

mammaire interne

- artères péricadiophréniques
- artères musculophréniques



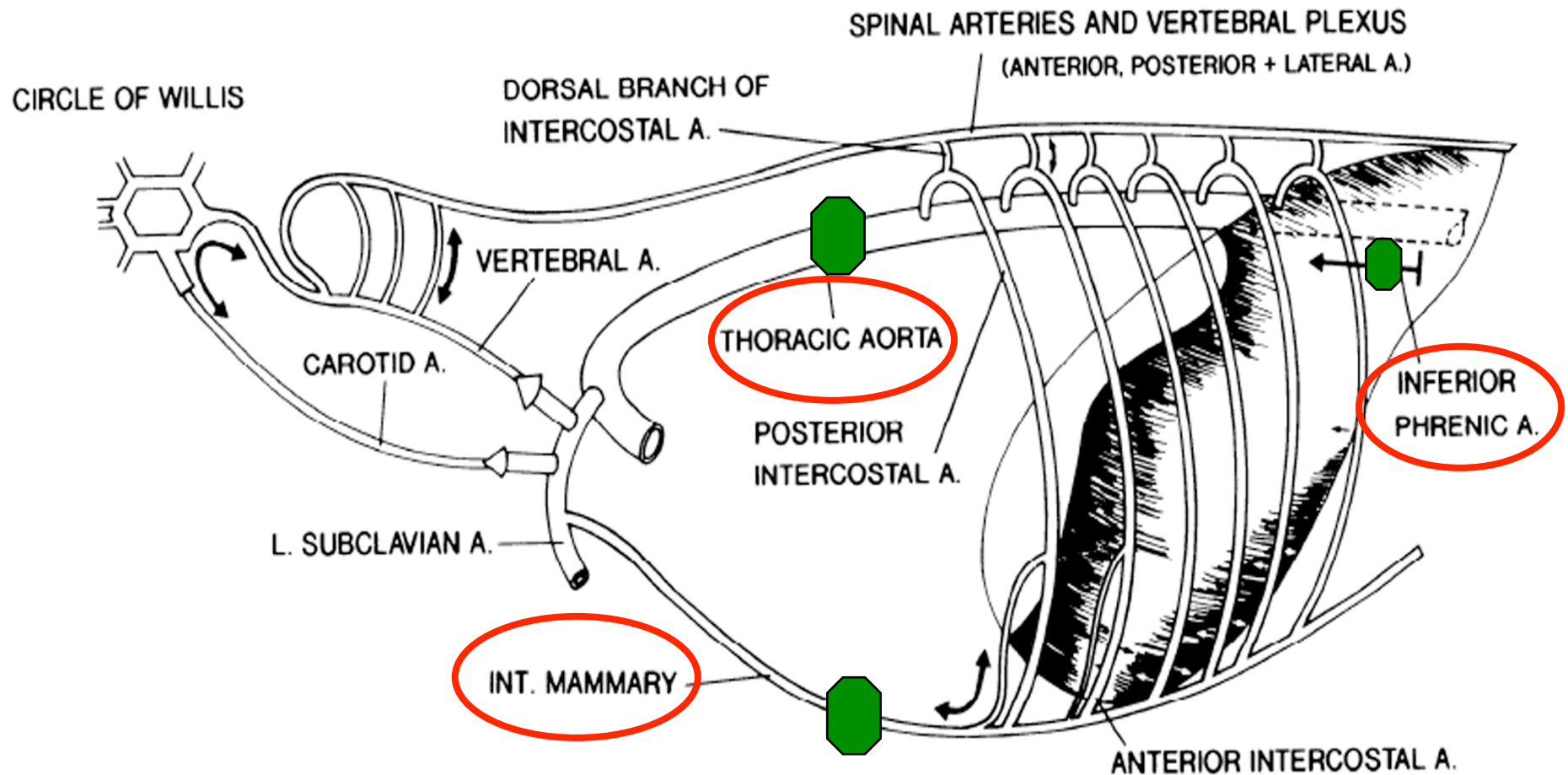
artères intercostales

artères phréniques

- sup : aorte thoracique
- inf : aorte abdominale

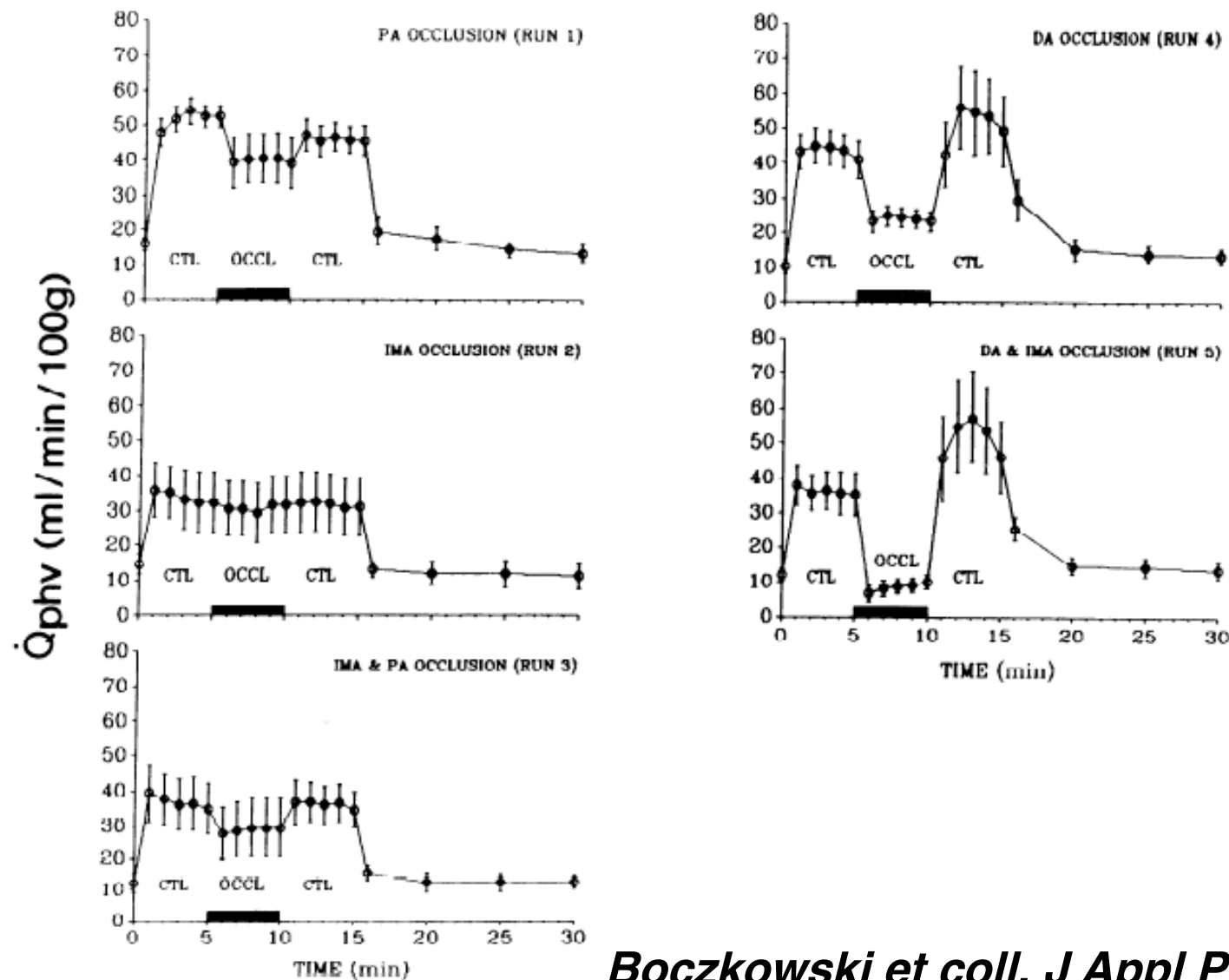
anastomoses vasculaires

site des occlusions



anastomoses vasculaires

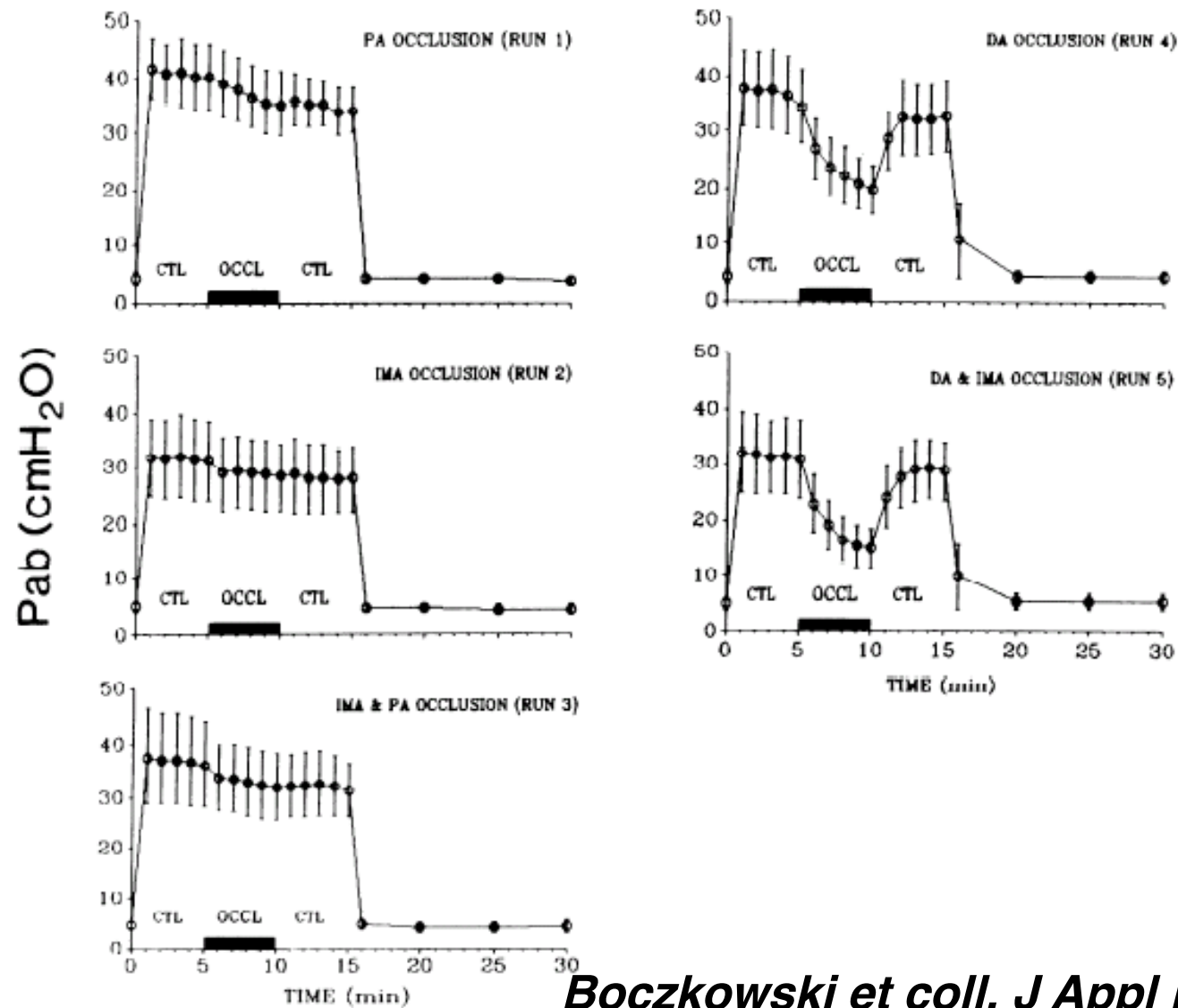
débit sanguin diaphragmatique



Boczowski et coll. J Appl Physiol 1992

anastomoses vasculaires

pression abdominale



Boczowski et coll. J Appl Physiol 1992

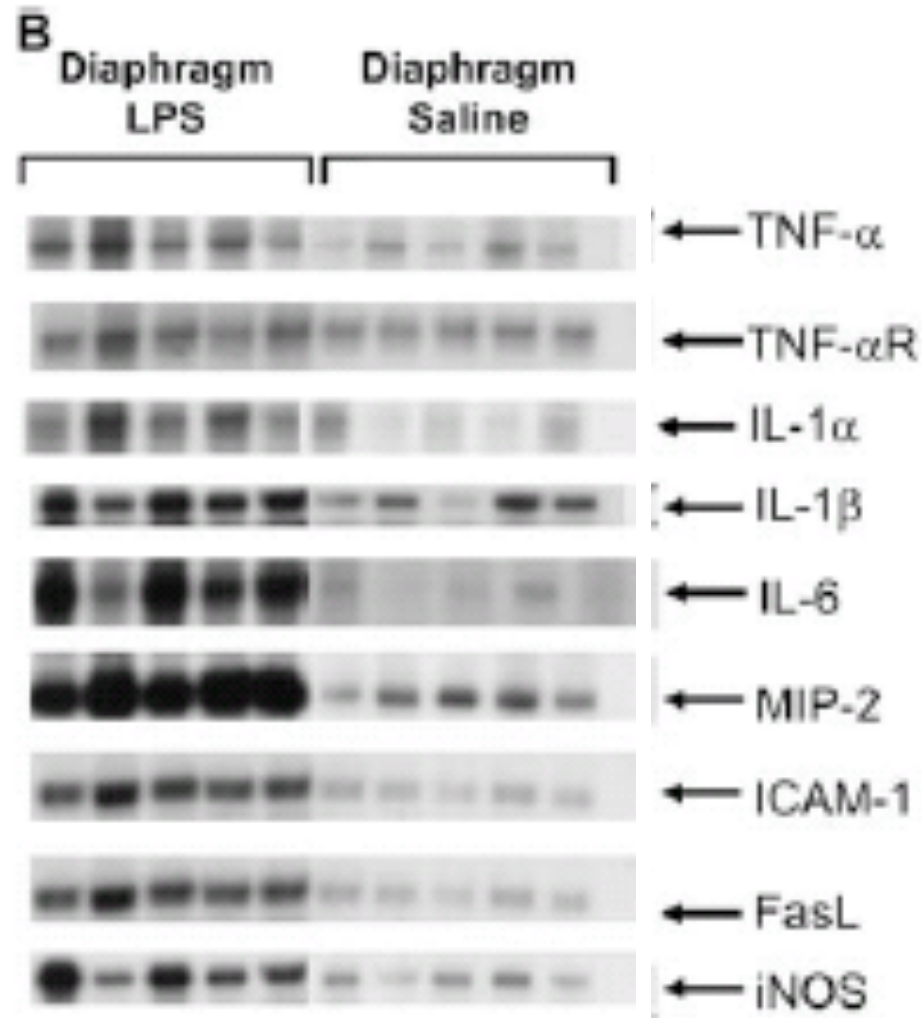
spécificités du diaphragme - 2

implique des propriétés particulières

- composition en fibres : fonction multiples
 - contraction cyclique permanente
 - autres fonctions
- couplage excitation contraction :
 - contraction cyclique permanente
 - similitude avec myocarde
- métabolisme aérobie prépondérant
 - capacités oxydatives
 - vascularisation
- propriétés immunologique : fonction de barrière

propriétés immunologiques

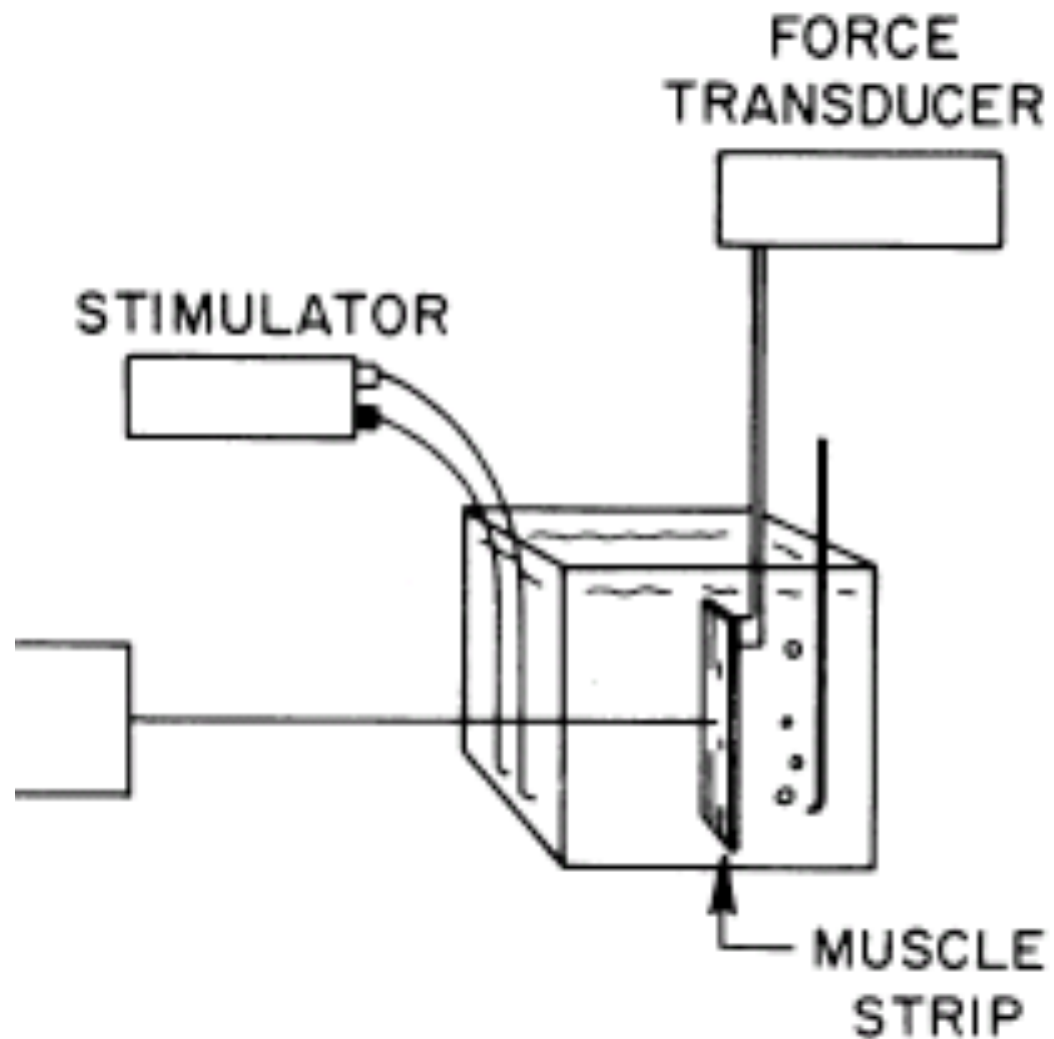
expression de gène pro-inflammatoires



Demoule et coll. Am J Respir Crit Care Med 2006

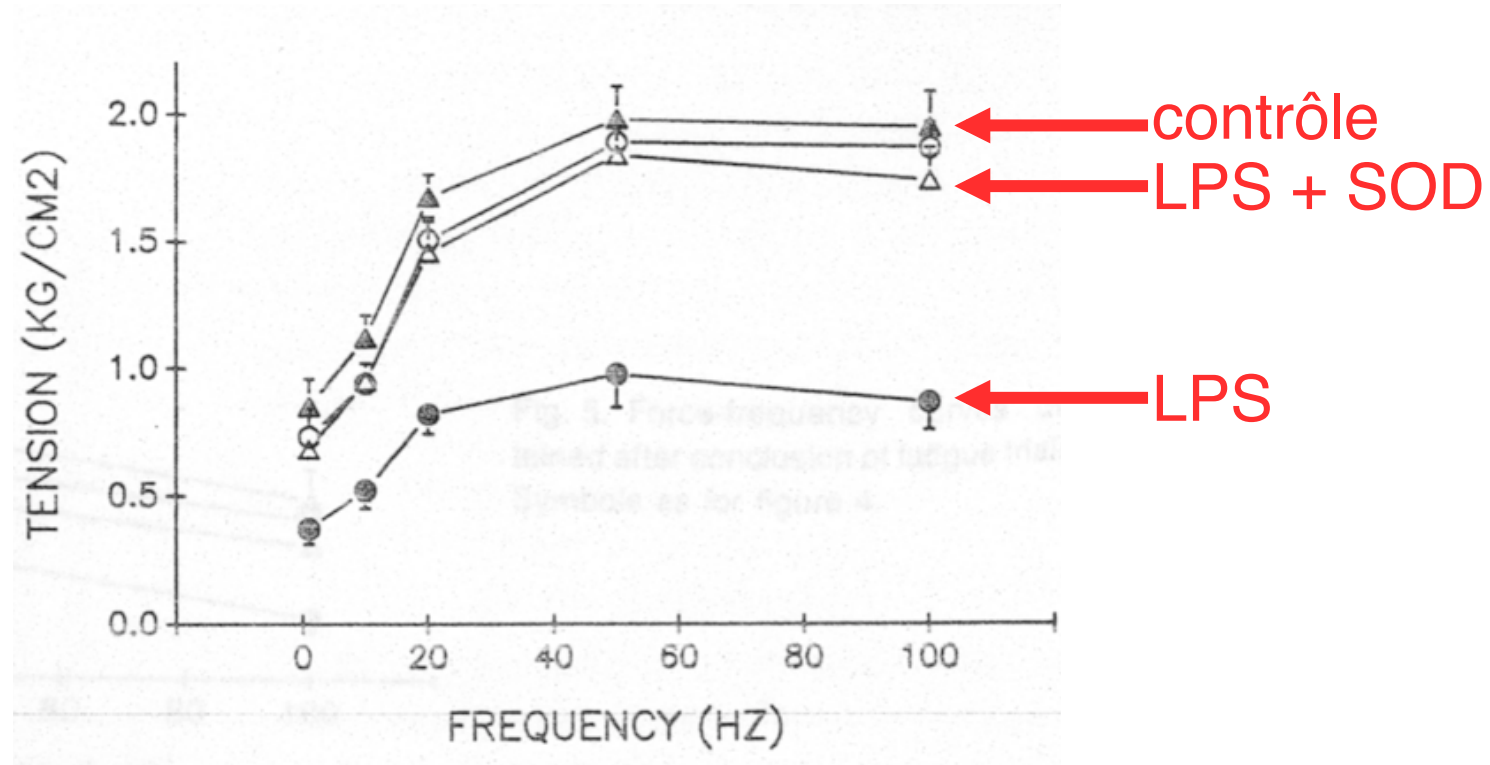
contractilité du diaphragme - animal

étude in vitro



contractilité du diaphragme - animal

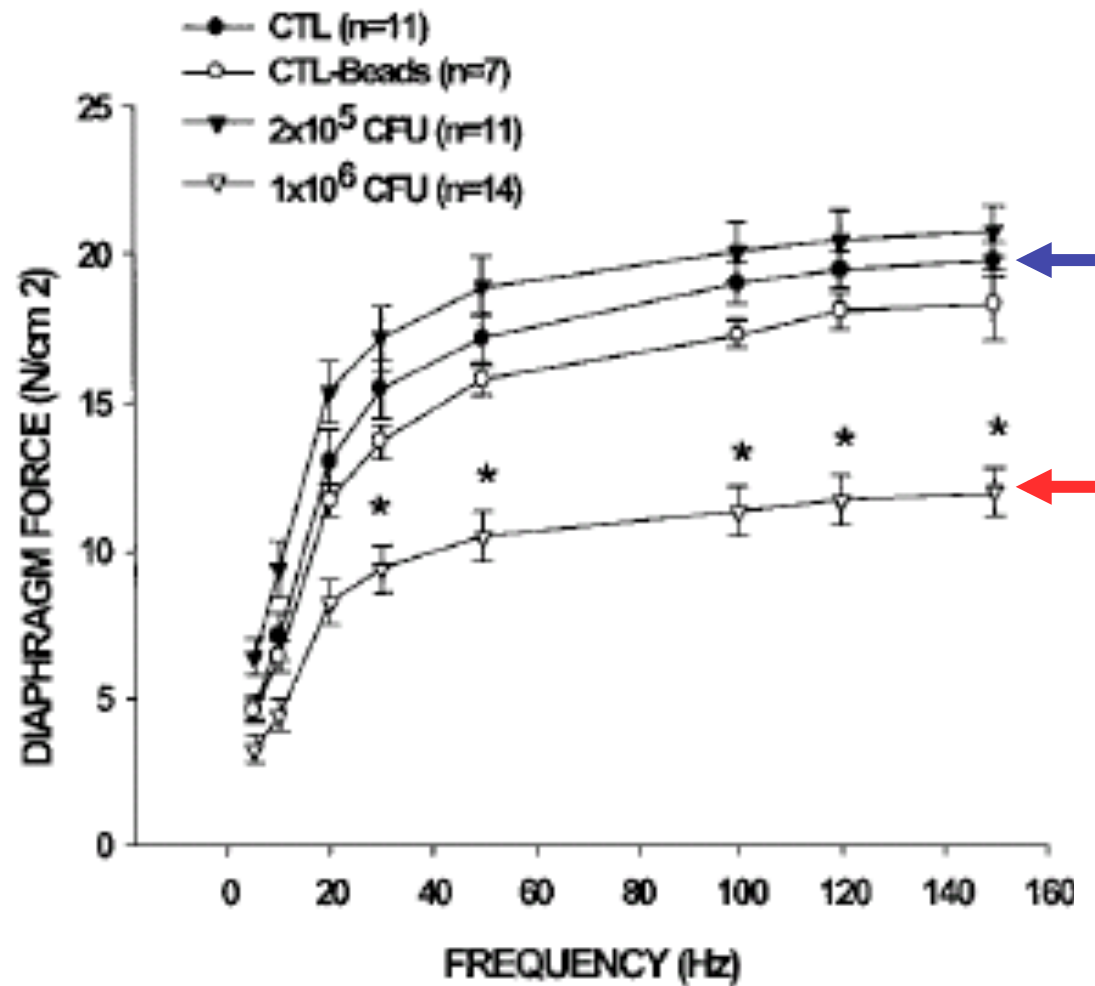
modèle murin - LPS



Sindoh et coll. Am Rev Respir Dis 1992

contractilité du diaphragme - animal

modèle murin - pneumonie



Divangahi et coll. Am J Respir Crit Care Med 2004

chez l'humain...

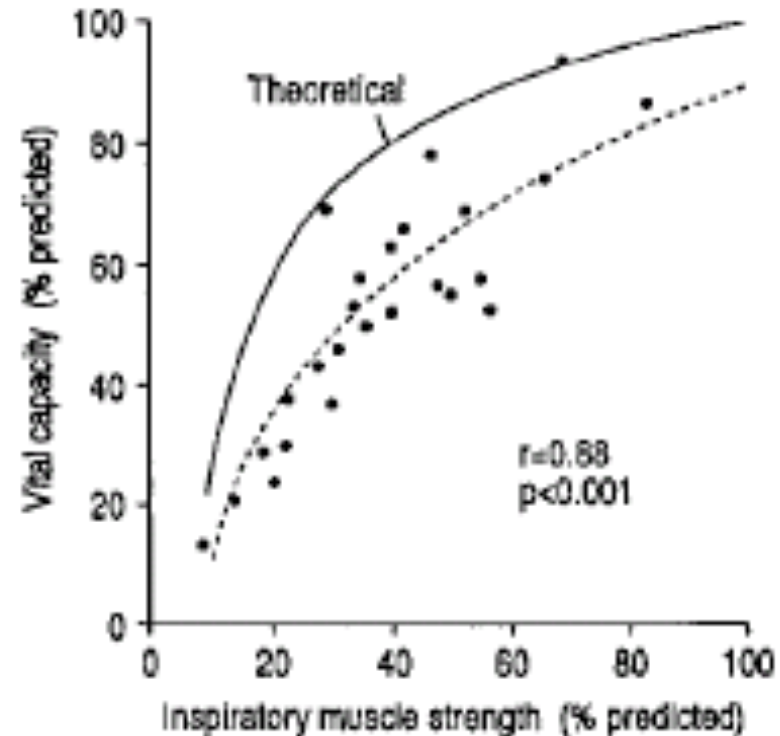
- volumes
- débits
- gaz du sang
- exploration du sommeil
- mesures de pression
- électromyographie

exploration fonctionnelle des muscles respiratoires

- **volumes**
- débits
- gaz du sang
- exploration du sommeil
- mesures de pression
- électromyographie

volumes statiques - 1

- CV = sensible
- ↓ CV car ↓ force muscles
 - inspiratoires
 - expiratoire
- CV assis → couché
 - normalement : ↓ 5-10 %
 - faiblesse diaphragme : sévère si ↓ > 30 %



volumes statiques - 2

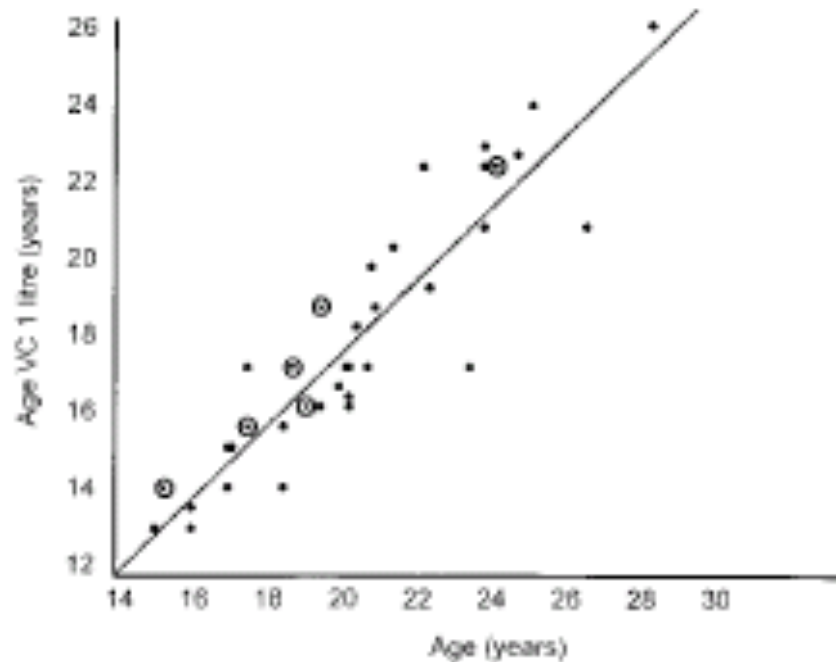


- avantages
 - standardisation : norme connue, reproductible
 - simplicité : réalisation facile, disponible
 - pronostique : Duchenne, SLA
 - thérapeutique : assistance ventilatoire
- inconvénients
 - spécificité faible
 - moins sensible que les mesures de pressions

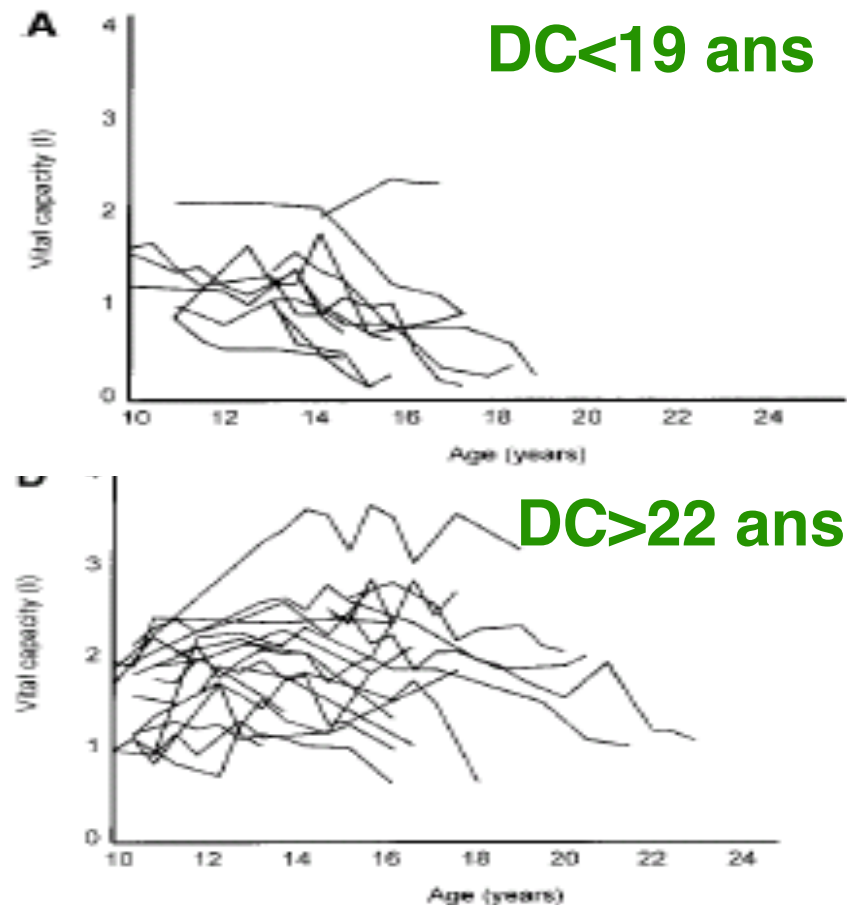
volumes statiques - 3

Duchenne : CV et pronostic

age CV 1L vs. age décès



déclin CV vs. age décès



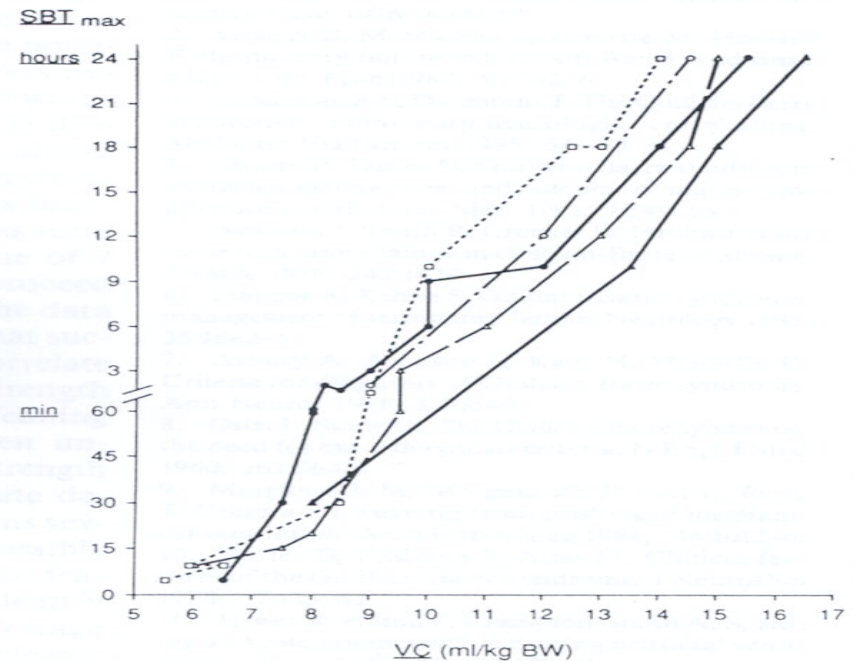
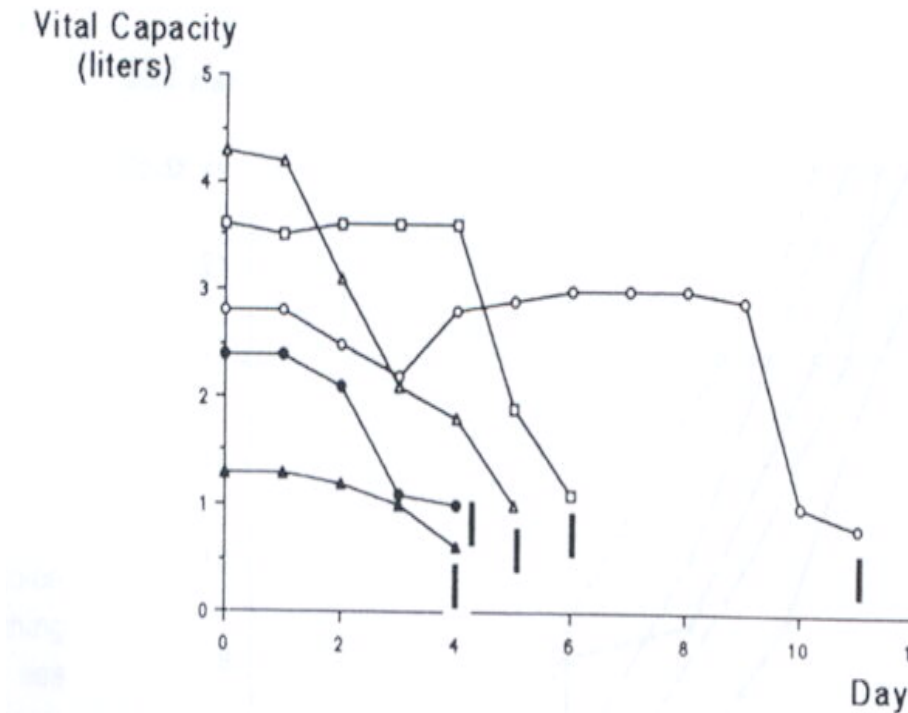
Phillips et coll. am J Respir Crit care Med 2001

volumes statiques - 4

syndrome de Guillain et Barré

capacité vitale/j

VS/capacité vitale



CV dans les 48h00 précédant l'intubation

- $< 15 \text{ ml/kg}$
- chute $> 50 \%$

Chevrolet et coll. Am rev Resp Dis 1991

exploration fonctionnelle des muscles respiratoires

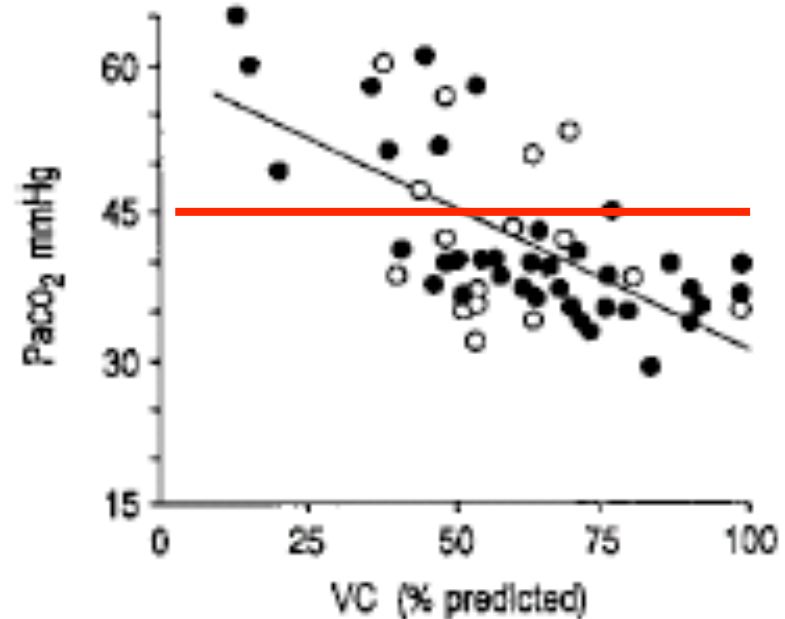
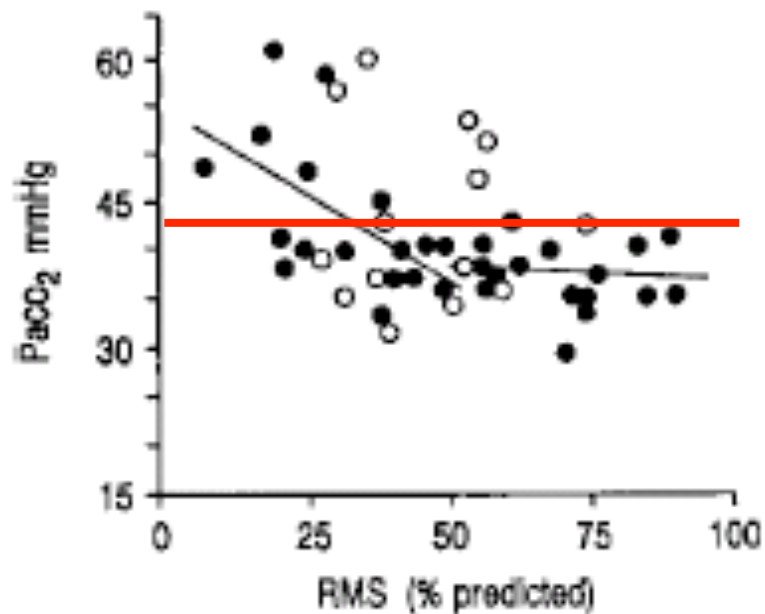
- volumes
- **débits**
- gaz du sang
- exploration du sommeil
- mesures de pression
- électromyographie

exploration fonctionnelle des muscles respiratoires

- volumes
- débits
- **gaz du sang**
- exploration du sommeil
- mesures de pression
- électromyographie

gaz du sang - 1

- PaCO₂ : selon l'importance du déficit
 - modérée : N ou ↓ PaCO₂ modérée
 - sévère ↑ PaCO₂ par ↓ rapport VT/VR
 - ↓ force < 40 %
 - ↓ CV < 50 %

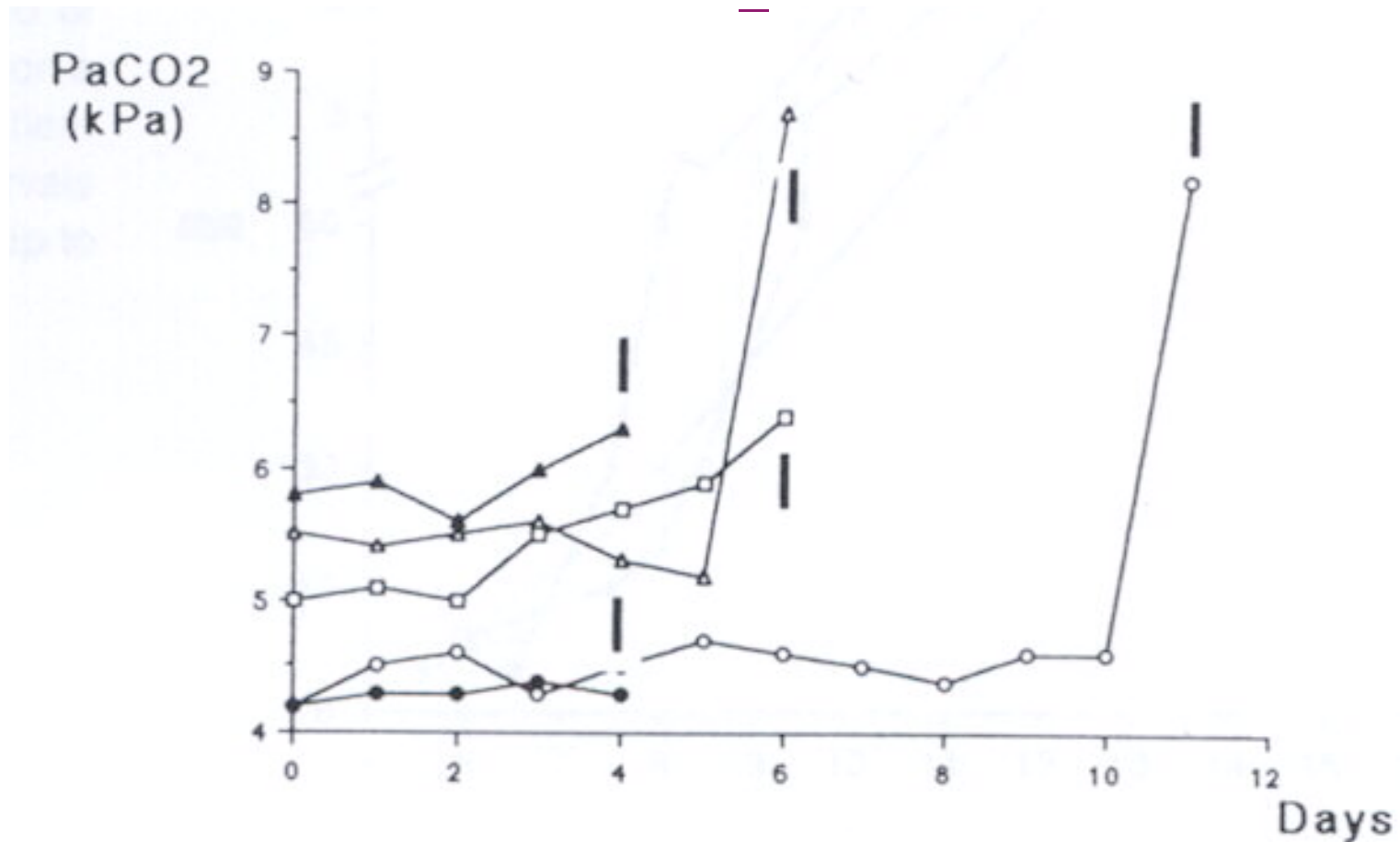


Braun, Thorax 1983

gaz du sang - 2

syndrome de Guillain et Barré

PaCO₂



Chevrolet et coll. Am rev Resp Dis 1991

gaz du sang - 2

- avantages
 - conséquence fonctionnelle du déficit
 - pronostique
- inconvénients
 - sensibilité faible
 - spécificité faible
 - surestimation diurne de PaCO_2
 - altération tardive

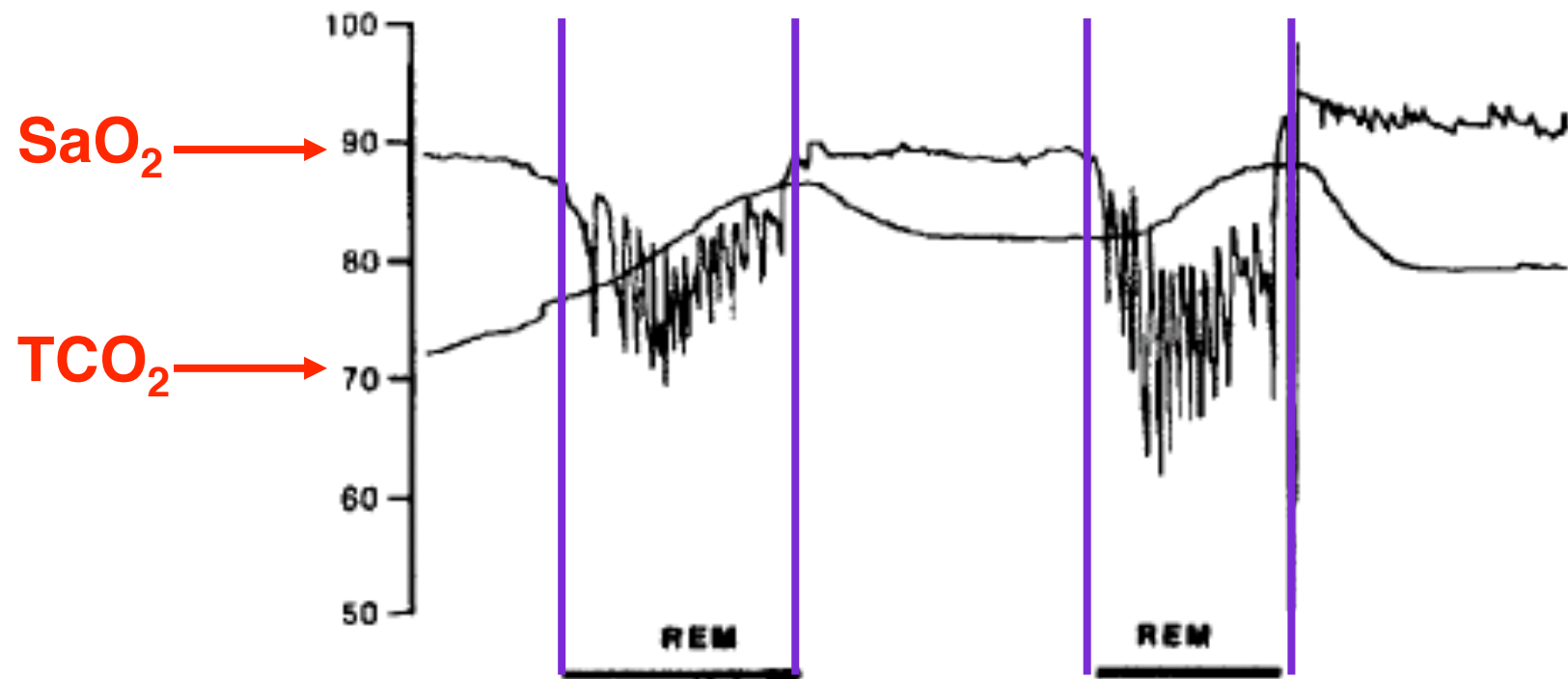
exploration fonctionnelle des muscles respiratoires

- volumes
- débits
- gaz du sang
- **exploration du sommeil**
- mesures de pression
- électromyographie

sommeil - 1

- sommeil REM
 - ↓ activité de tous les muscles squelettiques, sauf
 - diaphragme
 - oculomoteurs
 - la ventilation « repose » sur le diaphragme
 - « démasque » dysfonction diaph → **hypopnées**
- conséquences
 - ↓ PaO_2 nocturne
 - ↑ PaCO_2
 - nocturne
 - matinale : céphalées, asthénie, somnolence

sommeil - 2



sommeil - 3

- avantages
 - simplicité de l'oxymétrie
 - Sensibilité > à PaCO_2 diurne
 - thérapeutique : indication à la VM
- inconvénients
 - lourdeur et coût de la polysomnographie
 - faible valeur pronostic

exploration fonctionnelle des muscles respiratoires

- volumes
- débits
- gaz du sang
- exploration du sommeil
- **mesures de pression**
- électromyographie

mesures de pressions

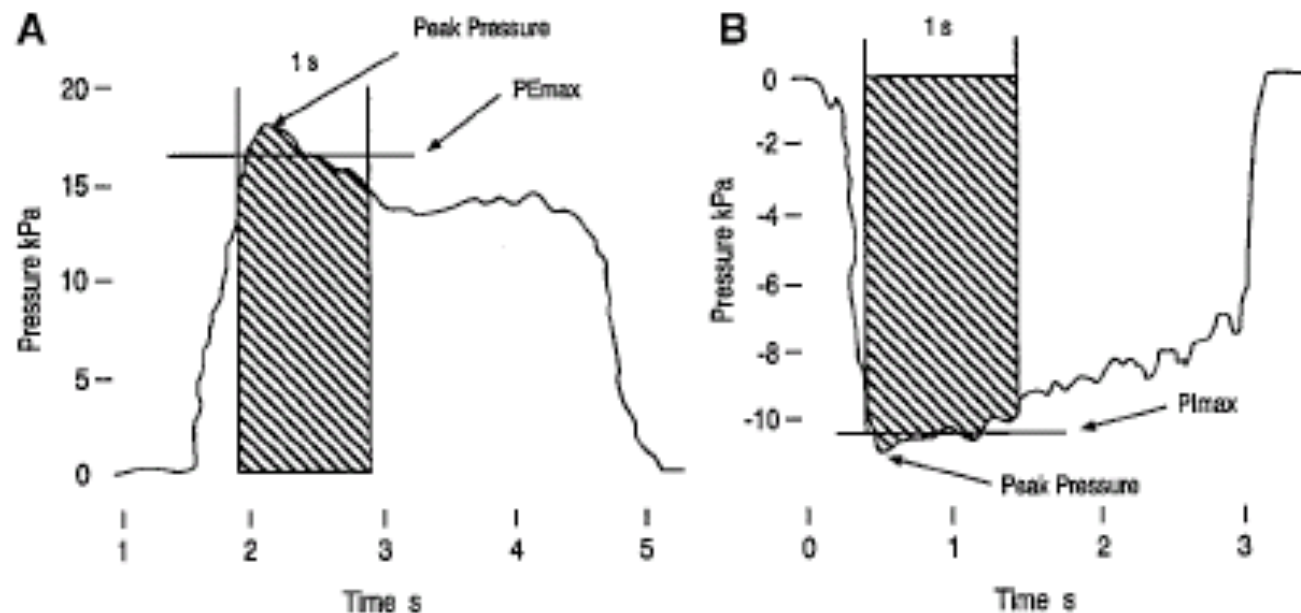
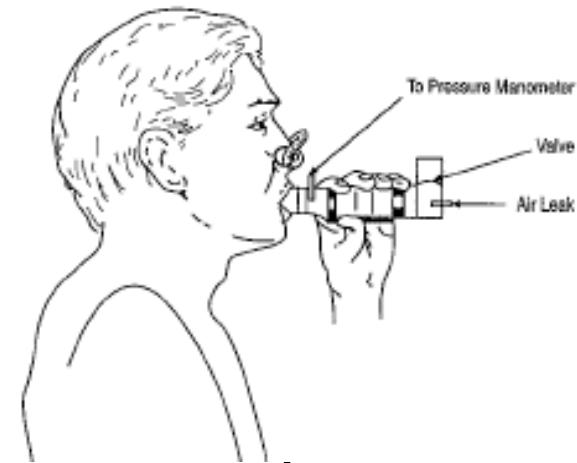
- lors de manœuvres volontaires
 - pressions statiques maximales : PIMax, PEMax
 - sniffs
- en réponse à des stimulations
 - stimulation électrique, magnétique

mesures de pressions

- lors de manœuvres volontaires
 - pressions statiques maximales : PIMax, PEMax
 - sniffs
- en réponse à des stimulations
 - stimulation électrique, magnétique
- en ventilation spontanée
 - mesures
 - P_{eso} , P_{di}
 - calculs
 - travail respiratoire, produit pression-temps

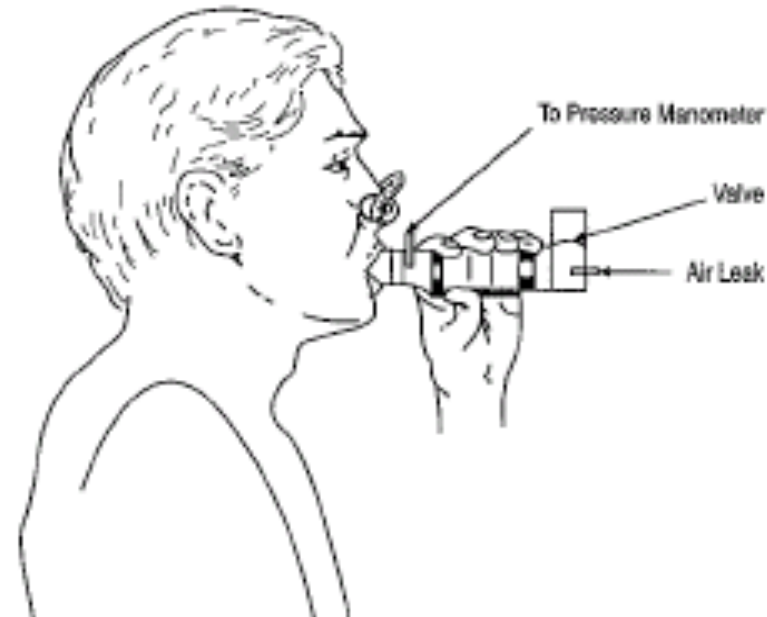
pressions statiques maximales - 1

- définition : pression mesurée lors d'un effort statique maximal
 - Inspiratoire
 - expiratoire
- effort > 1,5 sec
- valeur : moyenne pendant la 1ère seconde



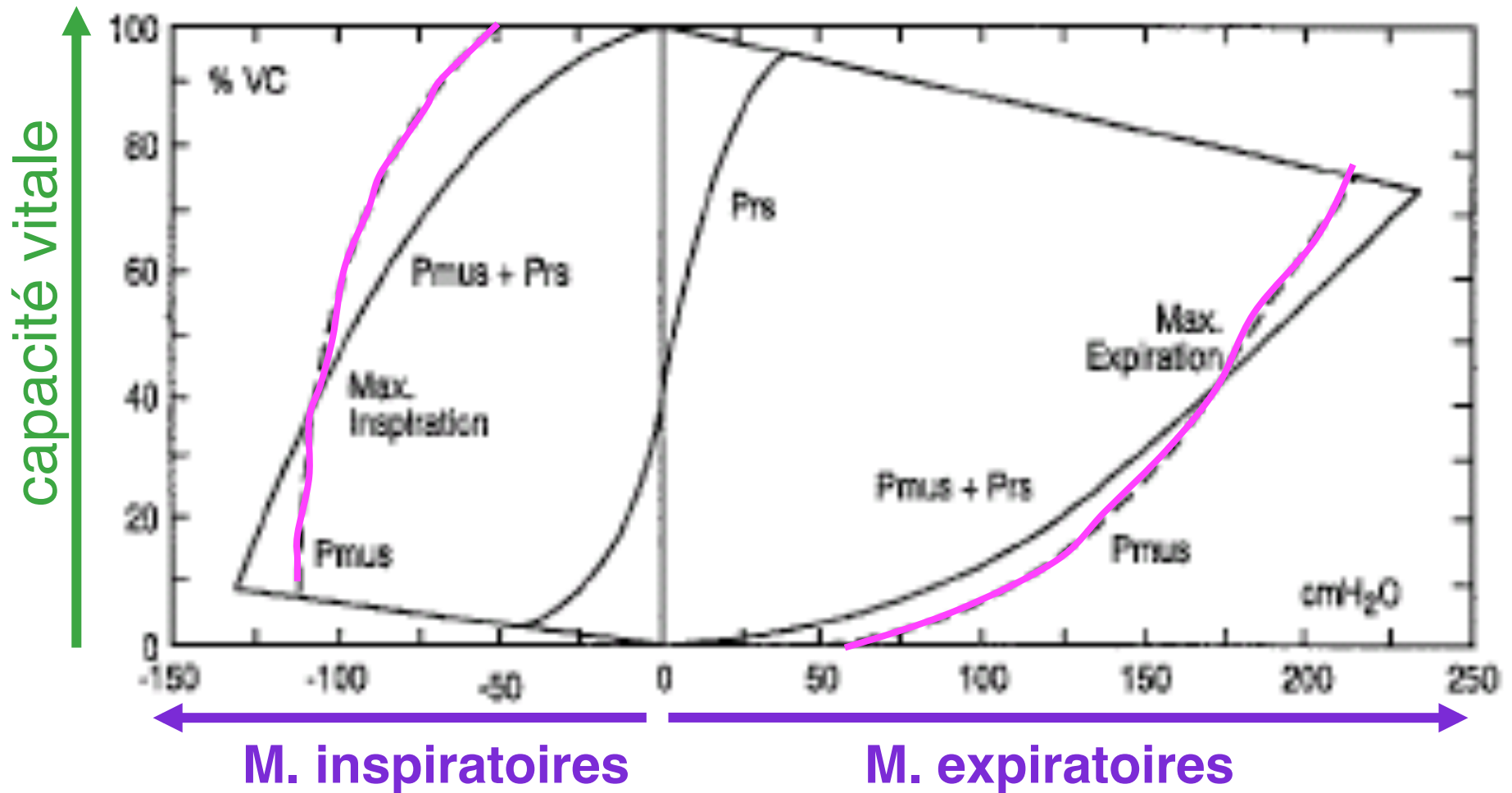
pressions statiques maximales - 2

- opérateur entraîné
- nécessite une fuite dans le système
 - fermeture de glotte
 - muscles faciaux
- influencée par
 - coopération du sujet
 - volume pulmonaire
 - propriétés élastiques de l'appareil respiratoire



pressions statiques maximales - 3

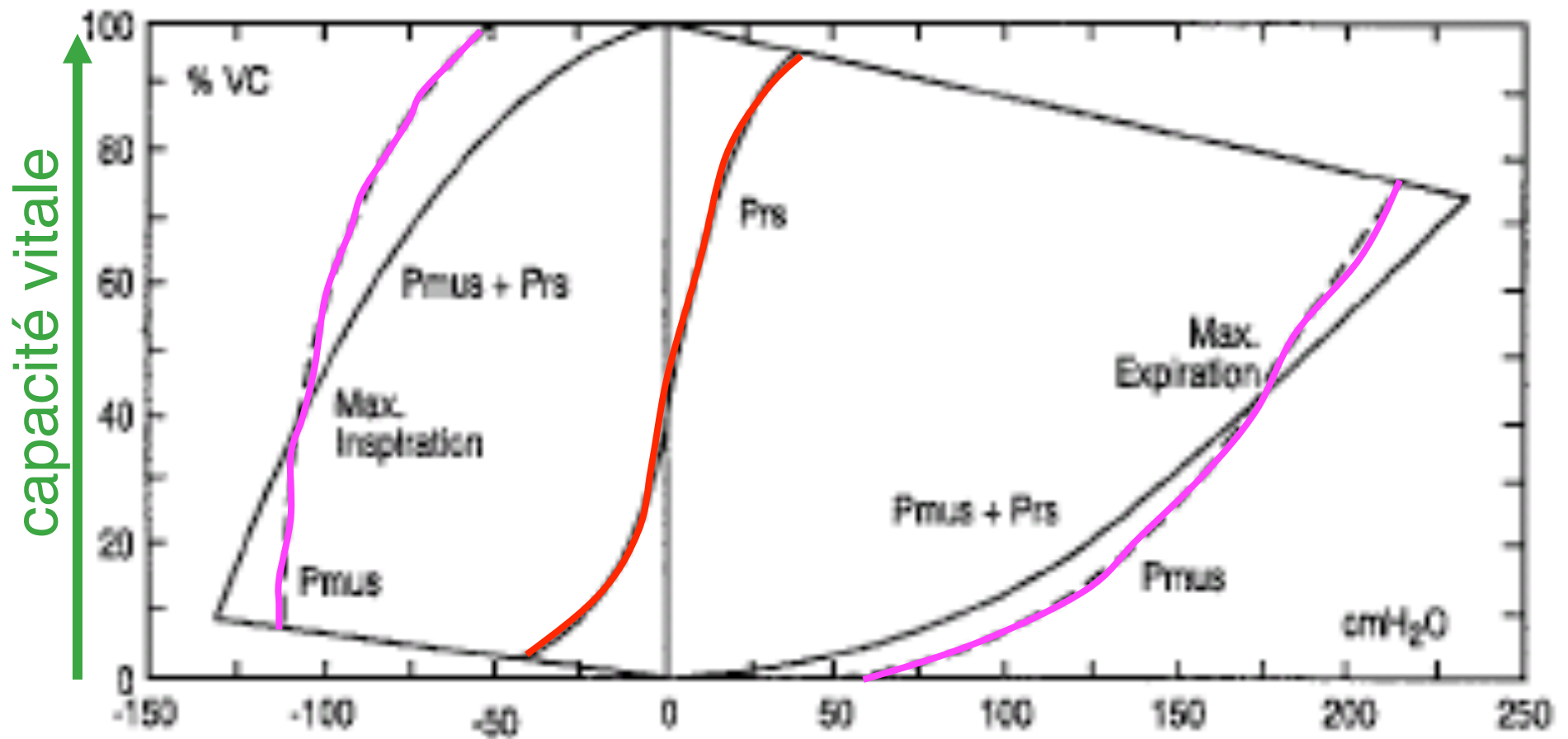
influence du volume pulmonaire



E Agostoni. Statics of the respiratory system 1964

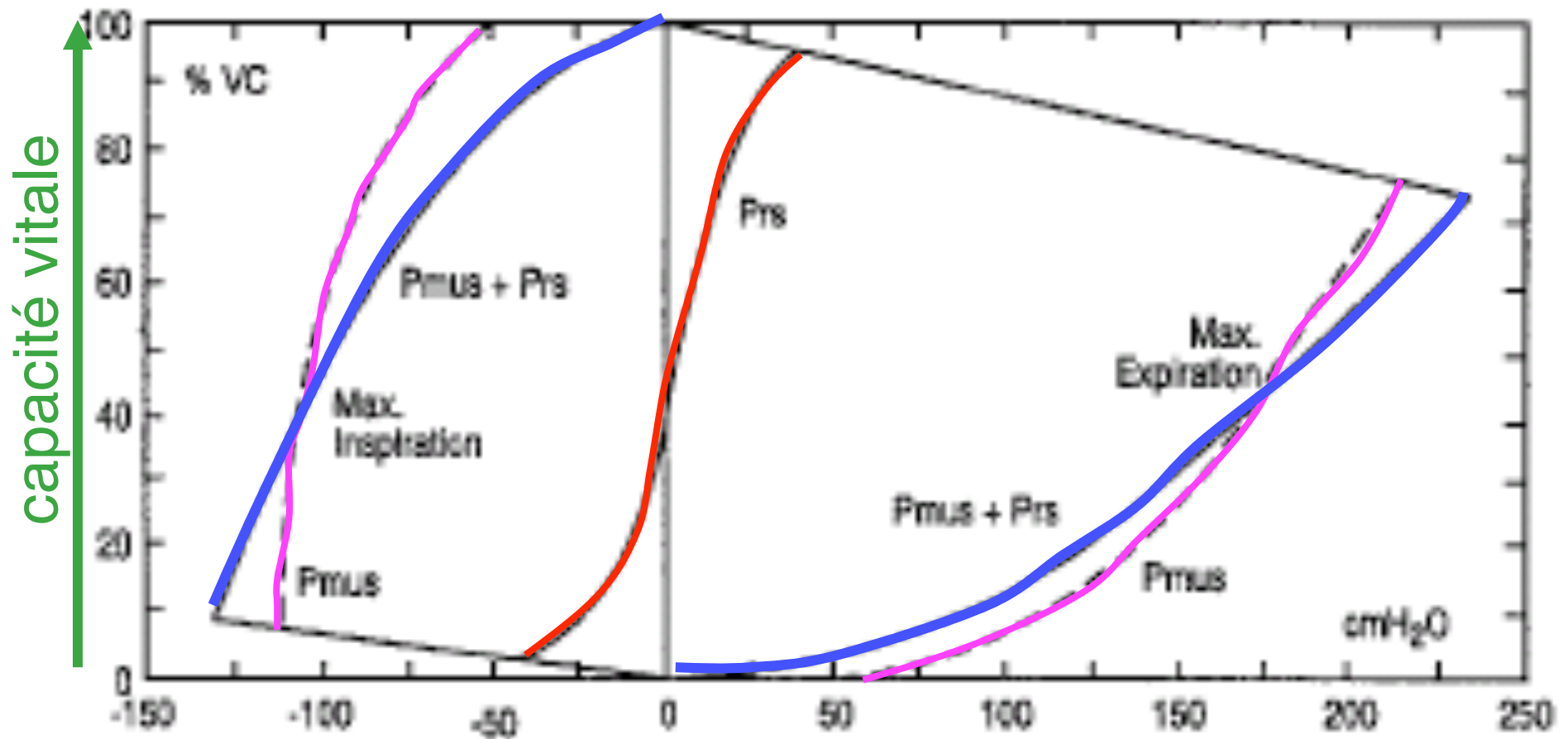
pressions statiques maximales - 4

influence des propriétés élastiques



pressions statiques maximales - 5

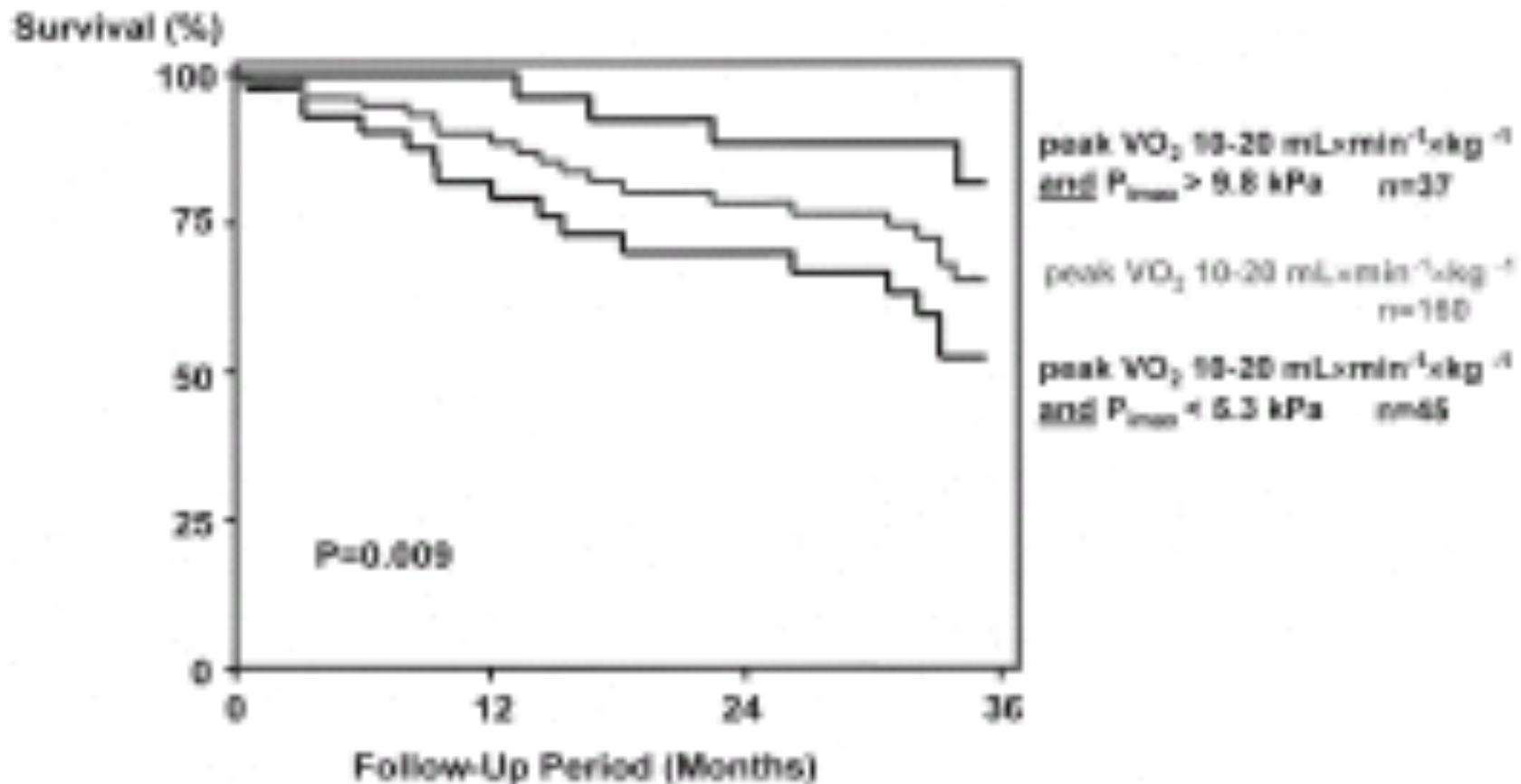
influence du volume et des propriétés élastiques



E Agostoni. Statics of the respiratory system 1964

pressions statiques maximales - 6

pronostic – insuffisance cardiaque



Meyer et coll. Circulation 2001

pressions statiques maximales - 7

- avantage
 - facile à mesurer
 - valeurs normales disponibles
 - PIMax < - 80 cmH₂O
 - PEMax > 120 cmH₂O
- inconvénients
 - coordination difficile : coopération+++
 - intègre : paroi + poumon
 - CPT : + 40 cmH₂O
 - VR : -30 cmH₂O

mesures de pressions

- lors de manœuvres volontaires
 - pressions statiques maximales : PIMax, PEMax
 - sniffs
- en réponse à des stimulations
 - stimulation électrique, magnétique
- en ventilation spontanée
 - mesures
 - P_{eso} , P_{di}
 - calculs
 - travail respiratoire, produit pression-temps

manœuvres de sniff - 1

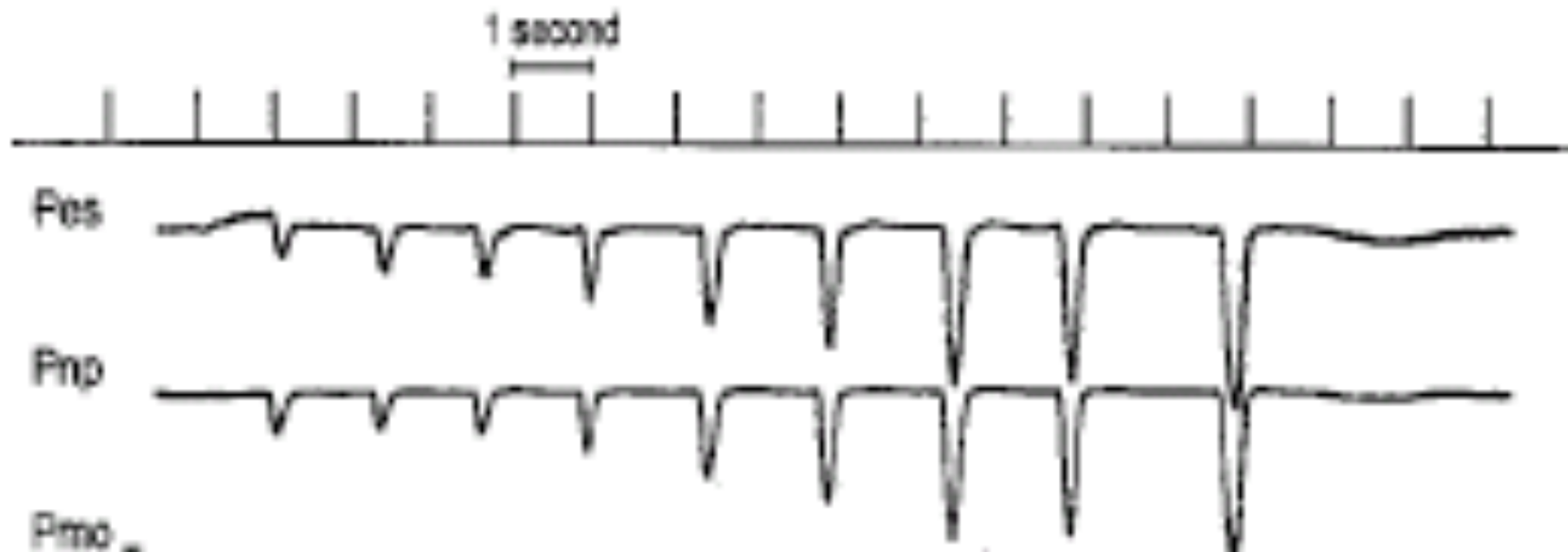
- définition : manœuvre de reniflement maximal
 - mouvement balistique
 - mime contraction maximale du diaphragme
- 5 à 10 efforts
- mesure pression nasale (Pnasale)



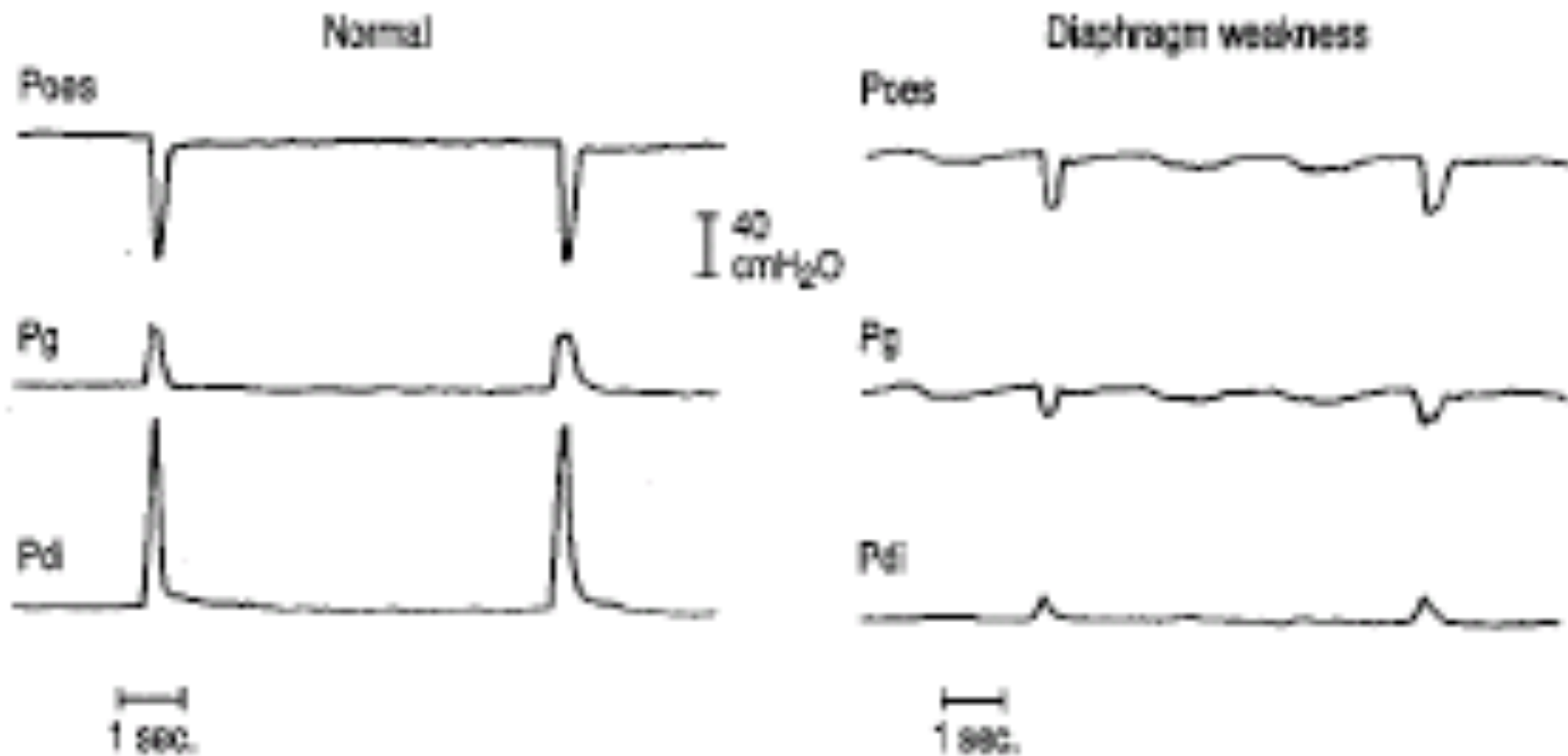
manœuvres de sniff - 2

sniff : relation P_{nasale} - P_{di}

- $P_{nasale} = P_{es}$

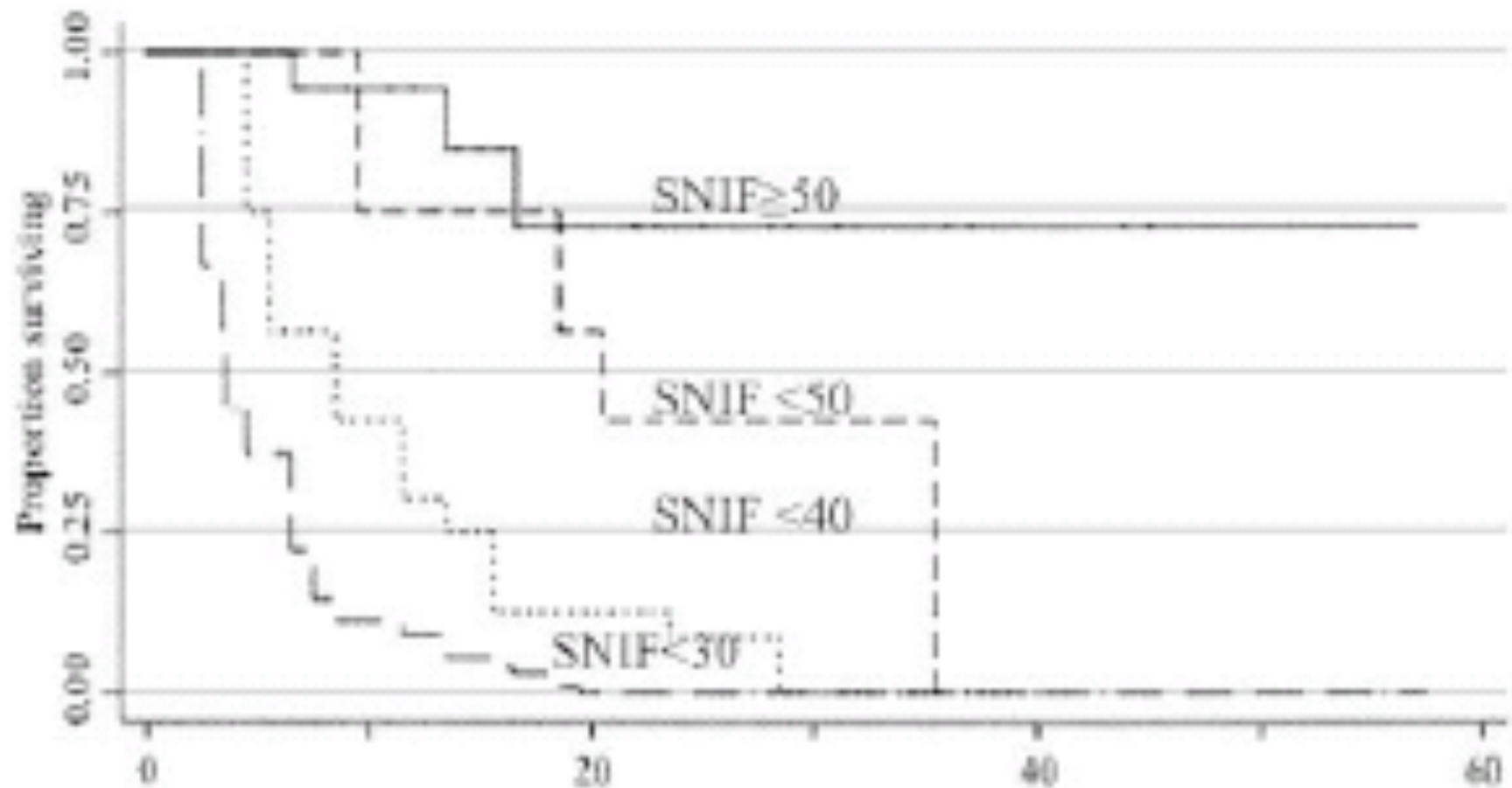


manœuvres de sniff - 4



manœuvres de sniff - 5

pronostic – SLA



Morgan et coll. Am J respir Crit Care Med 2004

manœuvres de sniff - 6

- avantages
 - simple à réaliser, apprentissage bref
 - reproductible
 - valeurs normales disponible
 - faible coopération requise
- inconvénients
 - $P_{\text{sniff}} < P_{\text{IMax}}$ car par totalement isométrique
 - manœuvre volontaire

mesures de pressions

- lors de manœuvres volontaires
 - pressions statiques maximales : PIMax, PEMax
 - sniffs
- en réponse à des stimulations
 - stimulation électrique, magnétique
- en ventilation spontanée
 - mesures
 - Peso, Pdi
 - calculs
 - travail respiratoire, produit pression-temps

stimulation des nerfs phréniques -1

stimulation → dépoléarisation des
nerfs phréniques

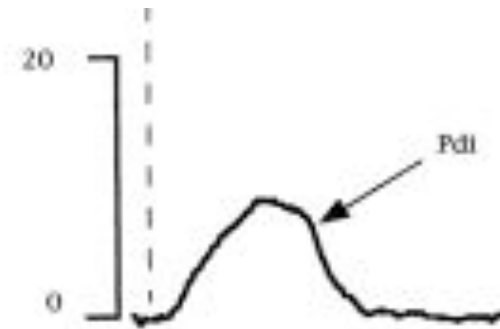
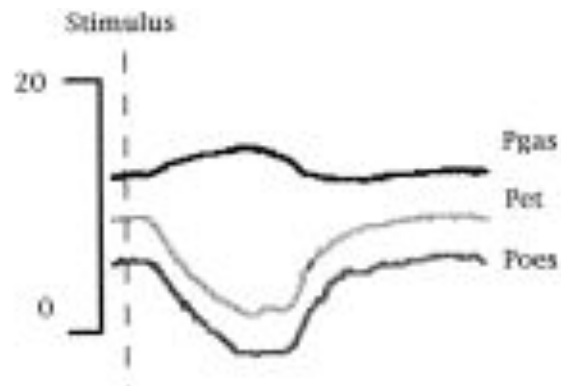
← innervation exclusive

contraction diaphragmatique

isolée & indépendante du SNC

force (twitch)

↔ pression ↔



Watson et coll. Crit Care Med 2001

stim phrénique - 2 - électrique

stimulation électrique - principe

- stimulateur → courant électrique
- → électrode → champ électrique
- → stimule nerf
 - recherche du nerf phrénique
 - isoler du plexus brachial
 - maintien contact nerf-électrode



stim phrénique - 3 - électrique

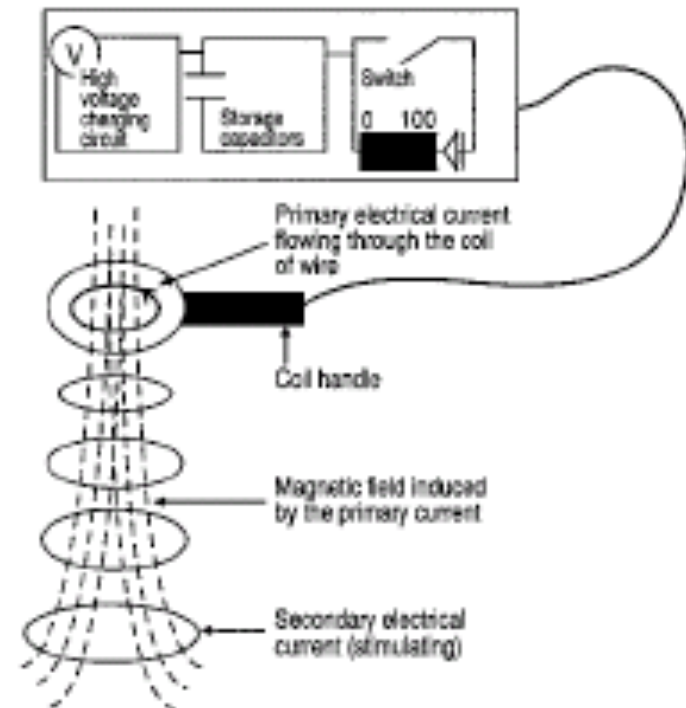
stimulation électrique - balance

- avantage : activation « pure » du diaphragme
- inconvénients
 - stimulation unilatérale
 - recherche du phrénique complexe (expertise)
 - isoler du plexus brachial
 - maintien du contact électrode-nerf
 - douloureux

stim phrénique - 4 - magnétique

stimulation magnétique - principe

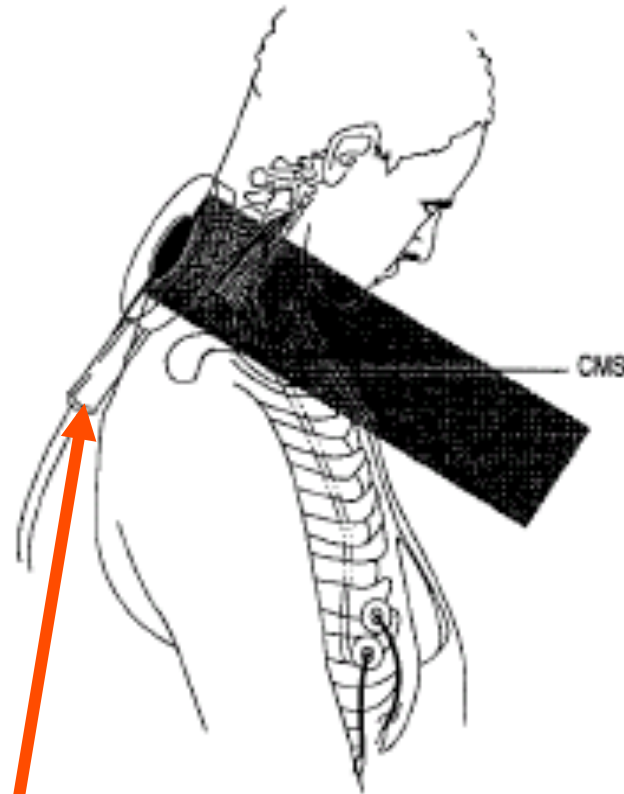
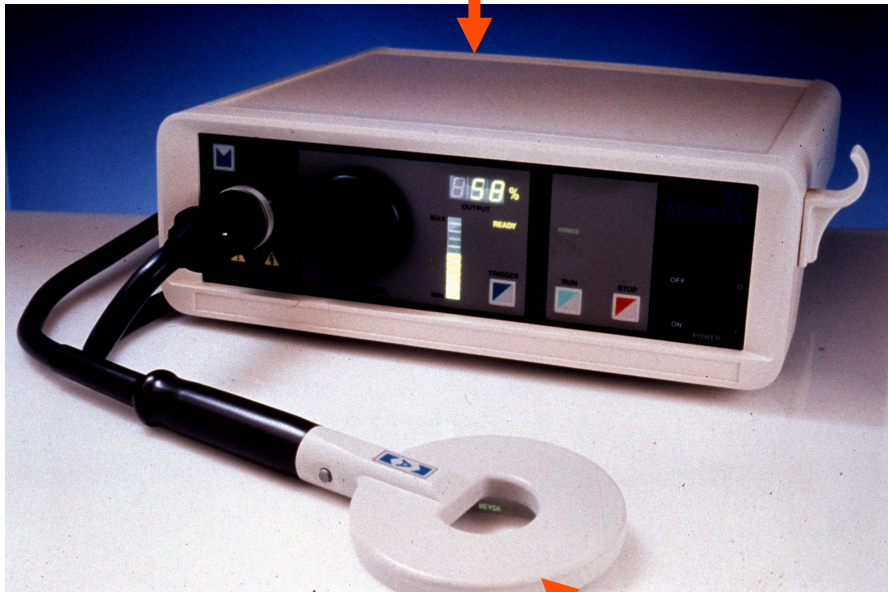
- stimulateur → courant électrique
 - intense
 - rapidement variable
- → bobine → champ magnétique
- traverse
 - tissus cutané
 - OS
- → nerf → dépolarisation



stim phrénique - 5 - magnétique

stimulation magnétique - principe

stimulateur



bobine

stim phrénique - 6 - magnétique

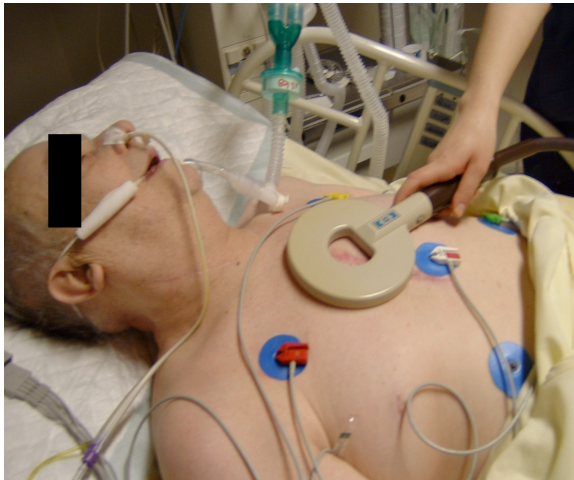
stimulation magnétique - techniques

- 3 techniques de stimulation magnétique
 - antérieure
 - antéro-latérale
 - cervicale

antérieure

antéro-latérale

cervicale



stim phrénique - 7 - magnétique

stimulation magnétique - balance

- avantages
 - indolore
 - facile
 - sensible
- inconvénient
 - peu spécifique des nerfs phréniques

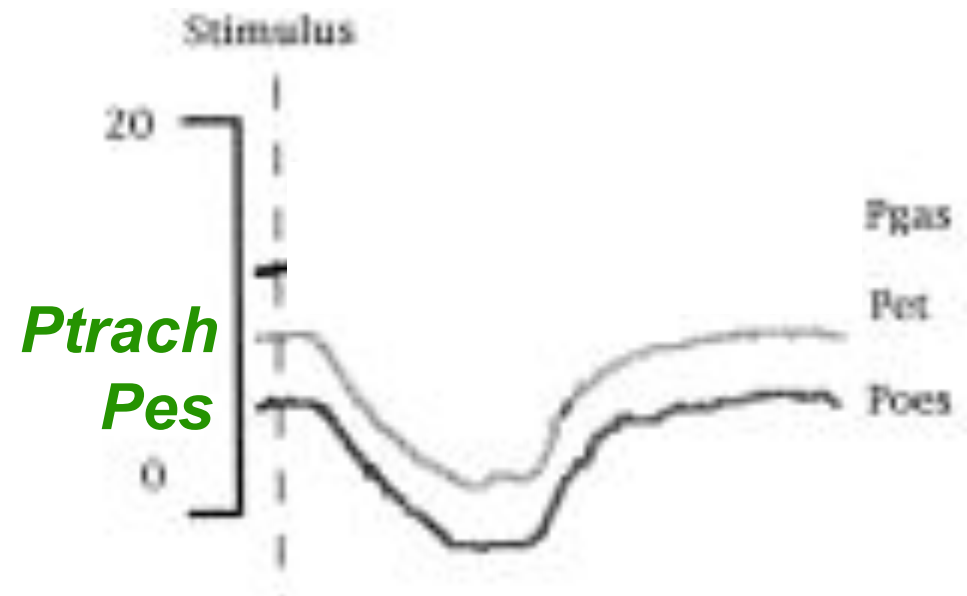
stim phrénique - 9 - mesures

recueil des pressions

aux EFR



en réanimation



exploration fonctionnelle des muscles respiratoires

- volumes
- débits
- gaz du sang
- exploration du sommeil
- mesures de pression
- **électromyographie**

électromyographie - 1

principes

- recueil : 3 types électrodes
 - surface
 - oesophagienne
 - aiguille
- analyse : 2 grands modes
 - activité spontanée
 - stimulation

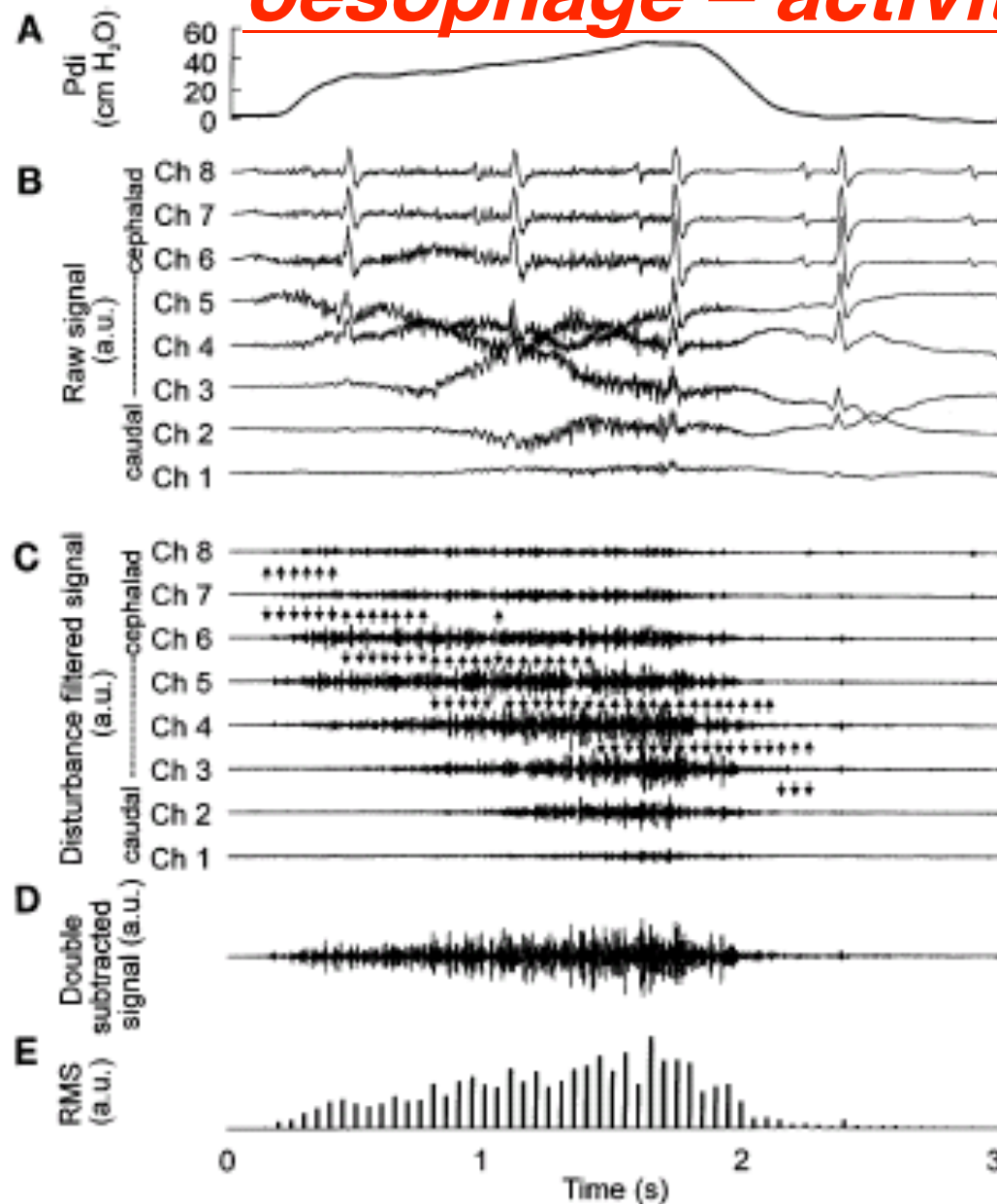
électromyographie - 2

choix des électrodes

- **surface**
 - non invasive, large échantillonnage
 - mais : contamination
- **oesophagienne**
 - moins de contamination
 - mais : inconfort
- **aiguille**
 - contamination minime, étude unités motrices
 - mais : traumatique

électromyographie - 3

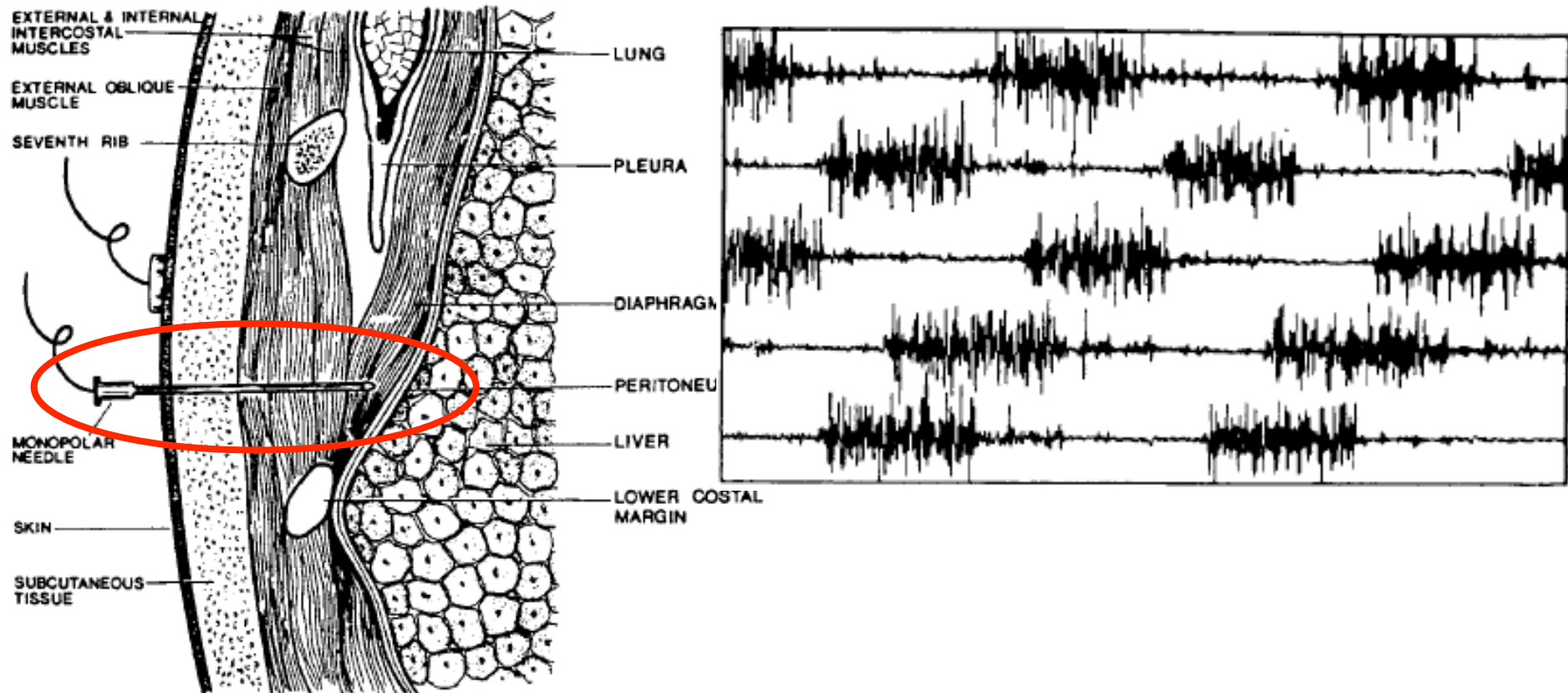
oesophage – activité spontanée



*Sinderby et coll.
J Appl Physiol
2001*

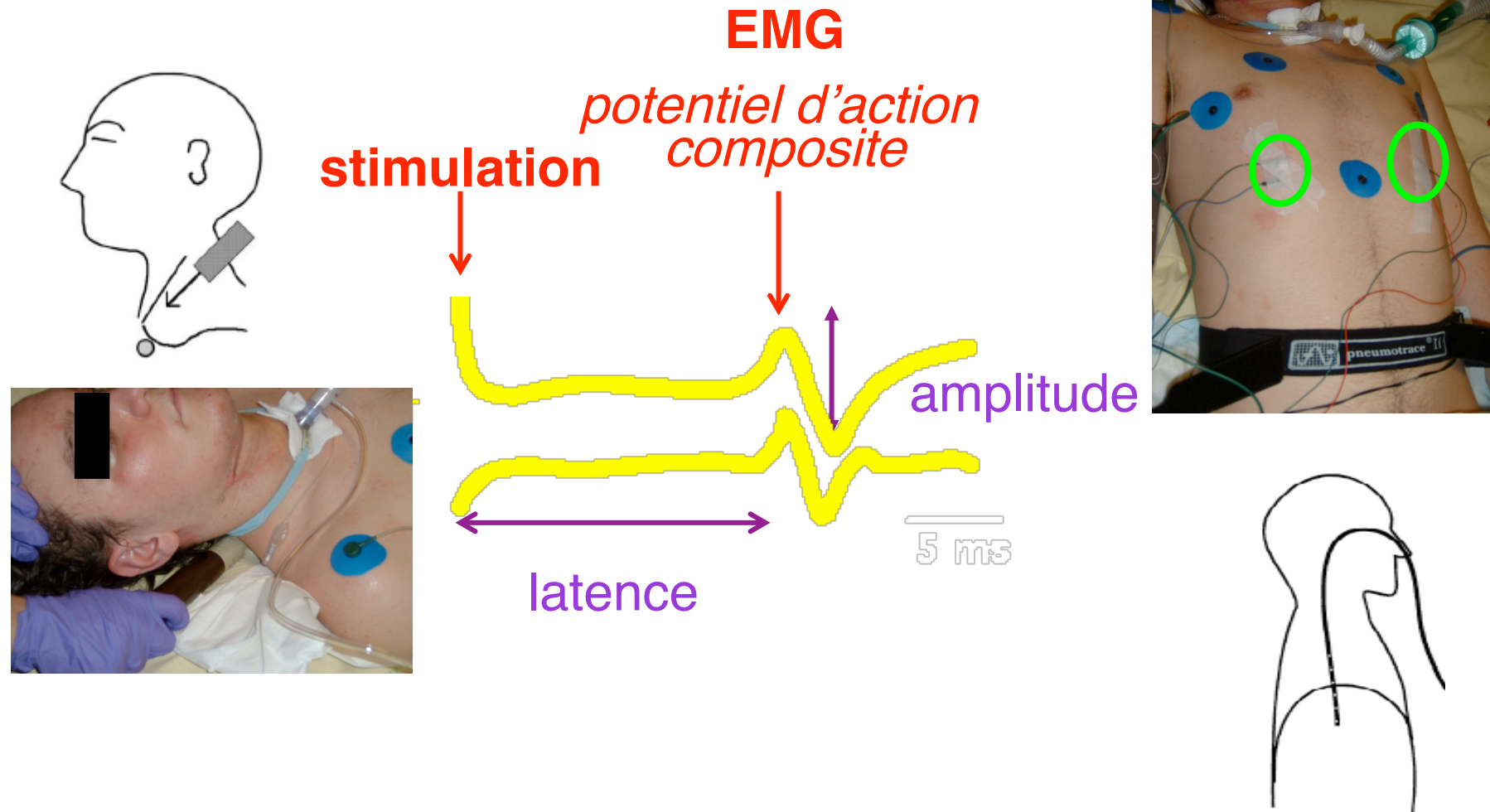
électromyographie - 4

électrodes - aiguilles



électromyographie - 5

stimulations - principe



électromyographie - 6

stimulations - analyse

- **absence de potentiel d'action**
 - lésion du nerf phrénique
 - ex : trauma, chir cardiaque...
- **↓ amplitude**
 - atteinte axonale
 - ex : polyneuropathie...
- **↑ latence**
 - démyélinisation
 - ex : syndrome de Guillain-Barré...

conclusion

muscles respiratoires

- diaphragme
 - caractéristiques particulières
 - principal muscle... mais pas le seul
- exploration fonctionnelles
 - multiples
 - complémentaires
 - avantage et inconvénients