

Plan

Physiologie pour les techniques biomédicales

Chap1. Système Respiratoire

- échelle cellulaire (échanges gazeux, transport O₂, ...)
- échelle organique (anatomie, propriétés mécaniques, ...)
- paramètres mesurables (SpO₂, SaO₂, Volumes respiratoires, ...)
- ventilations artificielles et instrum

Chap2. Système Musculaire

- échelle cellulaire (myocyte, unité motrice, jonction NM, ...)
- échelle organique (types, métabolisme, biomécanique)
- paramètres mesurables (EMG, ENMG, ...)

Chap3. Système Nerveux

- échelle cellulaire (neurone, potentiels membranaires, synapse, ...)
- échelle organique (connectivité cérébrale, électrogénèse, ...)
- paramètres mesurables (EEG, MEG, Potentiels évoqués, IRMf...)

Plan

Physiologie pour les techniques biomédicales

Chap2. Système Musculaire

- échelle cellulaire (myocyte, unité motrice, jonction NM, ...)
- échelle organique (types, métabolisme, biomécanique)
- paramètres mesurables (EMG, ENMG, ...)

Muscles striés



Muscles lisses

La contraction musculaire

- **Les muscles, deux grandes catégories sur la base de leur observation au microscope**
 - **les muscles striés**
 - Innervés par le système nerveux somatique
 - **les muscles lisses**
 - Innervés par le système nerveux autonome

La contraction musculaire

–Les muscles lisses

- Organes creux : tractus digestif, vessie, etc...
 - Rôle dans le péristaltisme
- Paroi des artères
 - Rôle dans la régulation de la pression artérielle

La contraction musculaire

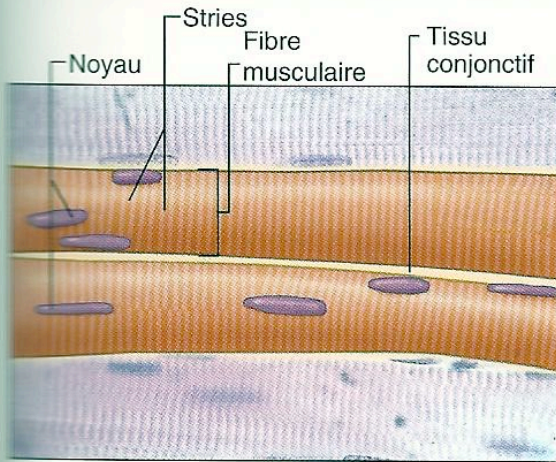
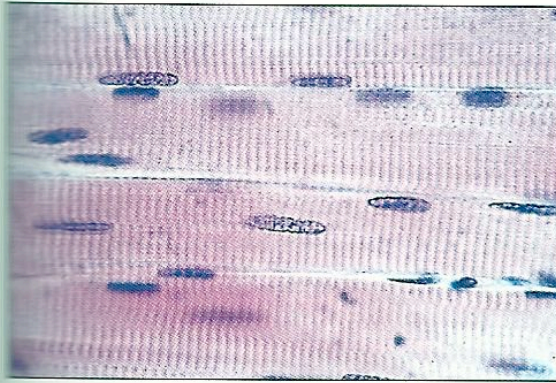
–Les muscles striés

- Muscle cardiaque :
 - contraction rythmique spontanée
 - le système nerveux autonome modifie la fréquence cardiaque

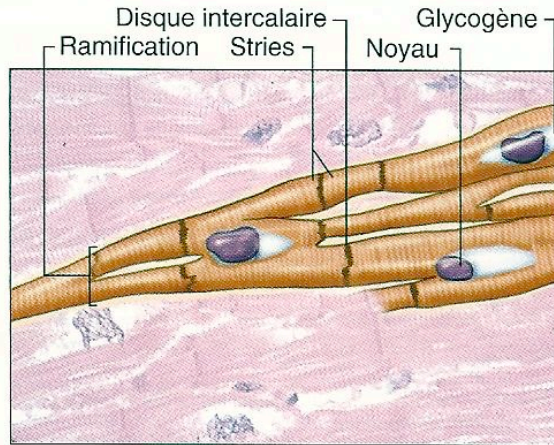
La contraction musculaire

–Les muscles striés

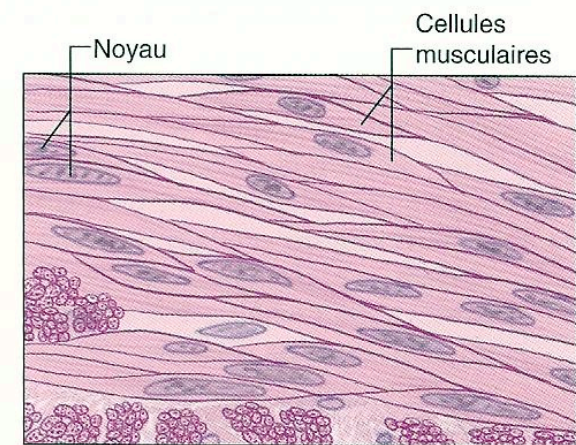
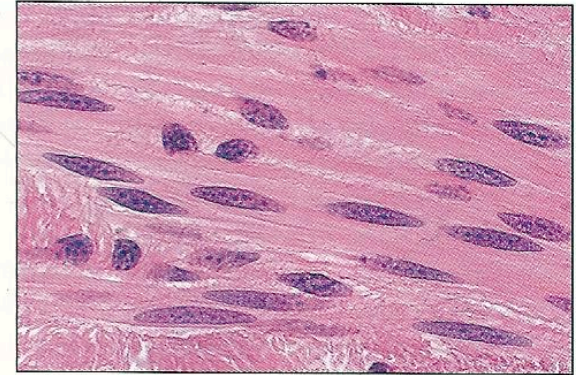
- Muscles squelettiques
 - Membres et corps
 - Mouvements des os autour des articulations
 - Mouvements des yeux
 - Muscles respiratoires
 - Expression faciale
 - Muscles de la parole



(a) Muscle squelettique



(b) Muscle cardiaque



(c) Muscle lisse

Comparaison des muscles squelettique (a), cardiaque (b) et lisse (c). Les muscles cardiaques et squelettiques ont un aspect strié. Les cellules des muscles cardiaque et lisse tendent à n'avoir qu'un noyau, alors que les fibres musculaires squelettiques sont multinucléées.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

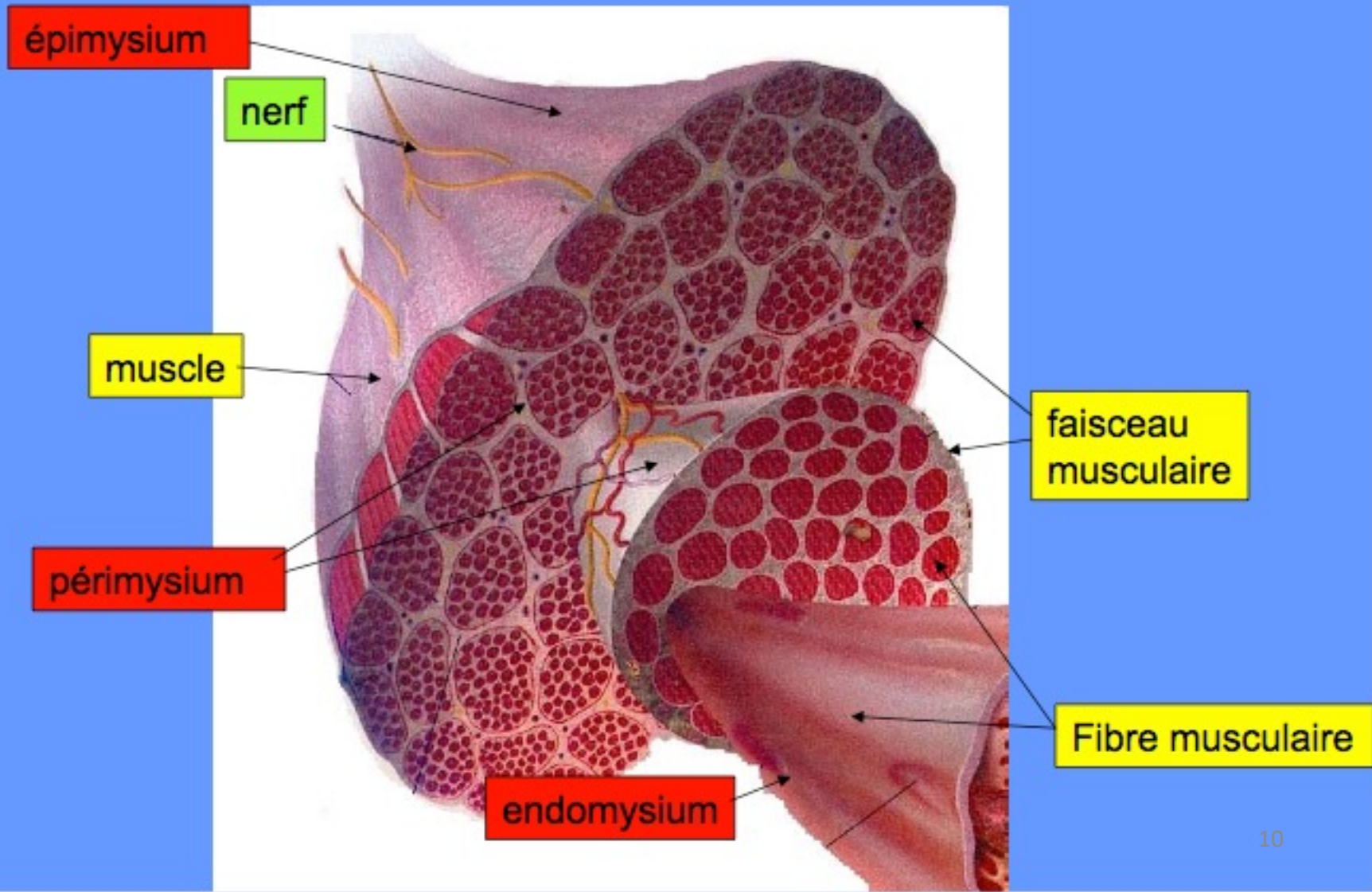
- **Anatomie physiologique du muscle squelettique**
 - **une enveloppe aponévrotique commune**
l'épimysium
 - **les faisceaux musculaires**
 - plusieurs milliers de fibres musculaires
 - **Le pérymysium** : enveloppe commune à toutes ses fibres

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Anatomie physiologique du muscle squelettique**
 - **La fibre musculaire**
 - **L'endomysium** : gaine conjonctive
 - **cellules satellites** entre la fibre et l'**endomysium**
 - **Les tendons**
 - Constitués par toutes ces enveloppes qui se rejoignent aux extrémités

Le muscle squelettique



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **La fibre musculaire**

- **cellule allongée multinuclée,**

- cylindrique, de diamètre transversal compris entre 10 et 100 μm .
 - occupe le plus souvent la longueur totale du muscle, c'est-à-dire presque toujours plusieurs centimètres, parfois plus de vingt.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Le sarcolemme : membrane cellulaire de la fibre musculaire constituée**
 - d'une vraie membrane cellulaire appelée **membrane plasmique**
 - d'un revêtement externe, **l'endomysium**, qui se compose d'une fine couche de *substance polysaccharidique* contenant de nombreuses fibres de *collagène*

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Les structures contractiles : les myofibrilles**
 - plusieurs centaines à plusieurs milliers de myofibrilles par fibre selon
 - le muscle
 - l'entraînement
 - diamètre transversal varie de 1 à 3 μm

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Au microscope optique,
 - alternance régulière
 - » de **zones claires** (bandes I dérivé de isotrope)
 - » et de **zones sombres** (bandes A dérivé de anisotrope)
 - les bandes A et I de toutes les myofibrilles d'une même fibre musculaire se trouvent au même niveau donnant à la fibre **son aspect strié**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

–La bande A

» une zone plus claire dans sa portion médiane, **zone H** .

» Région plus sombre **au** milieu de H:
la ligne M.

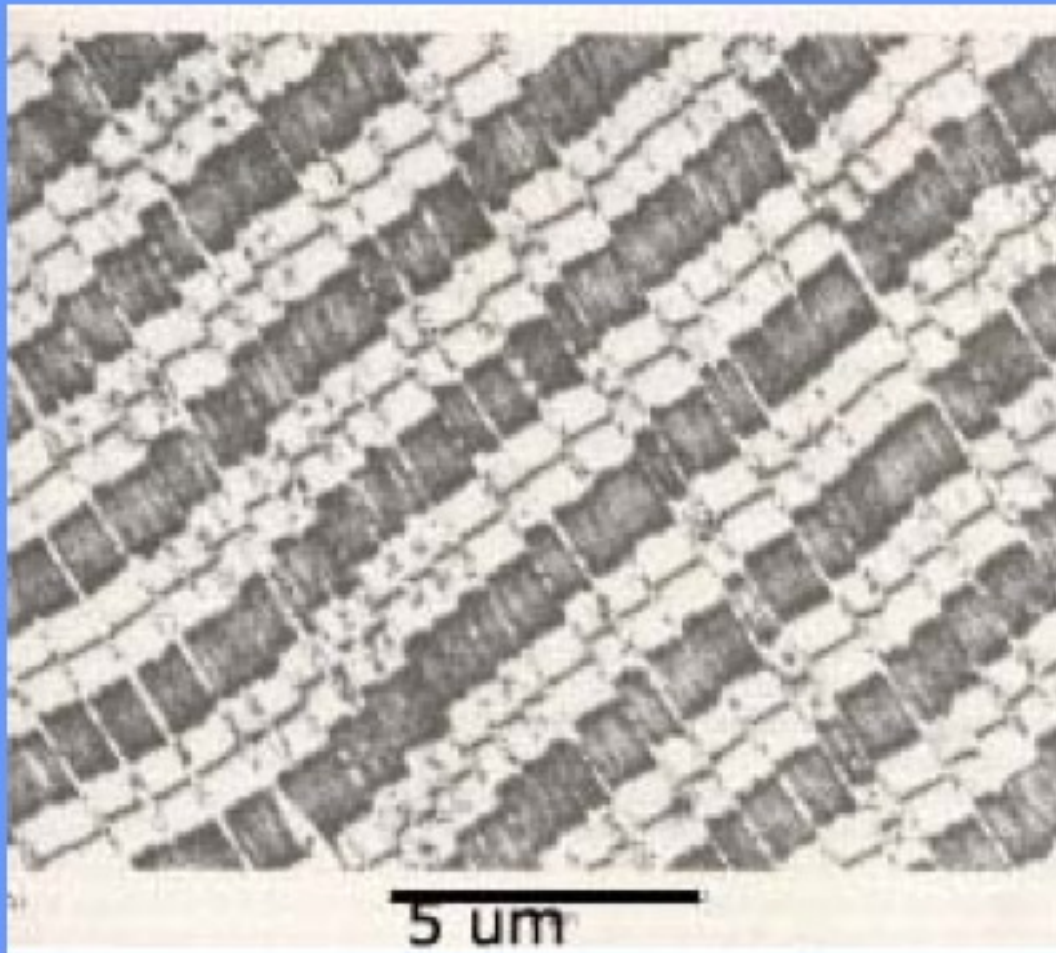
– Dans la portion médiane de chaque **bande I** une mince membrane disposée transversalement appelée **strie Z**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- La portion de myofibrilles comprise entre 2 stries Z est appelée **sarcomère**.
- Lorsque le muscle est dans sa position d'équilibre, la longueur du sarcomère est d'environ **2.2 μm** .

La myofibrille



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Au microscope électronique, 2 types de filaments disposés parallèlement, les **filaments épais** et les **filaments fins**.
 - **Les filaments épais** sont constitués de multiples molécules de myosine
 - **Les filaments fins** sont constitués d'actine, de tropomyosine et de troponine.

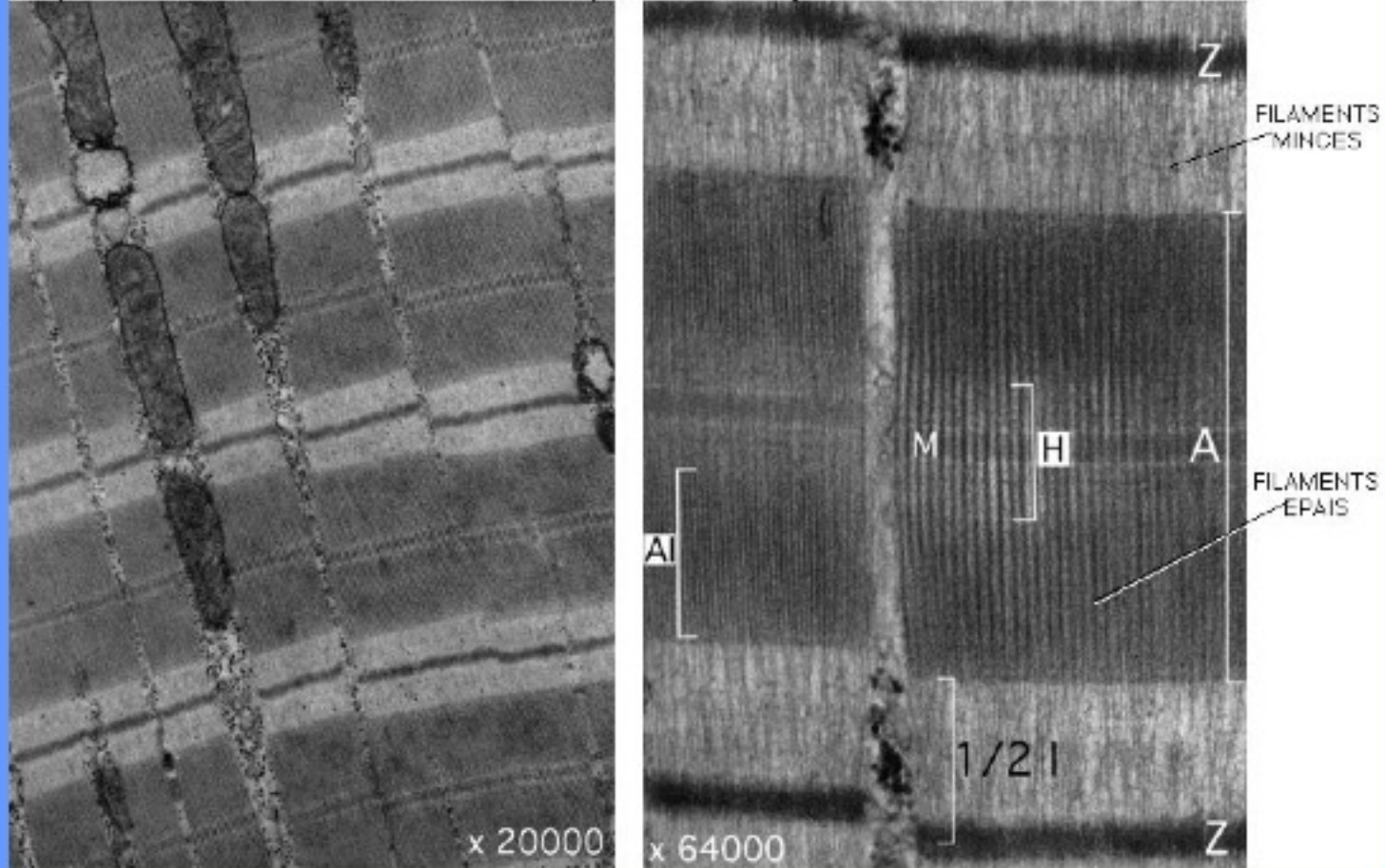
SARCOMERE



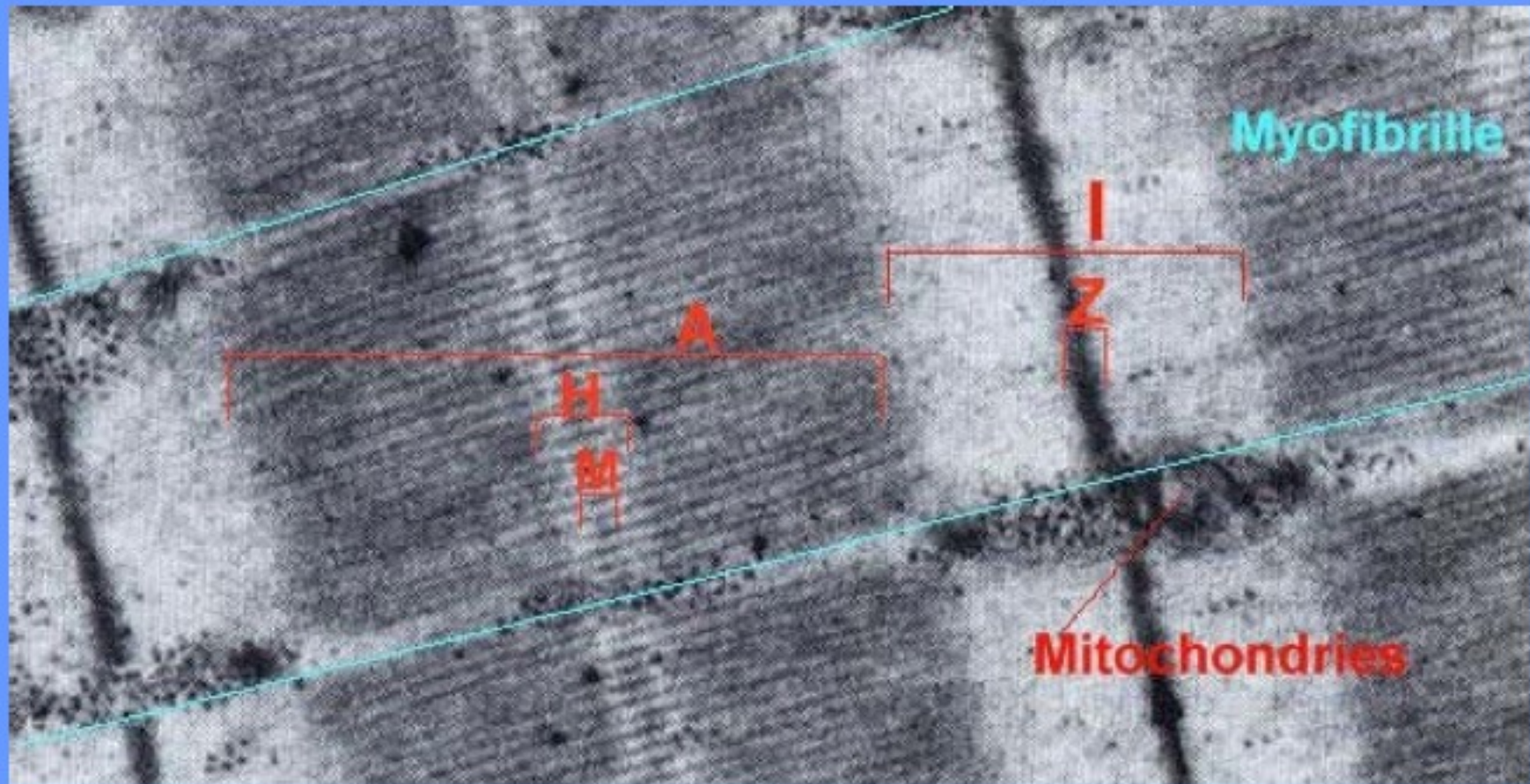
MYOFILAMENTS EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE

La myofibrille

Aspect des sarcomères en microscopie électronique



La myofibrille



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

–La myosine

- 6 chaînes polypeptidiques, 2 chaînes **lourdes** et 4 chaînes légères (**méromyosine légère**).

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

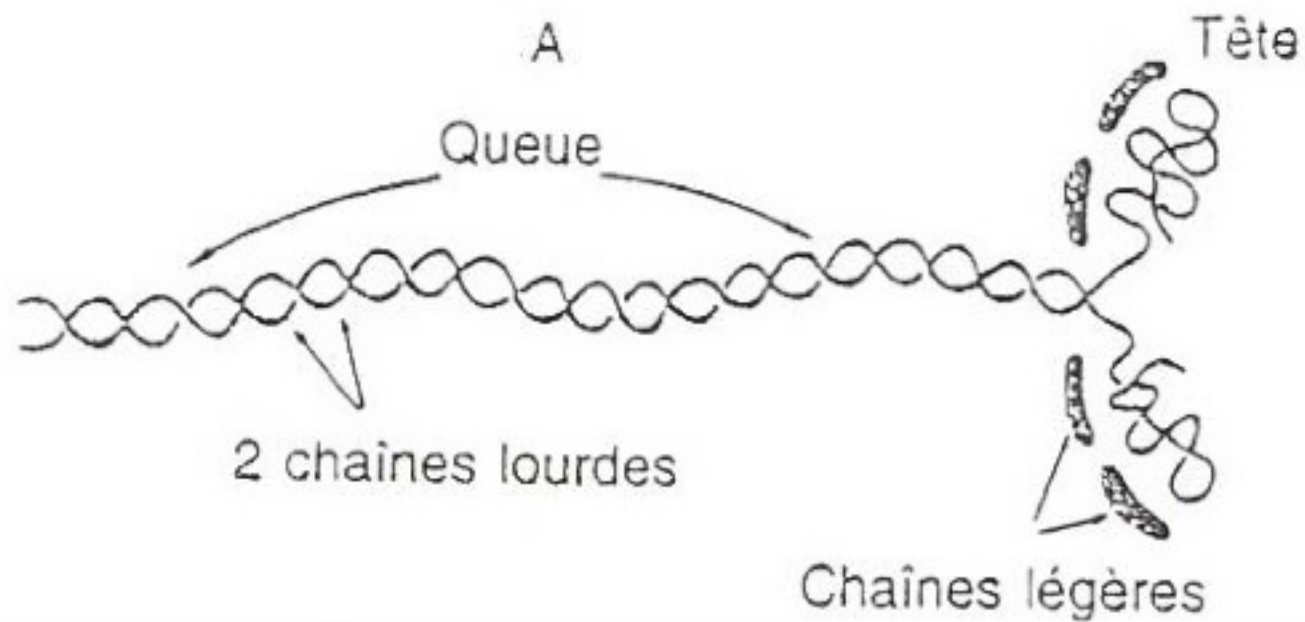
- Les 2 chaînes lourdes s'enroulent l'une autour de l'autre en formant **une double hélice**.
- une des 2 extrémités de chacune des chaînes est pelotonnée et forme ainsi une protéine globulaire appelée **tête de la myosine**. Ainsi, il y a 2 de ces têtes posées côte à côte à l'une des extrémités de la double hélice.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- La partie allongée s'appelle la **queue**.
- Les 4 chaînes légères font également partie des têtes de myosine, 2 par tête. Ces chaînes légères contribuent à contrôler le fonctionnement de la tête pendant la contraction musculaire

La myosine



D'après Fig. 6-5 p.72. Guyton. Précis de physiologie médicale. Piccin. Padoue. 1996

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Le filament de myosine**
 - au moins 200 molécules de myosine
 - Les queues des molécules de myosine réunies en faisceaux : **le corps du filament**
 - les têtes débordent à l'extérieur du grand axe du corps

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Les ponts transversaux** : une partie de la portion de la molécule de myosine qui forme l'hélice se dirige avec la tête vers l'extérieur, formant ainsi un bras capable de déplacer la tête vers l'extérieur du corps

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

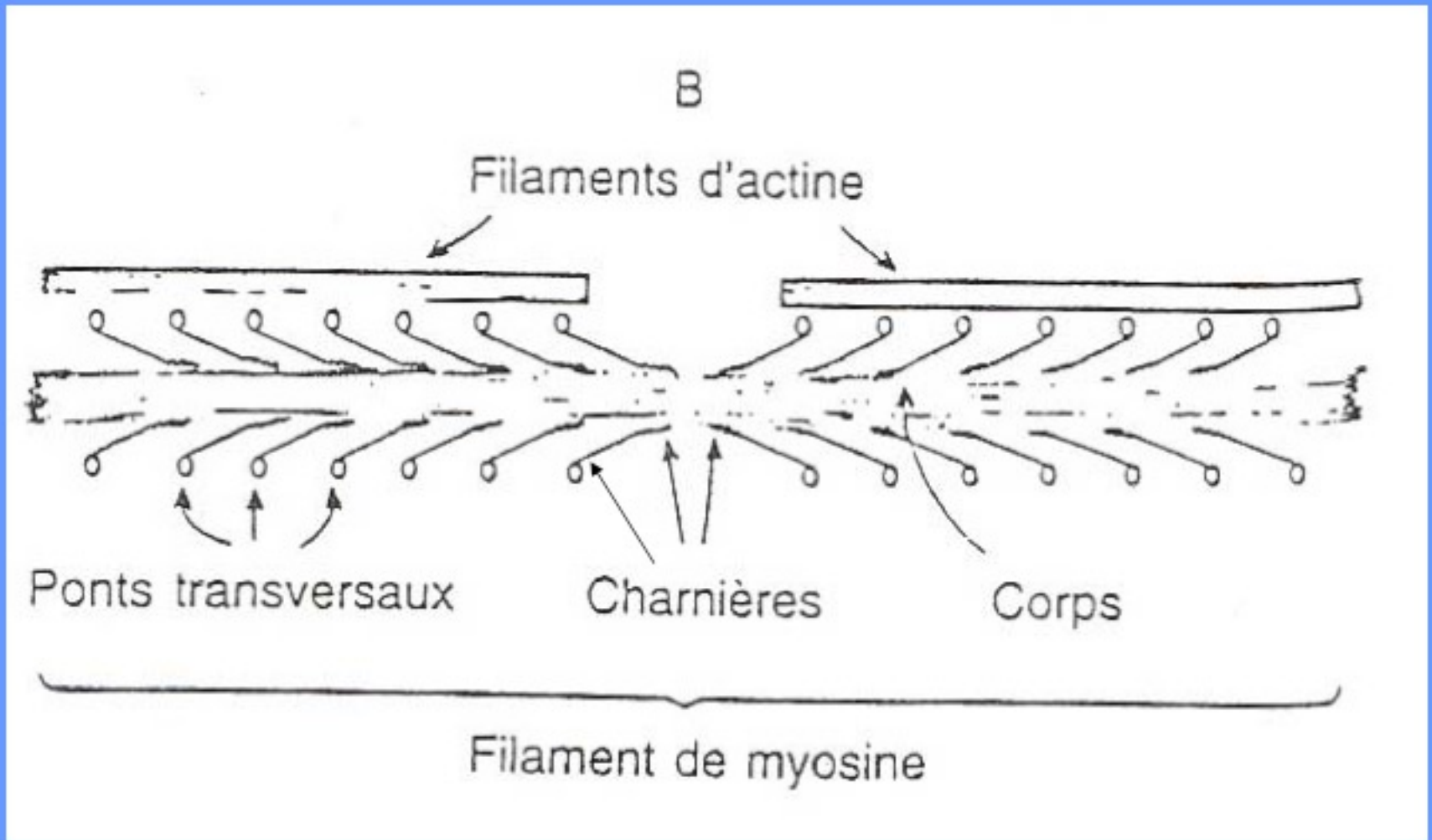
- **Les charnières** : chaque *pont transversal* est flexible en 2 points appelés *charnières*,
 - l'une située à l'endroit où le bras est rattaché au corps du filament de myosine
 - l'autre où la tête est attachée au bras.Ces bras articulés permettent aux têtes de s'écarter loin ou de se rapprocher étroitement du corps du filament de myosine.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Activité ATPasique** de la tête de myosine. La tête de myosine a une fonction ATPasique. Cette propriété permet à la tête de cliver l'ATP et d'utiliser l'énergie libérée par la liaison phosphate à haute énergie de l'ATP pour la contraction

La myosine



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– Les filaments fins sont constitués d'actine, de tropomyosine et de troponine

- **L'actine**

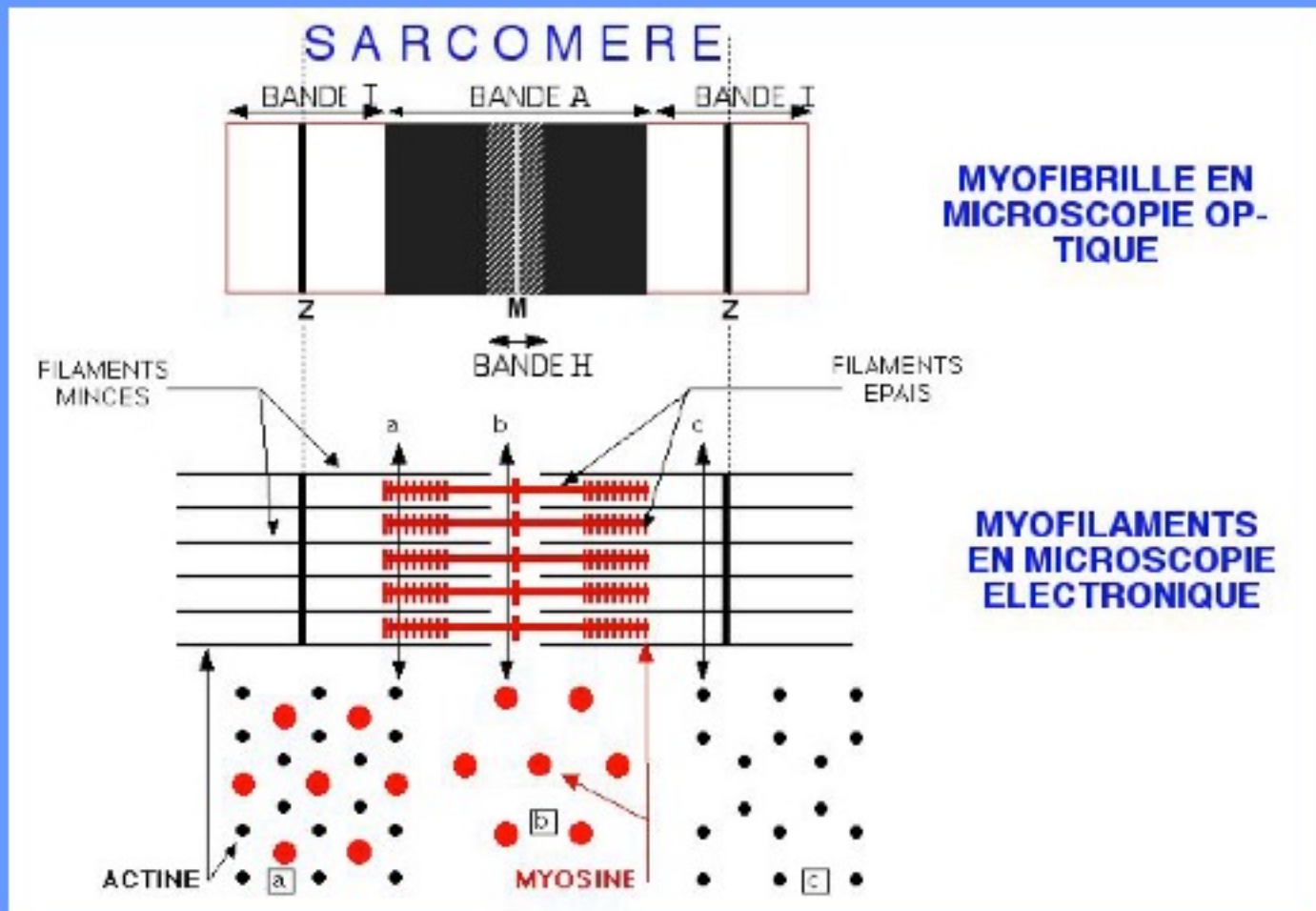
- L'axe central du filament d'**actine** est formé par une double hélice d'une protéine **l'actine F**. Les 2 brins forment une hélice.
- Chaque brin de la double hélice se compose de molécules d'**actine G polymérisées**
- Une molécule d'**ADP** est attachée à chacune des molécules d'actine G

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Chaque filament d'actine a une longueur d'environ **1 μm** .
- Les bases des filaments d'actine sont solidement insérées dans les disques Z tandis que les autres extrémités pénètrent de part et d'autre dans les sarcomères adjacents et se placent entre les molécules de myosine

La myofibrille



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **la tropomyosine**

- Filaments lâchement reliés aux brins d'actine F.
- A l'état de repos, les molécules de tropomyosine reposent sur les sites actifs des brins d'actine et de myosine empêchant ainsi l'attraction entre les filaments d'actine et de myosine et par conséquent la contraction.

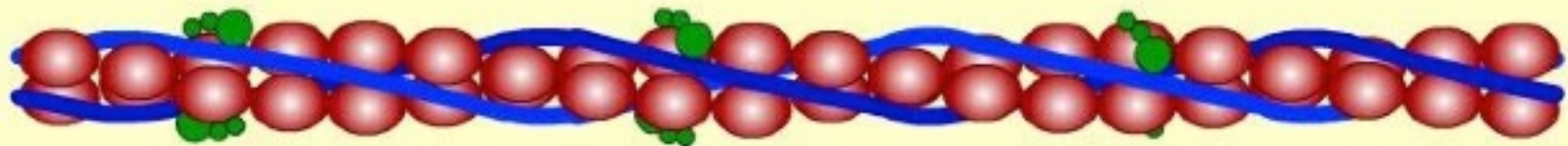
La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **la troponine**

- complexe de 3 sous unités protéiques lâchement reliées entre elles
- troponine I : une forte affinité pour l'actine
- troponine T pour la tropomyosine
- troponine C pour les ions calcium.
- rattache la tropomyosine à l'actine

Les filaments fins



Actine G



Tropomyosine



Troponine

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– Le sarcoplasme

- Les myofibrilles sont en suspension dans une matrice appelée sarcoplasme
- se compose des constituants intracellulaires habituels.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

–Le sarcoplasme

- Le liquide du sarcoplasme contient d'énormes quantités de **potassium, magnésium, phosphate** et d'**enzymes protéiques**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

–Le sarcoplasme

- On y trouve également un nombre énorme de **mitochondries** qui sont disposées parallèlement aux myofibrilles,
- des inclusions de **glycogène** et de **lipides** traduisant l'activité métabolique intense de la fibre.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– Le système transverse des tubules T

- invaginations de la membrane cellulaire de la fibre musculaire.
- Ces **tubules** communiquent directement avec l'espace extracellulaire et sont séparés du réticulum sarcoplasmique et du sarcoplasme.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

–Le système transverse des tubules T

- Les **tubules transverses** sont très petits et traversent les myofibrilles.
- Ils s'embranchent entre eux de part et d'autre de la fibre.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– Le réticulum sarcoplasmique

- La membrane du réticulum présente de très nombreux canaux calciques qui assurent le passage du Ca^{++} depuis le réticulum jusqu'au cytoplasme.

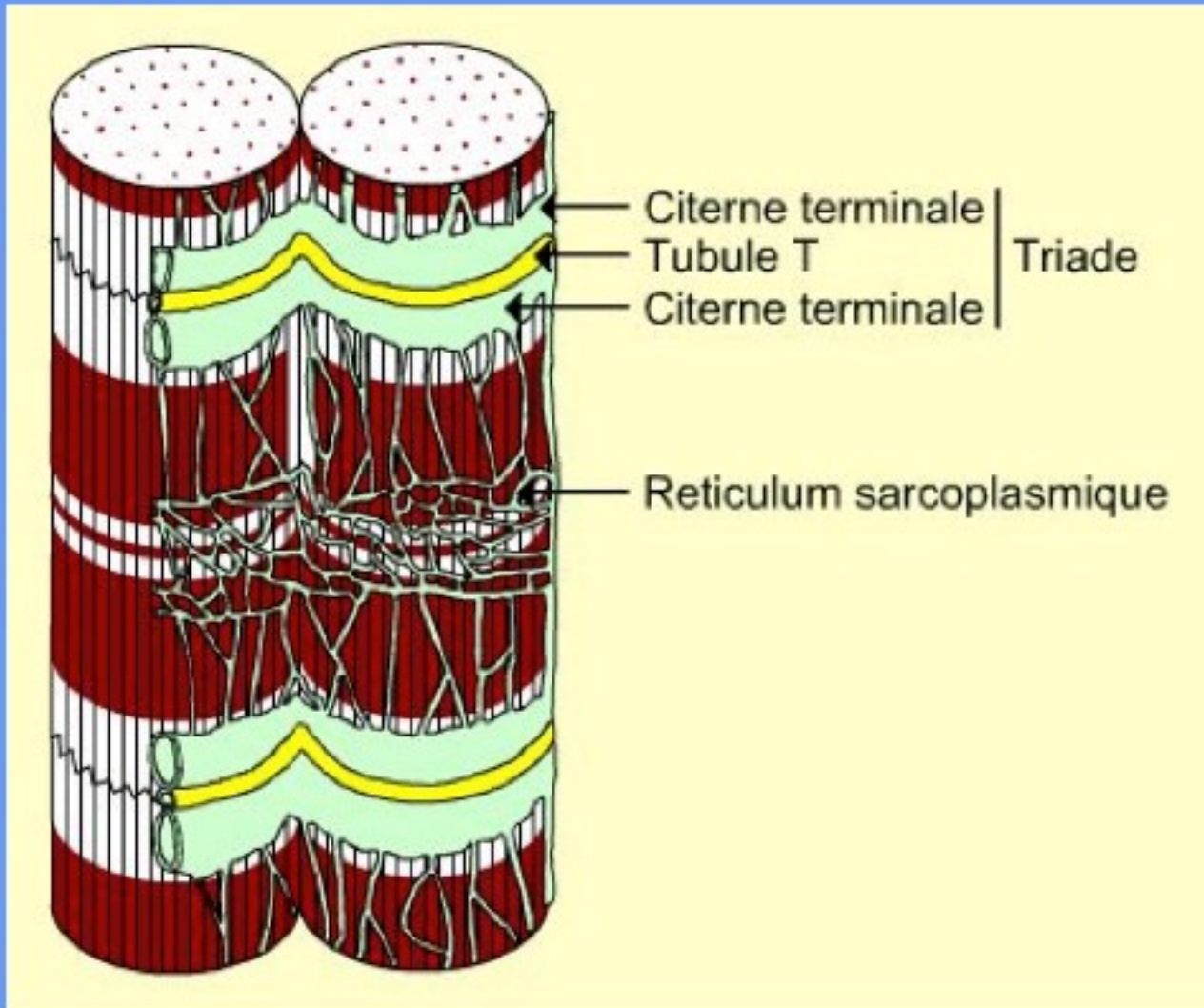
La contraction musculaire

Le muscle squelettique

–Le réticulum sarcoplasmique

- Constitué de 2 parties essentielles :
des **tubules longitudinaux** allongés parallèles aux myofibrilles se terminant par les **citernes terminales**, qui s'appuient contre les tubules transverses.

Le réticulum sarcoplasmique et le système des tubules T



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **LA CONTRACTION MUSCULAIRE**
 - **Mécanisme général de la contraction musculaire**
 - Propagation du **potentiel d'action** le long du nerf moteur vers les terminaisons des fibres nerveuses

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– Mécanisme général de la contraction musculaire

- Libération d'une petite quantité d'**acétylcholine** au niveau de la **plaque motrice**
- Ouverture de **canaux sodiques** de la membrane plasmique par l'**acétylcholine**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Entrée d'ions Na^+** dans la fibre musculaire → **PA**
- **Le PA** se déplace le long de la membrane de la fibre musculaire
- Il dépolarise la membrane et pénètre également profondément dans la fibre musculaire au moyen du système T, entraînant la libération par le réticulum sarcoplasmique d'une quantité importante de **calcium**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Les ions calcium engendrent des forces d'attraction entre les filaments d'actine et de myosine qui sont à l'origine d'un **glissement entre ces filaments**; c'est le processus de la contraction.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Au bout d'une fraction de secondes, les ions calcium sont réaspirés dans le réticulum endoplasmique où ils restent stockés jusqu'à l'arrivée d'un nouveau potentiel d'action; la contraction musculaire s'arrête.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

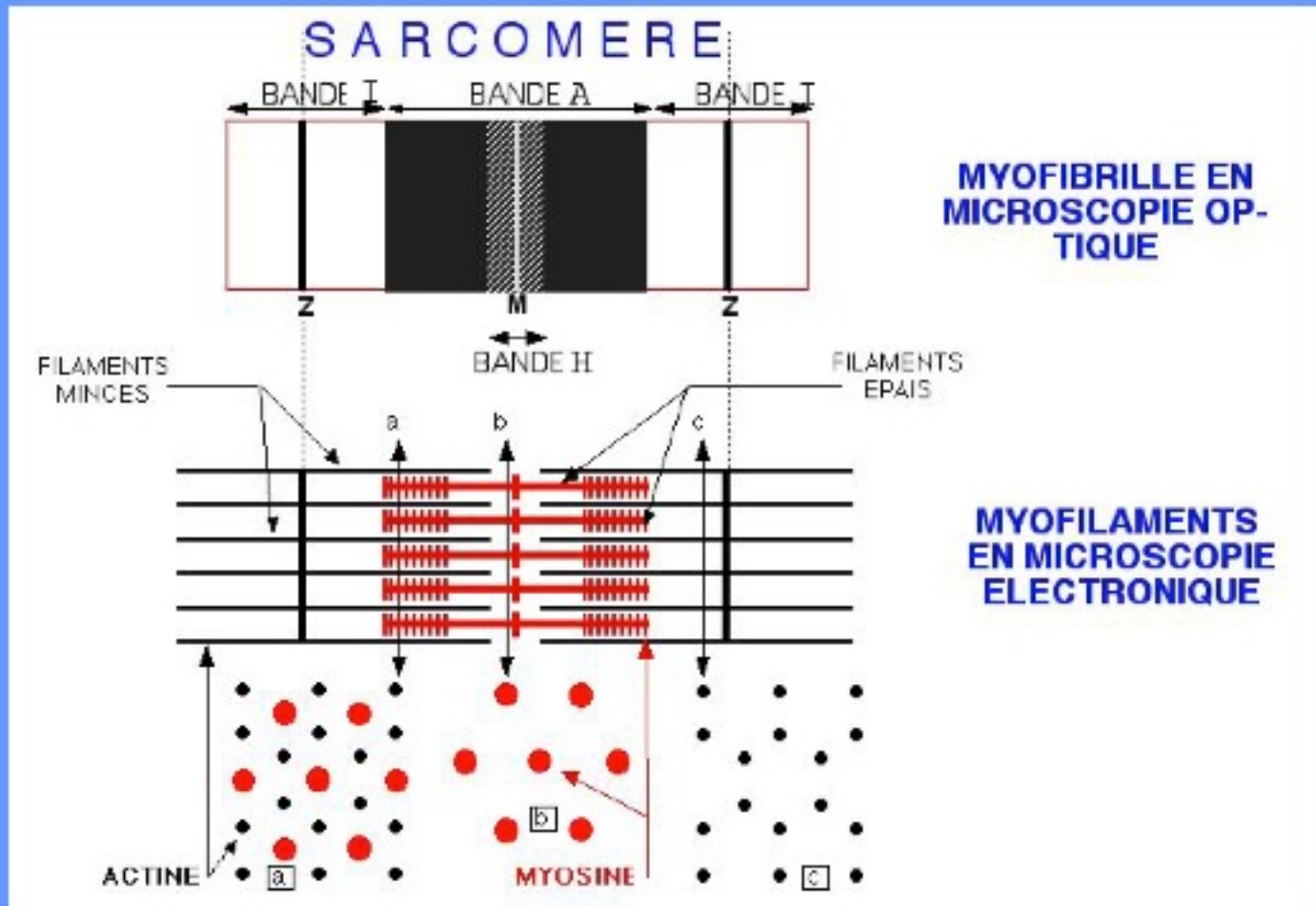
- **Mécanisme moléculaire de la contraction musculaire**
 - Au repos
 - **Les sarcomères** limités par 2 stries successives **Z**.
 - **les bandes I isotopiques** correspondent à la partie des filaments fins d'**actine** qui ne recouvrent pas les filaments épais de myosine
 - les **bandes A** correspondent aux filaments de **myosine**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **la zone H** correspond à la partie des filaments de myosine non recouverts par les filaments d'actine.
- Au niveau de la zone de recouvrement des filaments fins et des filaments épais, on observe des **ponts transversaux**

La myofibrille



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Mécanisme de glissement des fibres lors de la contraction
 - Interaction entre les filaments entre la myosine, les filaments d'actine et les ions calcium pour provoquer la contraction

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Un **filament d'actine isolé** en l'absence du complexe troponine-tropomyosine se lie fortement aux molécules de **myosine** en présence d'ions magnésium et d'ATP.

La contraction musculaire

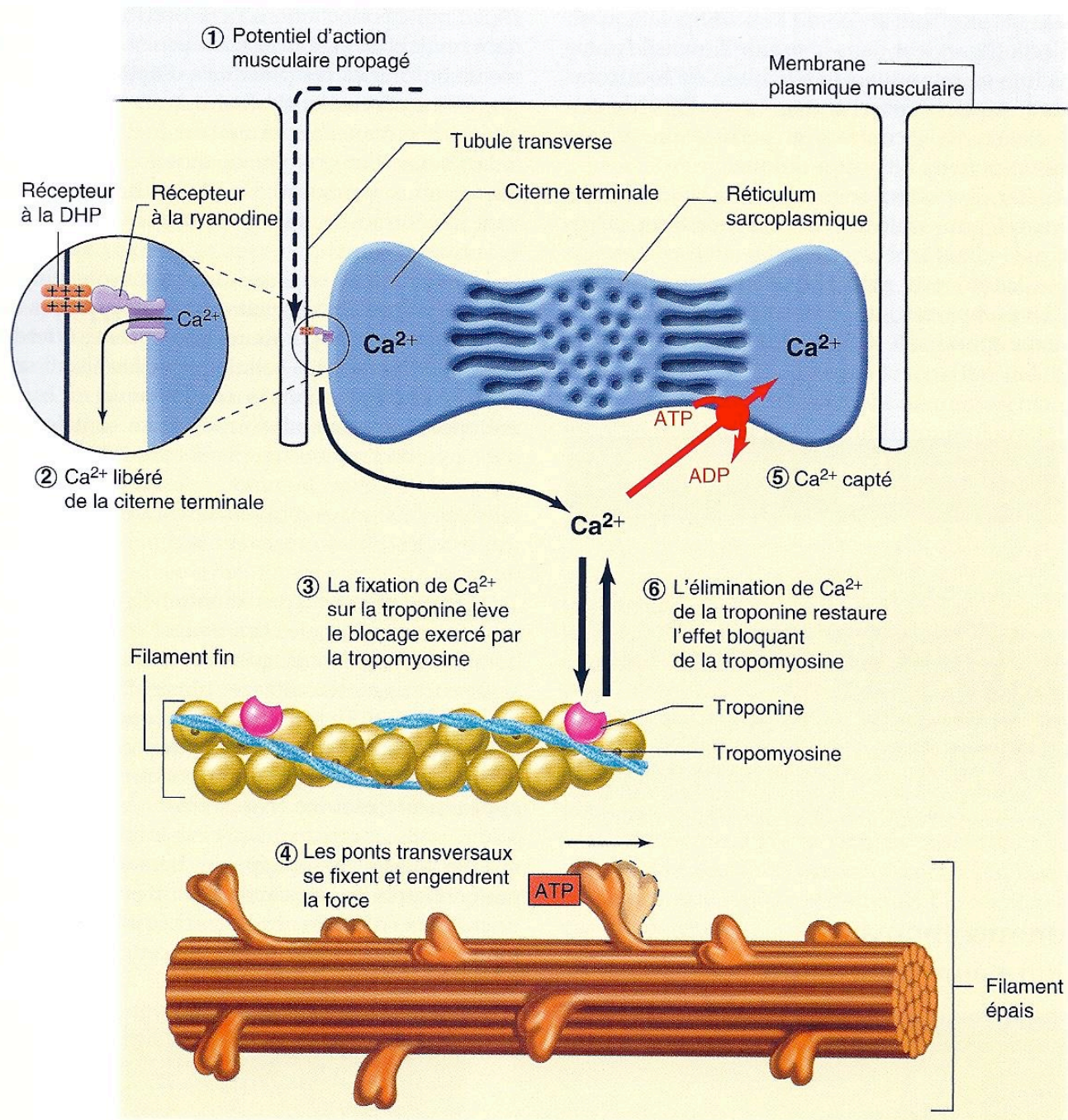
Le muscle squelettique

- » En revanche, si on rajoute le **complexe troponine-tropomyosine au filament d'actine**, cette liaison ne se produit pas.
- » Les sites actifs des filaments d'actine sont normalement inhibés par les couples troponine-tropomyosine. Pour que la contraction puisse avoir lieu, il faut que l'activité de ce complexe soit inhibée.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» En présence de **calcium**,
l'effet inhibiteur du
complexe troponine-
tropomyosine est inhibé.



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Formation de ponts de liaison en présence de calcium :
 - » formation de molécules **d'actomyosine** →
 - » hydrolyse d'une molécule **d'ATP** → ADP+Pi
 - » → glissement des filaments d'actine

La contraction musculaire

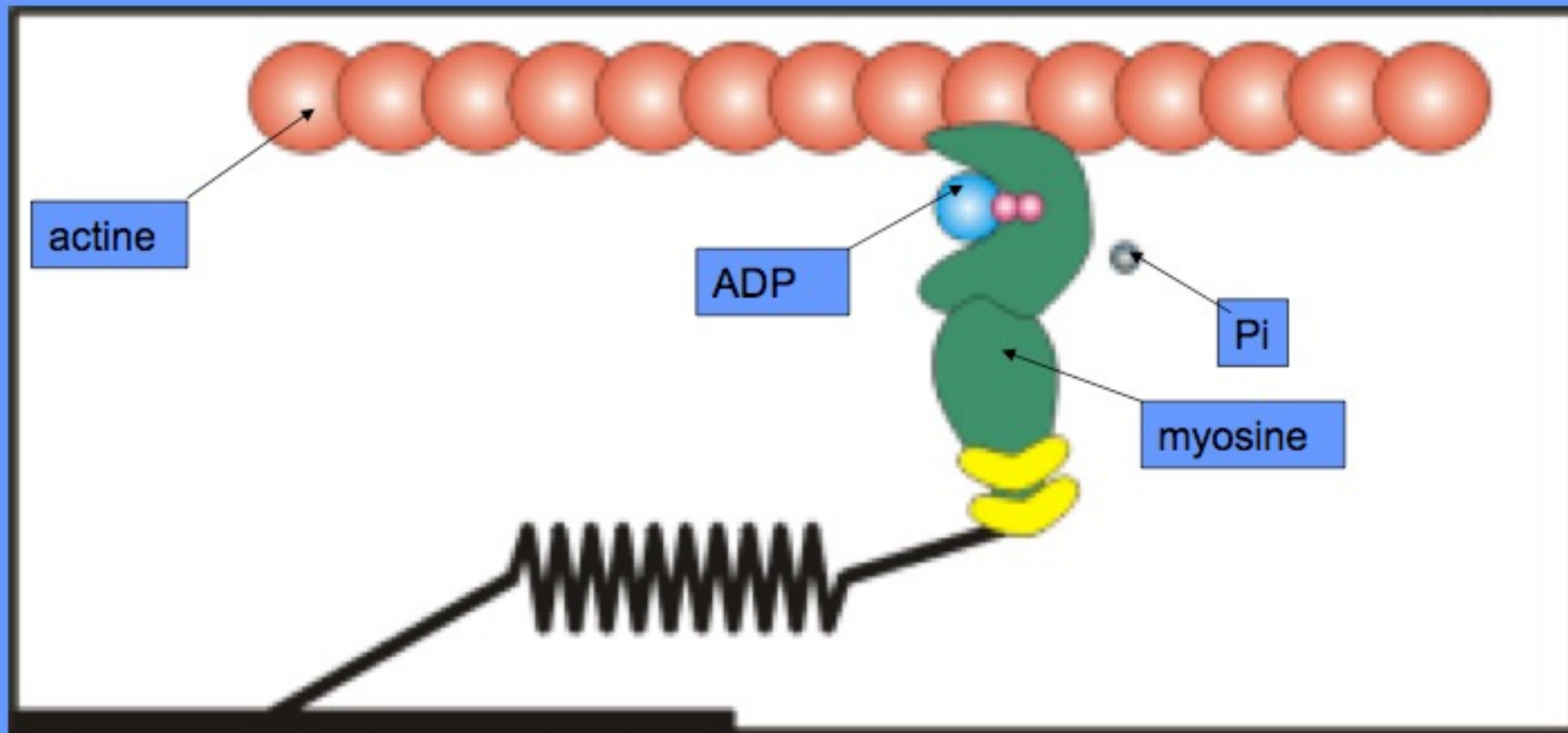
Le muscle squelettique

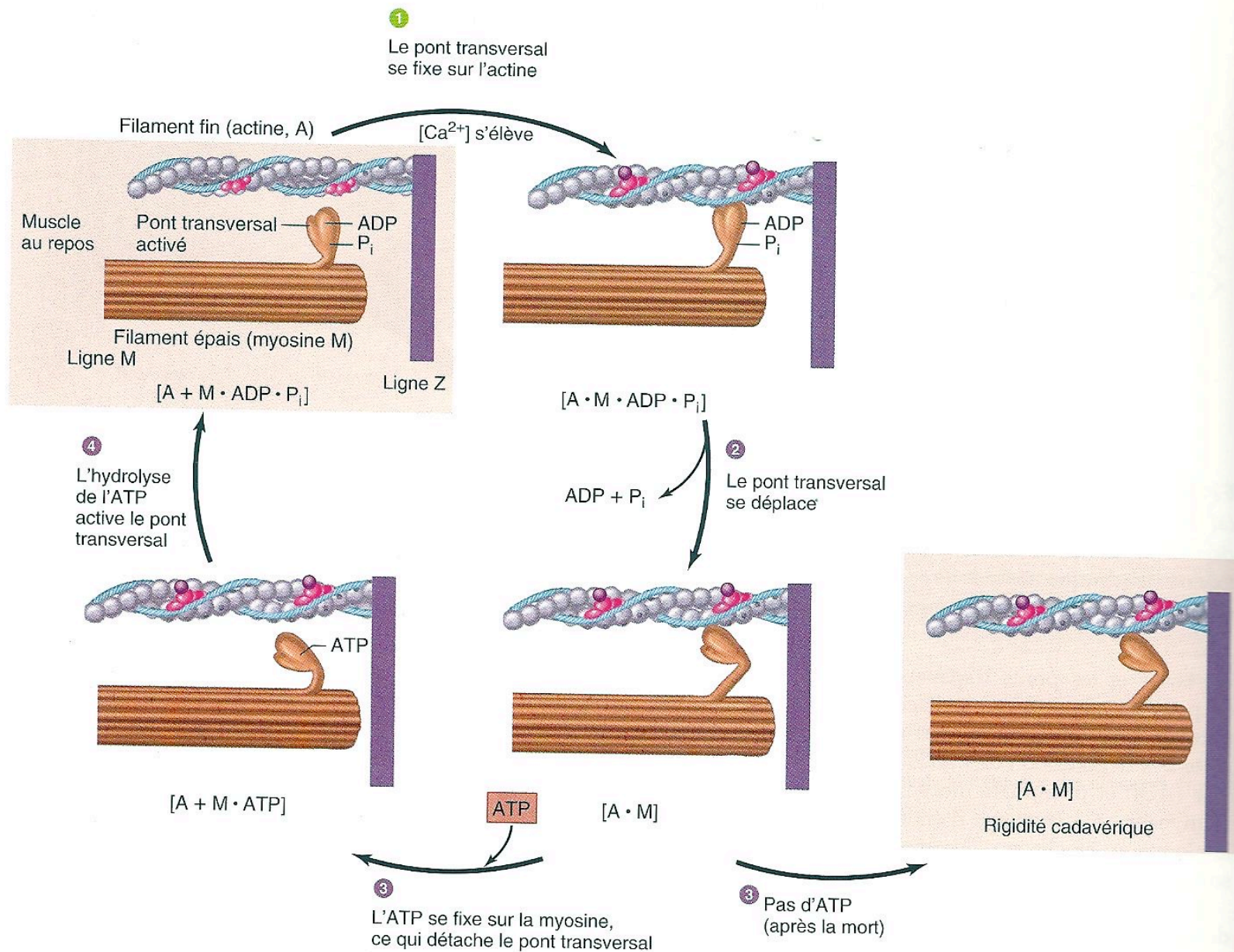
- » → fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur le site libéré par l'ADP
- » En présence d'ATP, la tête de myosine se détache de l'actine et retourne à sa position initiale

Fonctions de l'ATP dans la contraction du muscle squelettique

1. L'hydrolyse de l'ATP par la myosine active les ponts transversaux, ce qui procure l'énergie pour le développement de la force.
2. La fixation de l'ATP sur la myosine dissocie les ponts transversaux liés à l'actine, les ponts pouvant alors répéter leur cycle d'activité.
3. L'hydrolyse de l'ATP par la Ca^{2+} -ATPase du réticulum sarcoplasmique fournit l'énergie pour le transport actif des ions calcium dans le réticulum, ce qui abaisse le calcium cytosolique à ses valeurs précédant sa libération, achevant ainsi la contraction et permettant la relaxation de la fibre musculaire.

Formation des ponts de liaison





Représentations chimique (entre crochets) et mécanique des quatre étapes d'un cycle de pont transversal. Dans une fibre musculaire au repos, la contraction commence quand le calcium active le filament fin.

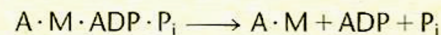
Séquence des événements entre un potentiel d'action d'un neurone moteur et la contraction de la fibre du muscle squelettique

1. Le potentiel d'action est initié et se propage vers les terminaisons axoniques du neurone moteur.
2. Le calcium pénètre dans les terminaisons axoniques par des canaux calciques potentiel-dépendants.
3. L'entrée de calcium déclenche la libération d'ACh par les terminaisons axoniques.
4. L'ACh diffuse des terminaisons axoniques vers la plaque motrice de la fibre musculaire.
5. L'ACh se fixe sur les récepteurs nicotiniques de la plaque motrice, augmentant leur perméabilité à Na^+ et K^+ .
6. L'entrée de Na^+ dans la fibre au niveau de la plaque motrice dépasse la sortie de K^+ , ce qui dépolarise la membrane et engendre le potentiel de plaque motrice (PPM).
7. Des courants locaux dépolarisent la membrane plasmique de la cellule musculaire adjacente jusqu'à son potentiel seuil, ce qui engendre un potentiel d'action qui se propage à la surface de la fibre musculaire et dans la fibre, le long des tubules T.
8. Le potentiel d'action des tubules T déclenche la libération de Ca^{2+} par les citernes terminales du réticulum sarcoplasmique.
9. Le Ca^{2+} se fixe sur la troponine des filaments fins, ce qui déplace la tropomyosine de sa position de blocage, découvrant ainsi les sites de fixation des ponts transversaux sur l'actine.

10. Les ponts transversaux activés de la myosine des filaments épais se fixent sur l'actine :



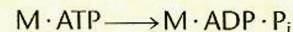
11. La fixation des ponts transversaux déclenche la libération des produits d'hydrolyse de l'ATP à partir de la myosine, induisant un mouvement angulaire de chaque pont transversal :



12. L'ATP se fixe sur la myosine, ce qui rompt le lien entre l'actine et la myosine et permet donc la dissociation des ponts transversaux de l'actine :



13. L'ATP liée à la myosine est dégradée, ce qui active le pont transversal de la myosine :



14. Les ponts transversaux répètent les étapes 10 à 13, induisant des mouvements (glissement) des filaments fins le long des filaments épais. Les cycles des ponts transversaux se répètent tant que le Ca^{2+} reste lié à la troponine.
15. La concentration cytosolique de Ca^{2+} diminue avec le transport actif de cet ion dans le réticulum sarcoplasmique par une Ca^{2+} -ATPase.
16. L'élimination du Ca^{2+} de la troponine restaure l'effet bloquant de la tropomyosine, le cycle du pont transversal s'interrompt et la fibre musculaire se relâche.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Aspects énergétiques de la contraction musculaire
 - Travail mis en jeu pendant la contraction musculaire
 - » Lorsqu'un muscle se contracte contre une charge, il fournit un travail.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» $W = L * D$

W étant le travail fourni, L étant la charge et D le déplacement effectué lors de la contraction contre la charge.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» L'énergie nécessaire pour fournir le travail provient de réactions chimiques qui ont lieu dans les cellules musculaires pendant la contraction.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Sources d'énergie de la contraction musculaire

3 sources :

La voie du phosphagène

Le glycogène et la glycolyse anaérobie

Le métabolisme oxydatif à partir de substances nutritives

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» **La voie du phosphagène :**
l'énergie fournie par l'adénosine
triphosphate ou ATP.

ATP $\leftrightarrow$ ADP+Pi puis ADP $\leftrightarrow$ AMP+Pi

- **durée: 1 à 2 secondes**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **rephosphorylation de l'ADP**

- * **la phosphocréatine (PC)**

PC+ADP <--> ATP + créatine

- *durée: **7 à 8 secondes**

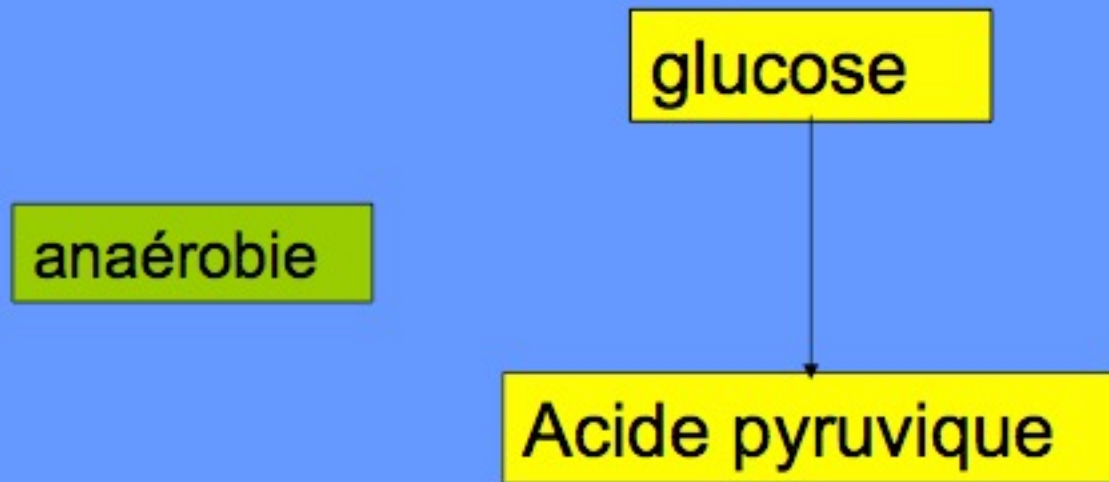
La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » Le **glycogène** stocké dans les cellules musculaires: la **glycolyse**

Glycogène → glucose

La glycolyse



Voie du glycogène

la glycolyse anaérobie

- environ 2 fois et demie plus rapide que lorsque l'ATP est formé à partir de composantes nutritives de la cellule qui nécessitent la présence d'oxygène,
- mais 2 fois moins rapides que la voie du phosphagène.
- Assure une contraction musculaire maximale que pendant environ **une minute à une minute et demie.**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» **Le métabolisme oxydatif** à partir de substances nutritives :

le glucose surtout,
les acides aminés
et les acides gras

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- le glucose

La dégradation du glucose en CO_2 et H_2O passe par le **pyruvate** puis le **cycle de Krebs** dans les mitochondries.

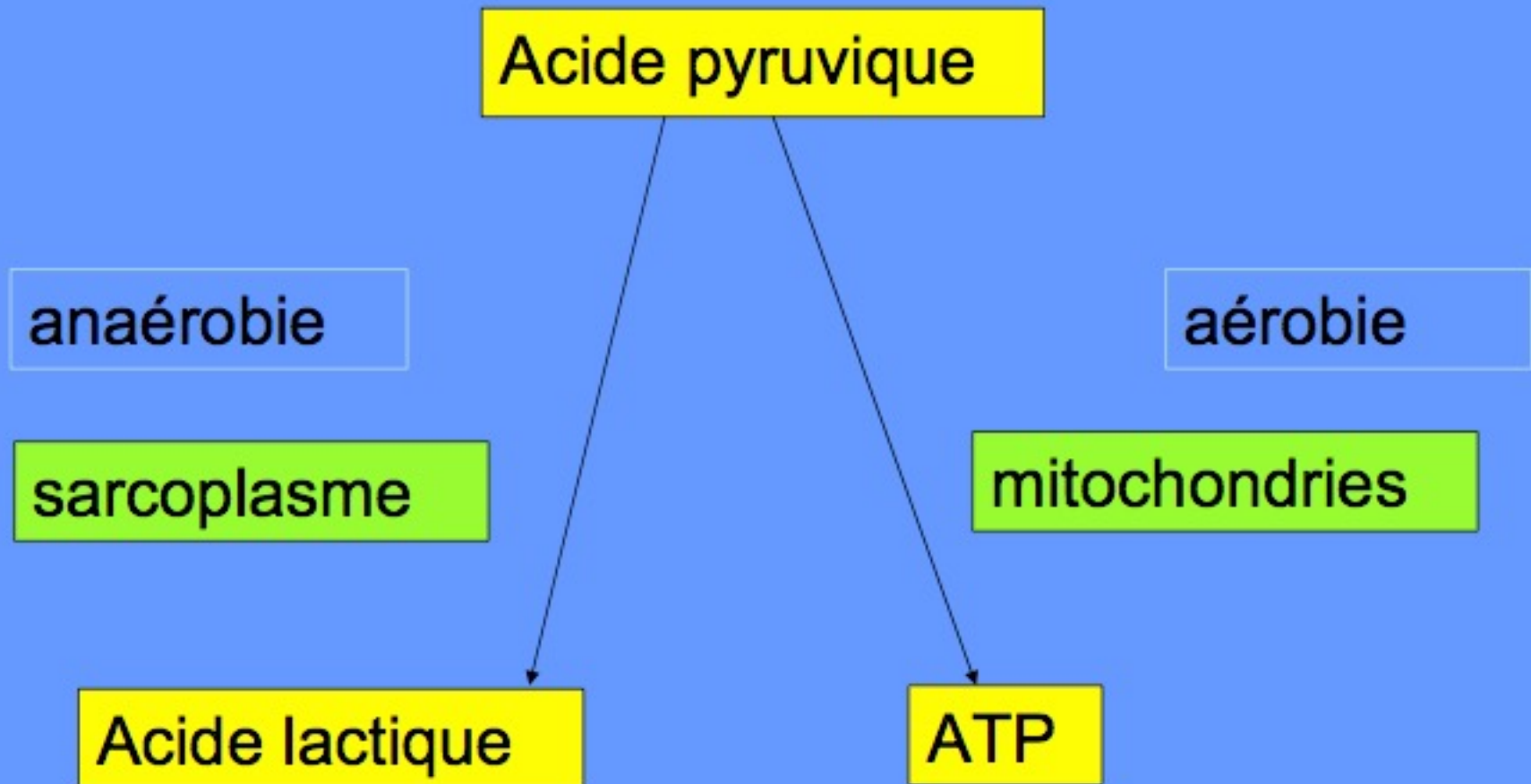
La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- les acides gras

Par le métabolisme oxydatif, les acides gras libérés des triglycérides sont dégradés en CO_2 et H_2O .

La glycolyse



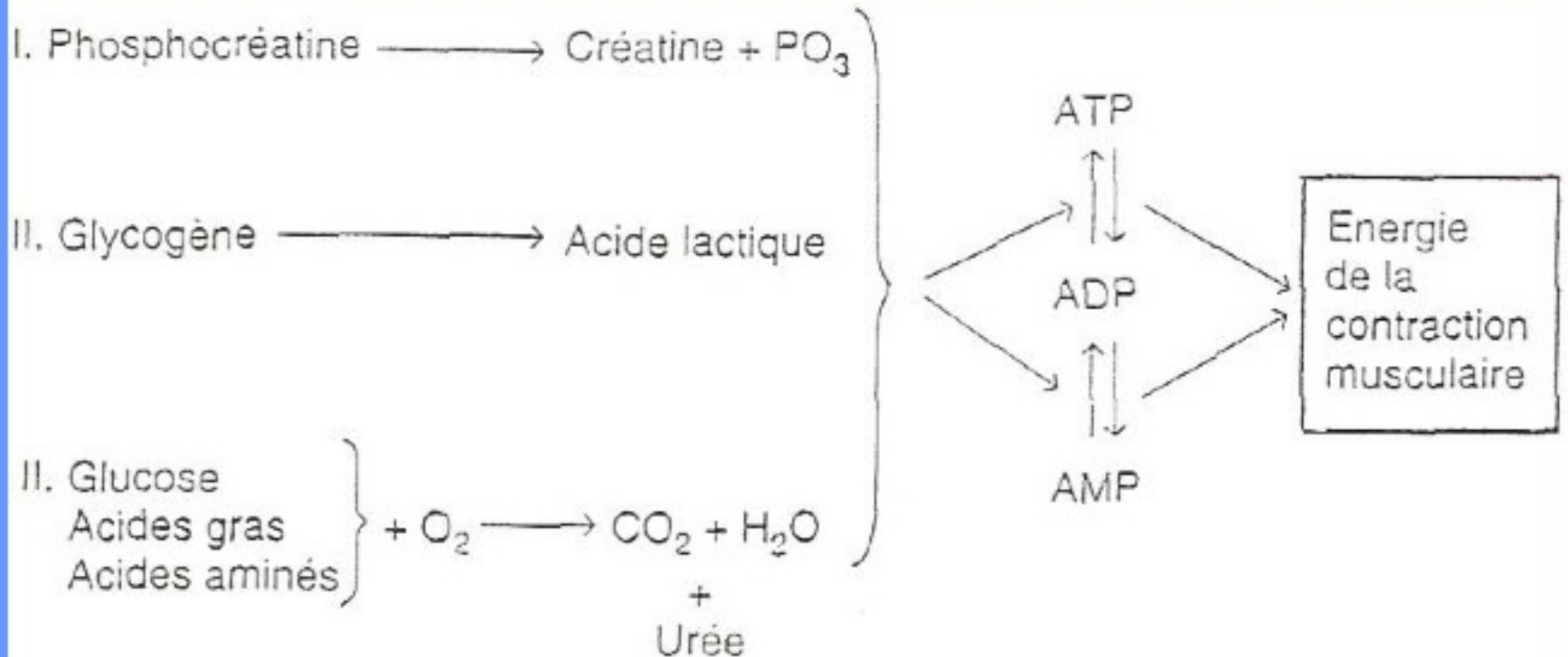
La contraction musculaire

Le muscle squelettique

-Le métabolisme oxydatif permet un exercice musculaire illimité tant que les substrats sont présents

La contraction musculaire

Le muscle squelettique



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Utilisation des différentes sources d'énergie
 - » Énergie utilisée

Au début d'un travail musculaire, les réserves d'**ATP** s'épuisent en **quelques secondes**,

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

et peu après, celles de **créatine phosphate**.

la **glycolyse anaérobie** atteint son maximum après environ **45 secondes**,

le **métabolisme aérobie** met environ **2 minutes** pour s'installer pleinement.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Substrats énergétiques

Les **hydrates de carbone** dans les premières minutes de l'exercice provenant du glycogène musculaire et du glycogène hépatique

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

Les **acides gras** et l'**acide acétoacétique** provenant des triglycérides ensuite.

Les **acides aminés** peuvent être utilisés mais dans une moindre proportion.

Tableau SOURCES D'ENERGIE UTILISEES DANS
DIFFERENTS ACTIVITES SPORTIVES

Voie du phosphagène, quasi exclusivement

100 m
saut
haltérophilie
plongeon
sprint au football (américain)

Phosphagène et système glycogène-acide lactique

200 m
basketball
sprint en hockey sur glace

Glycogène-acide lactique, de façon prépondérante

400 m
100 m natation
tennis
football

Glycogène-acide lactique et voie aérobie

800 m
200 m natation
boxe
2000 m aviron
1500 m course
400 m natation

Voie aérobie

10 000 m patinage
ski de fond
marathon (42.2 km)
jogging

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Reconstitution des réserves énergétiques après l'exercice**

- » la phosphocréatine sert à reconstituer l'adénosine triphosphate



- » la voie de la glycolyse anaérobie peut servir à reconstituer la phosphocréatine et l'ATP,

La contraction musculaire

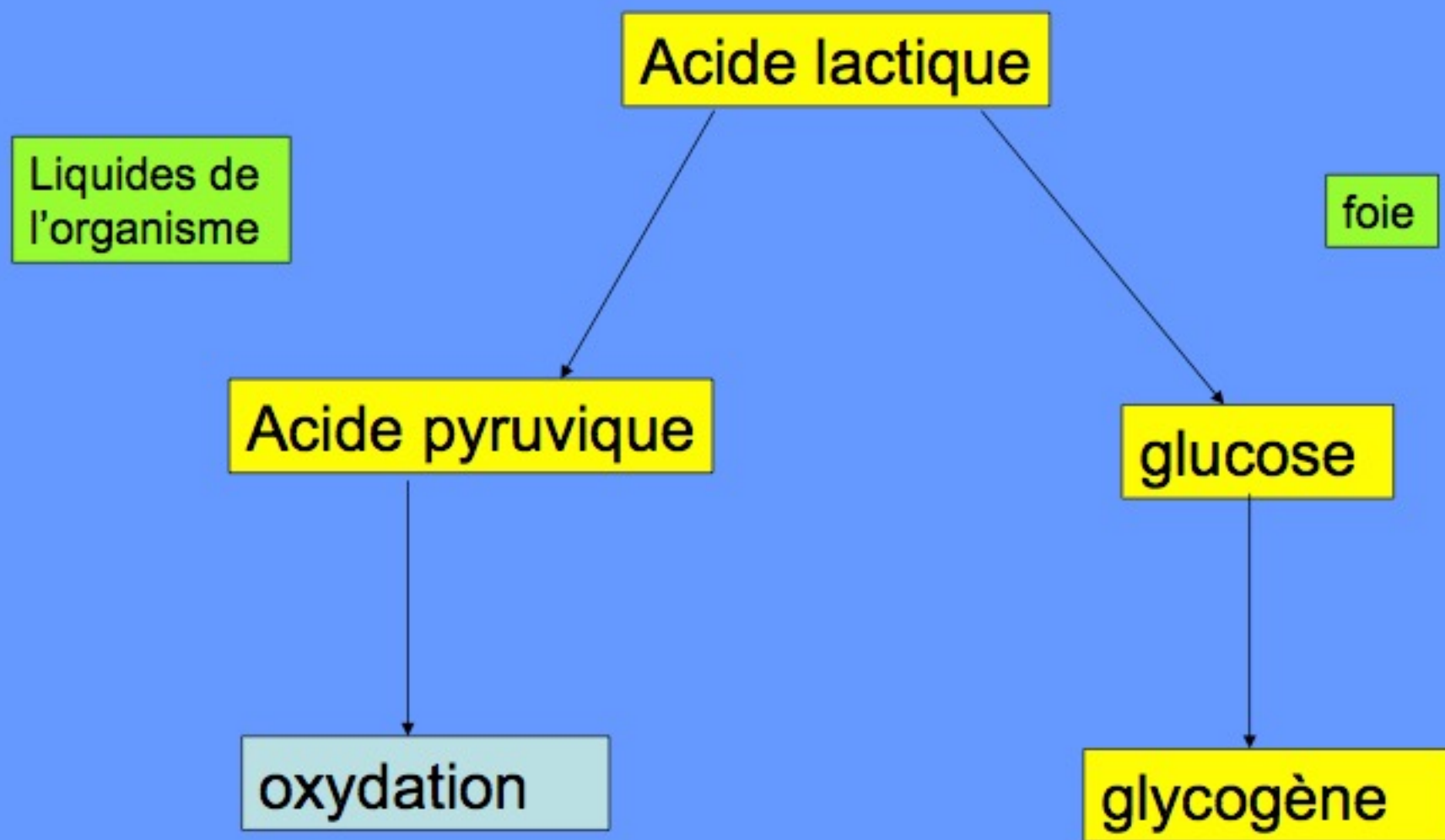
Le muscle squelettique

»le métabolisme oxydatif de la voie aérobie fournit l'énergie pour reconstituer les autres voies.

»Pour la voie de la glycolyse anaérobie,

la récupération = élimination de l'acide lactique

Élimination de l'acide lactique



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Récupération de la voie aérobie après l'exercice

Au début des exercices intenses, une partie de l'aptitude aérobie est amputée du fait de 2 phénomènes : **la dette d'oxygène et la diminution des réserves musculaires de glycogène.**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

2 litres de réserve d'oxygène =

0.5 l dans le gaz pulmonaire +

0.25 l dissous dans les liquides de
l'organisme +

1 l combiné à l'hémoglobine sanguine +

0.3 l stocké dans les fibres musculaires
elles-mêmes combiné à la myoglobine par
une liaison analogue à celle de l'oxygène à
l'hémoglobine.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

Récupération de la dette
d'oxygène après un exercice
intense,

*Au début de l'exercice, la quasi-
totalité de la réserve d'oxygène
est utilisée en environ **une
minute***

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

Après la fin de l'exercice, il faut reconstituer

- la réserve d'oxygène (2litres) par une **ventilation supérieure** aux seuls besoins métaboliques immédiats.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Il faut en outre 9 litres d'oxygène supplémentaires pour assurer la **reconstitution du phosphagène et la dégradation de l'acide lactique.**

AU TOTAL 11 LITRES D'OXYGENE à rembourser après l'effort : **LA DETTE D'OXYGÈNE**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

Évolution de la consommation d'oxygène au cours de l'exercice

- Au début de l'exercice, augmentation rapide d'abord,
- plus lentement ensuite, mais de manière progressive

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Atteint une valeur d'équilibre après un délai variable avec l'intensité de l'exercice :
environ **1 minute** si celle-ci est légère,
5 à 10 minutes si elle est subliminale

Délai nécessaire pour que le système de prélèvement et de transport de l'oxygène, c'est-à-dire les fonctions respiratoire et circulatoire se soient adaptées et atteignent un niveau de fonctionnement compatible avec les besoins d'échanges gazeux.

La contraction musculaire

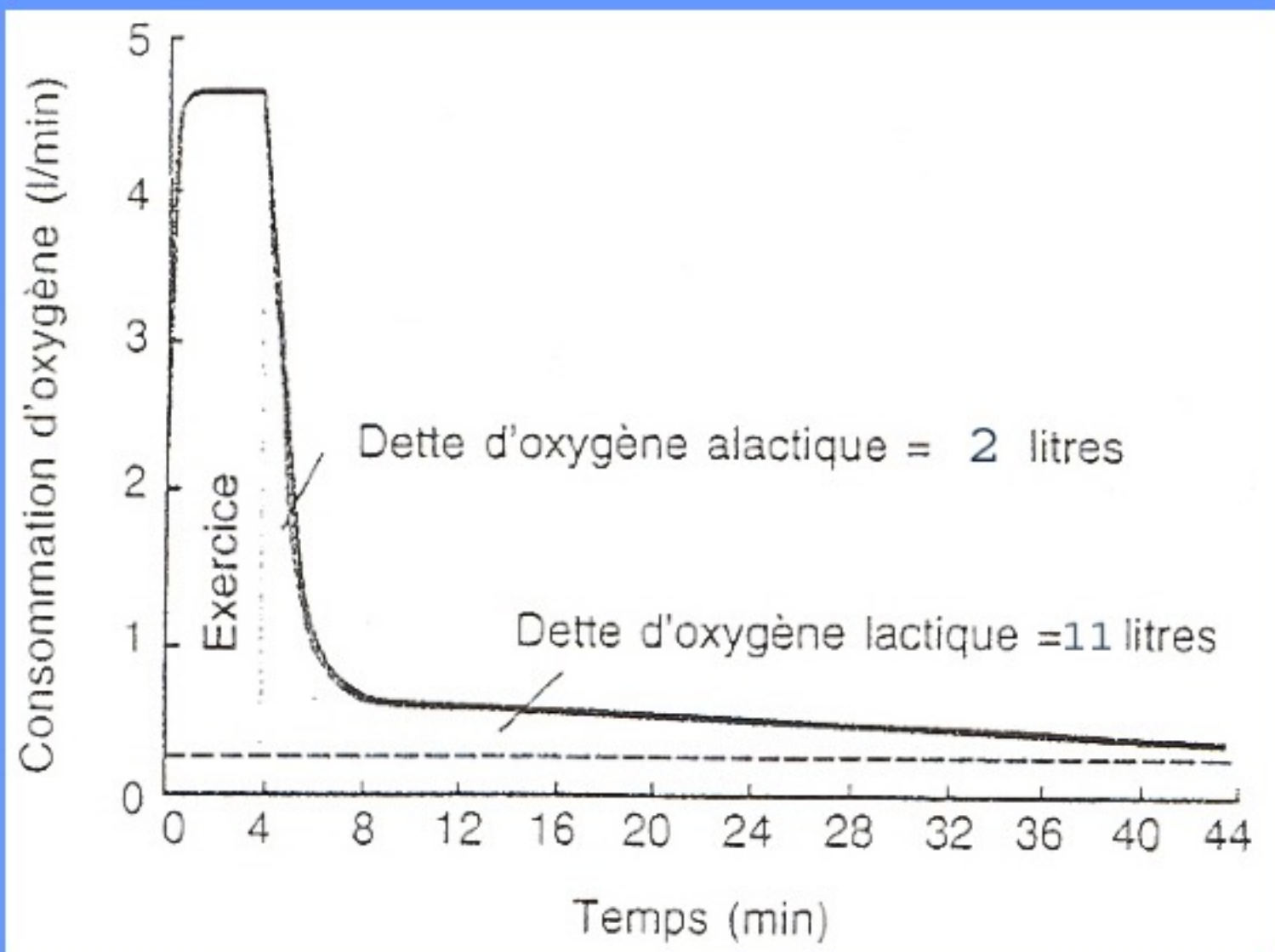
Le muscle squelettique

A l'arrêt de l'exercice, la consommation d'oxygène diminue également instantanément d'abord rapidement puis beaucoup plus lentement pour atteindre finalement sa valeur de repos dans un délai ou temps de récupération qui dépend aussi de l'intensité de l'exercice

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- dette **alactique** la première partie précoce de la dette d'oxygène correspondant à la reconstitution du phosphagène et aux réserves d'oxygène
- et la part finale, la dette **lactique** correspondant à l'élimination de l'acide lactique.

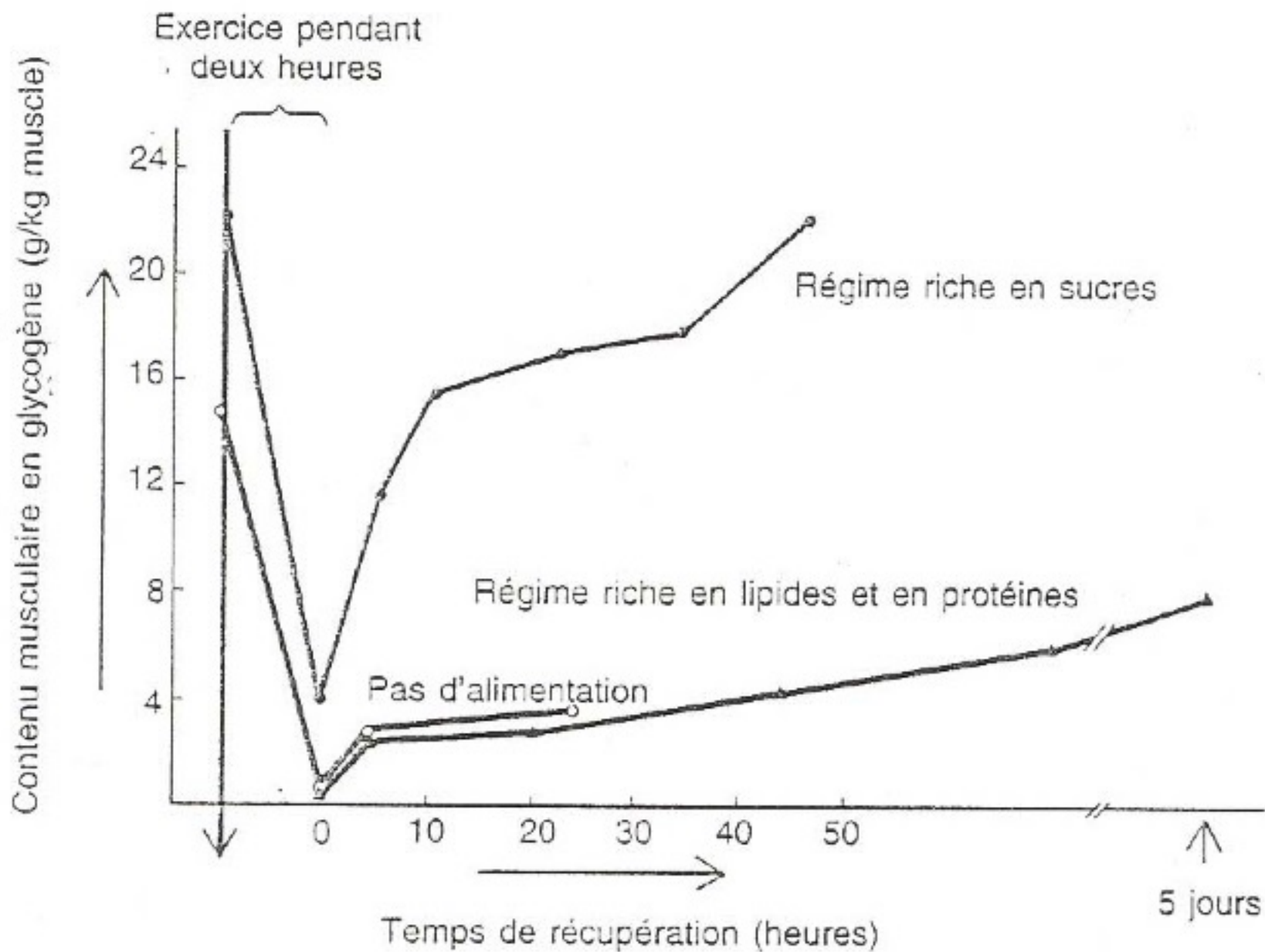


La contraction musculaire

Le muscle squelettique

Reconstitution du glycogène musculaire

- Elle nécessite souvent plusieurs jours.
- Elle sera d'autant plus rapide que l'alimentation est **riche en hydrates de carbone**. Il est donc important pour un athlète de recevoir une alimentation riche en sucres avant une épreuve éreintante et il ne faut pas effectuer d'exercice intense dans les 2 jours précédant une compétition.



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Efficacité de la contraction musculaire
 - » faible efficacité : **rendement 20-25%**, le reste transformé en chaleur
 - » efficacité **maximale** obtenue lorsque le muscle se contracte à une **rapidité modérée**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » Si le muscle se contracte très lentement ou sans aucun mouvement (**contraction isométrique**), des quantités importantes de chaleur d'entretien sont libérées pendant la contraction, ce qui diminue l'efficacité.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » D'autre part, si la contraction est trop rapide, des quantités importantes d'énergie sont utilisées à vaincre le frottement visqueux à l'intérieur du muscle lui-même et ceci diminue également l'efficacité de la contraction.
- » Habituellement, **l'efficacité est maximale lorsque la rapidité de contraction est à peu près à 30% de sa valeur maximale.**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Types de fibres musculaires : 2 types
 - **fibres à contraction lente (type 1) :**
 - » activité **ATPasique** faible
 - » **fibres fines**
 - » innervées par des **fibres nerveuses fines**
 - » **système vasculaire** étendu et nombreux capillaires qui assurent un apport supplémentaire en oxygène
 - » **mitochondries** nombreuses pour assurer un taux élevé de métabolisme oxydatif

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» quantités importantes de **myoglobine**

la myoglobine est une protéine qui, tout comme l'hémoglobine dans les hématies, contient du **fer**.

la myoglobine se combine avec l'oxygène, le stocke jusqu'à son utilisation et accélère le **transport de l'oxygène** vers les mitochondries

La myoglobine donne un aspect **rougeâtre** au muscle, qui pour cette raison, s'appelle muscle rouge, alors que l'absence de cet aspect rougeâtre dans les muscles rapides leur donne le nom de muscle blanc.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **fibres à contraction rapide (type 2) :**
 - » activité **ATPasique** intense
 - » **larges**, adaptées à une force de contraction importante,
 - » un **réticulum sarcoplasmique étendu** pour une libération rapide des ions calcium nécessaire au démarrage de la contraction

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » des quantités importantes **d'enzymes glycolytiques** pour une libération rapide d'énergie par le processus de glycolyse,
- » moins d'apport sanguin
- » moins de mitochondries parce que le mécanisme oxydatif est d'une importance secondaire

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **les fibres rapides** sont adaptées à des contractions musculaires très rapides et très puissantes comme pour le saut ou la course
- **les fibres lentes** sont adaptées à une activité musculaire prolongée comme le maintien d'une position contre les forces de gravité ou des performances athlétiques prolongées et continues comme le marathon.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Chaque muscle est composé d'un mélange de fibres musculaires lentes et rapides.
 - » Les muscles qui réagissent **très rapidement** se composent essentiellement de **fibres rapides** avec une faible proportion de fibres lentes.
 - » En revanche, les muscles qui réagissent **lentement** mais qui assurent une **contraction prolongée** se composent essentiellement de **fibres lentes**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– L'unité motrice

- » Ensemble des fibres musculaires innervées par une même fibre nerveuse
- » Les muscles qui réagissent rapidement et dont le contrôle doit être précis ont peu de fibres musculaires par unité motrice
- » les gros muscles qui ne nécessitent pas de contrôle très fin, par exemple les muscles contrôlant la posture, peuvent avoir plusieurs centaines de fibres musculaires par unité motrice.

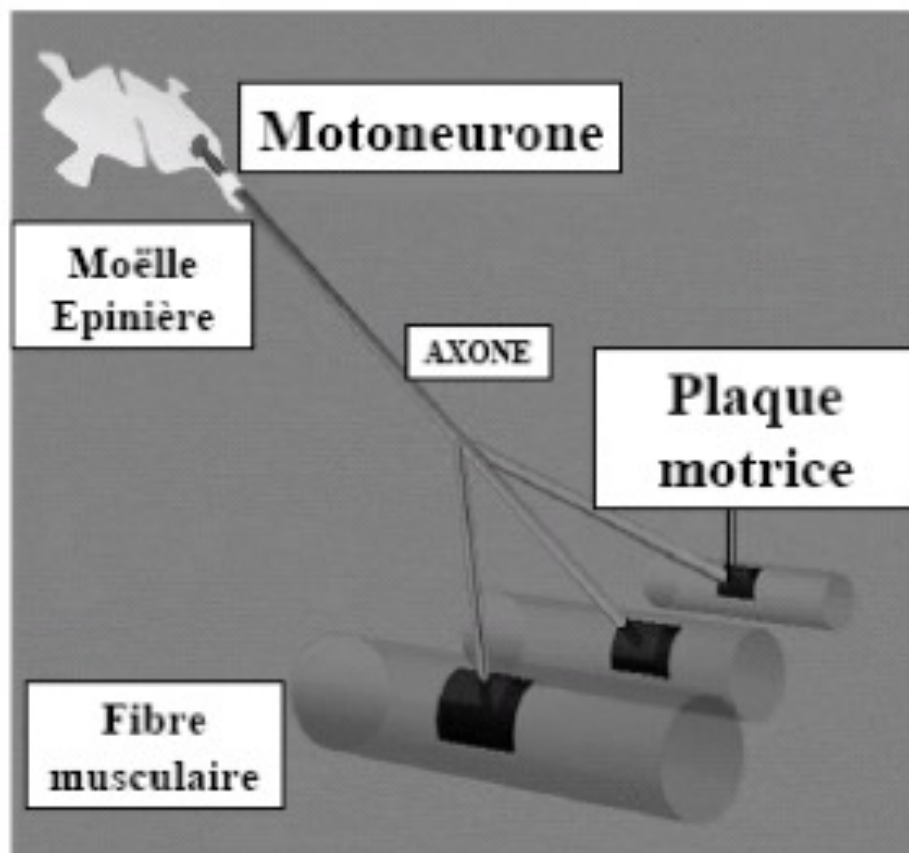
La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » La moyenne pour tous les muscles du corps est d'environ 100 fibres musculaires par unité motrice.
- » Au sein d'une même unité motrice, les fibres musculaires ne sont pas toutes regroupées mais sont répandues dans le muscle sous forme de microfaisceaux de 3 à 15 fibres.

Contraction du muscle squelettique

* Notion d'unité motrice



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

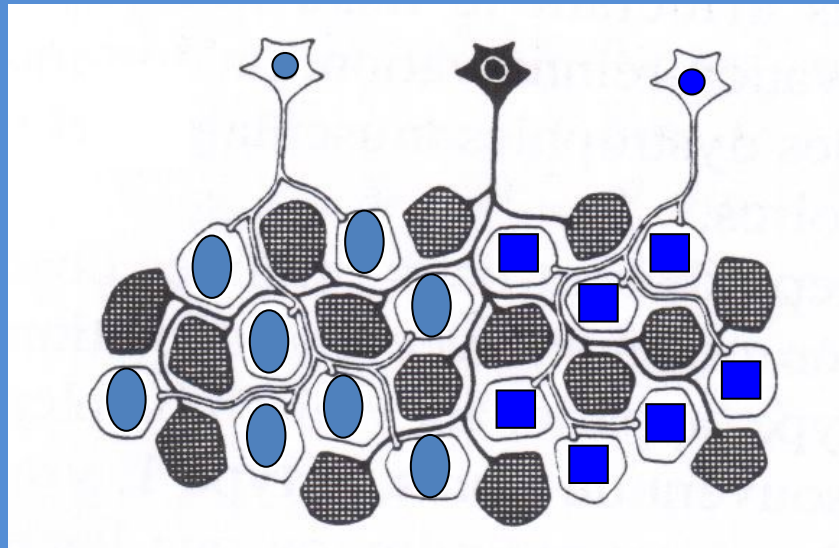
- » Dans **chaque unité motrice**, toutes les fibres sont du même type lent ou rapide.
- » Les muscles sont constitués par un mélange **d'unités motrices à fibres lentes et rapides**, la proportion variant d'un muscle à l'autre et pour chaque muscle d'un individu à l'autre.

Unité motrice :

Le plus petit élément contractile du système nerveux

Toutes les fibres musculaires appartenant à une même unité motrice sont dispersées dans le muscle

Motoneurone → PA → Contraction fibres musculaires → $\emptyset$ fibres musculaires →
contraction des capillaires sanguins → plus d'apport en O₂ et en glucose :
d'où dispersion spatiale des fibres



3 unités motrices

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Aspects mécaniques de la contraction du muscle squelettique
 - Contraction isométrique et isotonique
 - » *Contraction isométrique : longueur constante*
le muscle se contracte contre une force sans que sa longueur diminue
Ex : muscles qui maintiennent la posture, la contraction s'opposant alors à la gravité.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» *Contraction isotonique* : tension constante

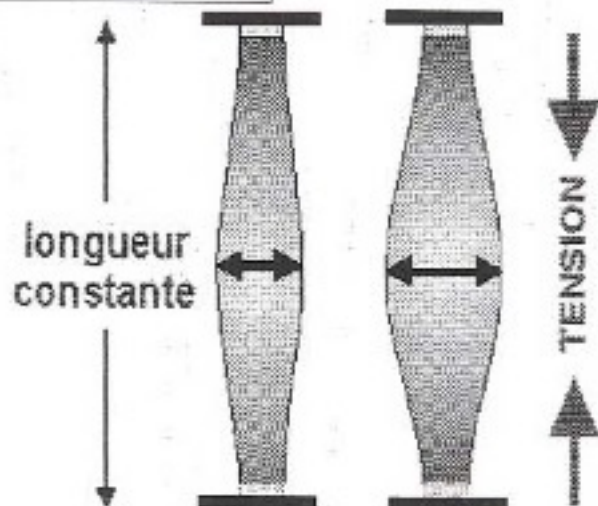
le muscle se raccourcit mais sa tension reste constante

ex : les muscles se contractent pour produire un mouvement : la distance entre les points osseux se réduit, la tension restant constante.

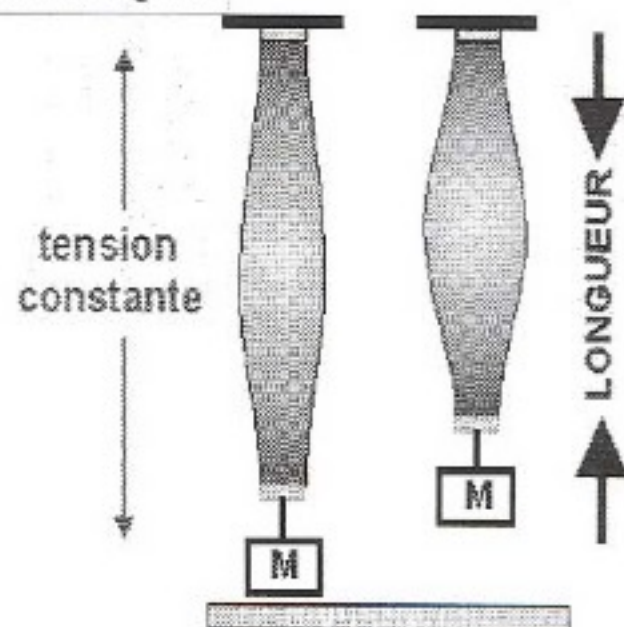
Contraction du muscle squelettique

* Types de contraction

ISOMETRIQUE



ISOTONIQUE



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Contraction musculaire de forces différentes - Sommation de forces
La sommation signifie l'addition de contractions musculaires isolées afin d'augmenter l'intensité de la contraction musculaire globale.

La contraction musculaire

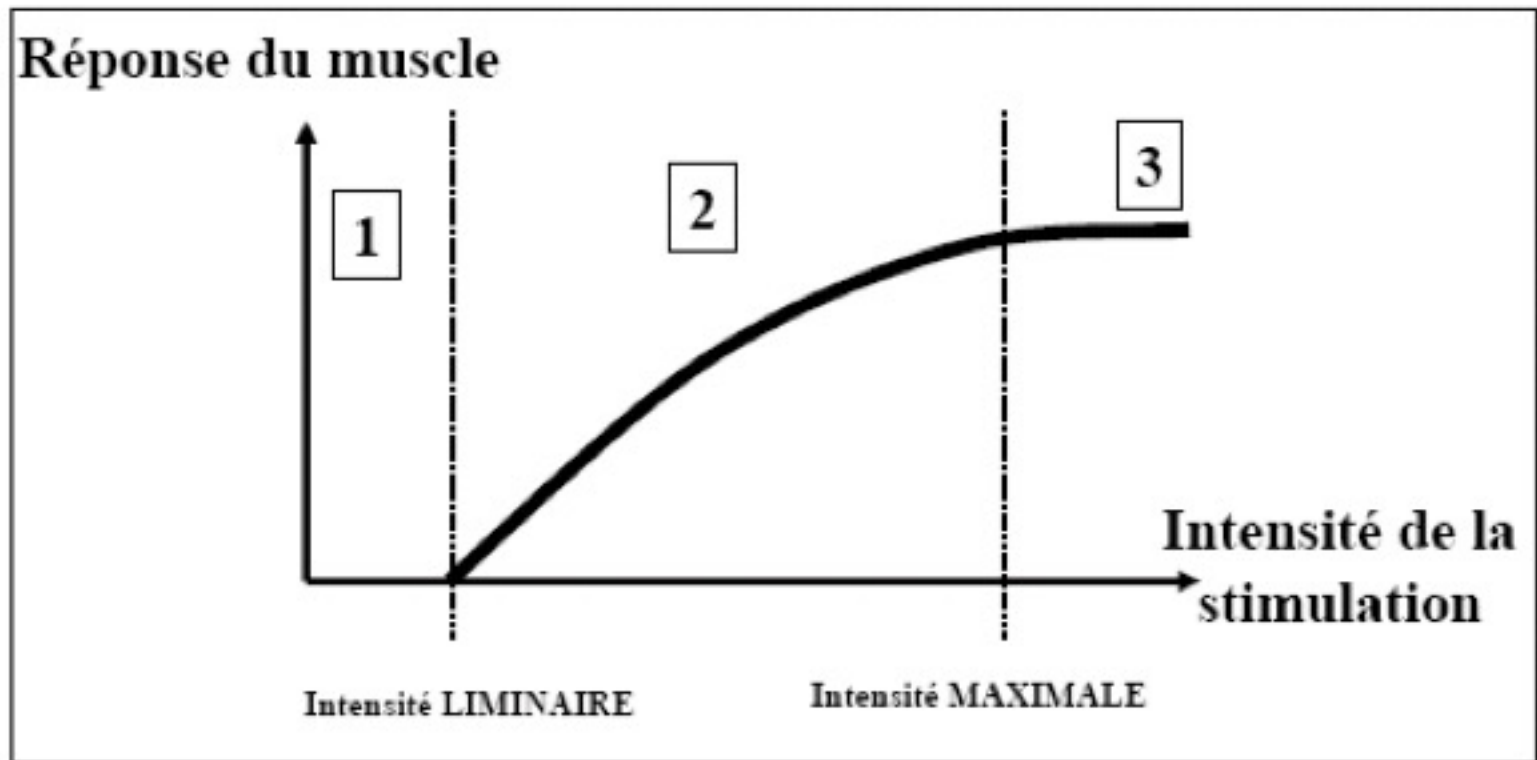
Le muscle squelettique

» *Sommation multiple ou spatiale:*

Recrutement des unités motrices
en fonction de l'intensité de la
stimulation

Contraction du muscle squelettique

* Sommation spatiale : **RECRUTEMENT**



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» *Sommation de fréquence et
tétanisation : sommation
temporelle*

- A **basse fréquence** de
stimulations : secousses
musculaires individuelles.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **augmentation de la fréquence** de stimulations, le muscle n'a pas le temps de se relâcher, chaque nouvelle contraction survient avant que la précédente soit terminée. La deuxième contraction est partiellement rajoutée à la première, de telle sorte que lorsque la fréquence augmente, la force de contraction augmente progressivement.

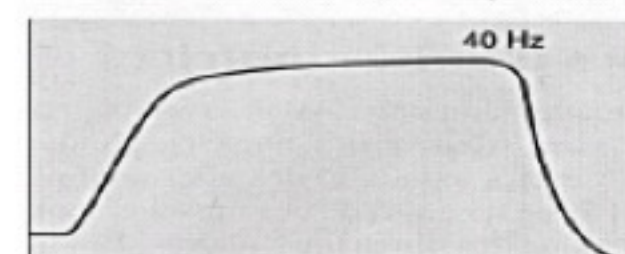
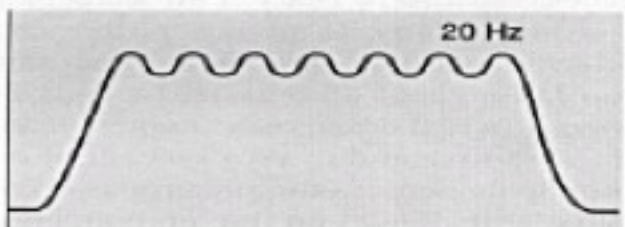
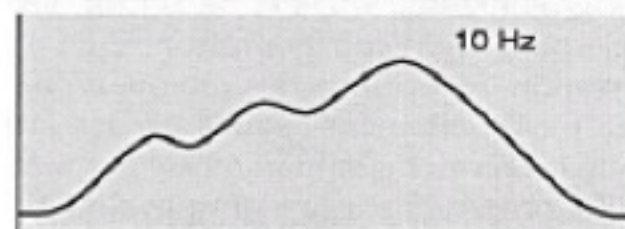
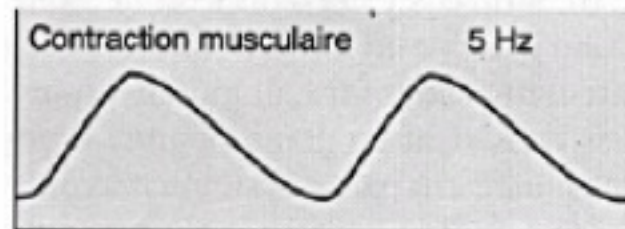
La contraction musculaire

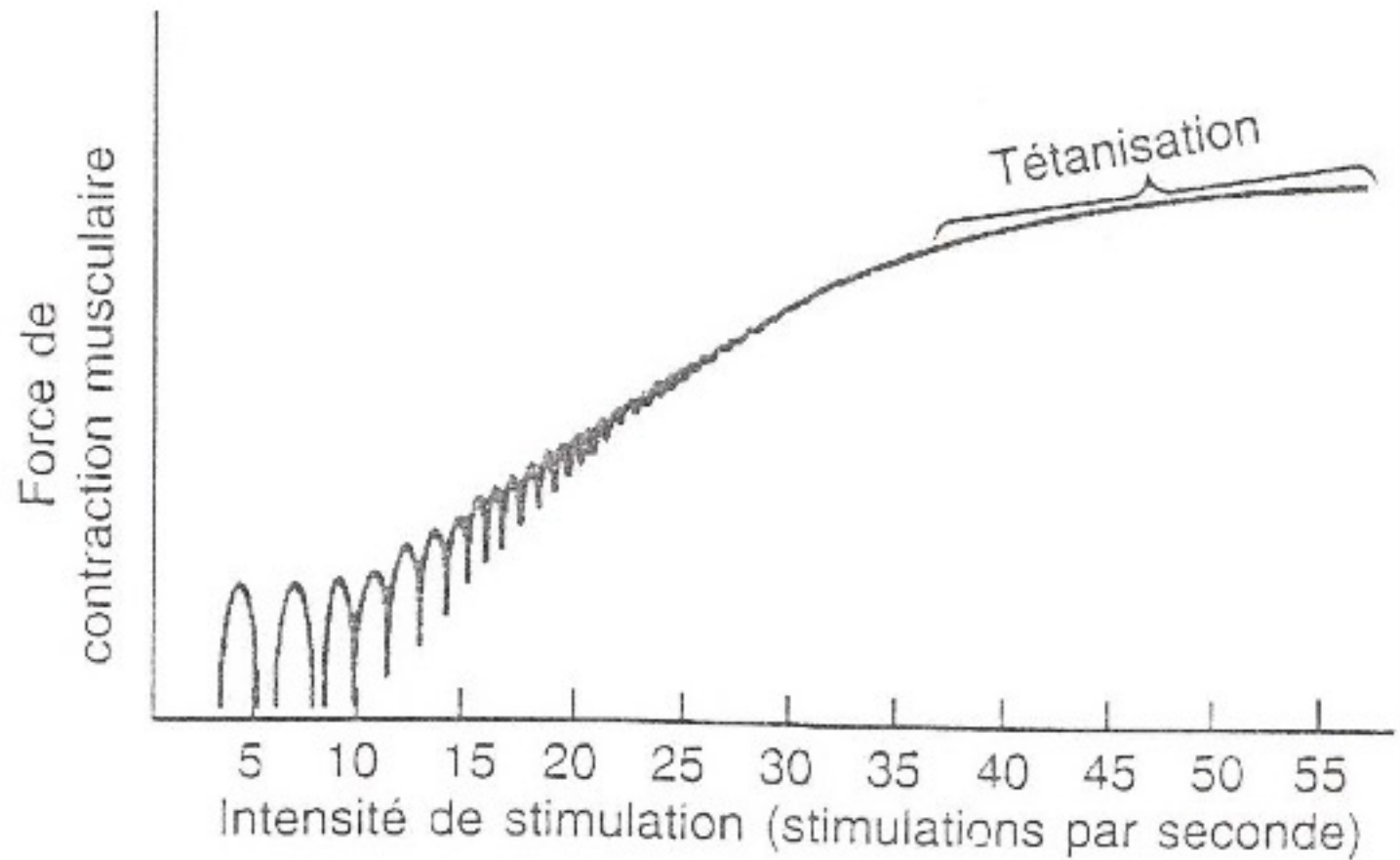
Le muscle squelettique

- Lorsque la fréquence atteint **un seuil critique**, les contractions se succèdent si rapidement qu'elles fusionnent et la contraction devient homogène et continue. C'est ce qu'on appelle la **tétanisation**.
- La **force de contraction** est liée à l'augmentation de la concentration cytoplasmique en **Ca⁺⁺**.

Contraction du muscle squelettique

* Sommutation temporelle : TETANOS





Sommation de fréquences et tétanisation

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Tonus du muscle squelettique
 - » Il persiste une certaine raideur des muscles même lorsqu'ils sont **au repos** : c'est le tonus musculaire.
 - » En dehors de certaines conditions pathologiques, les fibres musculaires ne se contractent que lorsqu'elles sont stimulées par **des potentiels d'action**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Le tonus musculaire dépend donc **des influx en provenance de la moelle épinière**. Ces influx sont sous le contrôle d'influx transmis du cerveau aux **neurones moteurs** et d'influx qui prennent naissance dans les **fuseaux neuromusculaires** situés au sein du muscle.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Fatigue musculaire
 - » Une contraction forte et prolongée entraîne un état de fatigue musculaire.
 - » Elle est proportionnelle au taux de déplétion en **glycogène musculaire**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » De surcroît, la transmission du signal nerveux à la jonction neuromusculaire peut diminuer à la suite d'une **activité musculaire prolongée**, ce qui diminue encore plus la contraction musculaire.
- » L'interruption de la circulation sanguine dans un muscle en contraction entraîne une fatigue musculaire à cause du manque évident d'apport en **oxygène**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Les systèmes de levier du corps
 - » Les muscles fonctionnent en exerçant une **tension** au niveau de leurs points d'insertion sur les os et ceux-ci forment à leur tour différents types de systèmes de levier.
 - » Une analyse des systèmes de levier du corps dépend de la **localisation des points d'insertion** des muscles, de la **distance des points d'insertion du point d'appui du levier**, de la **longueur du bras du levier** et de la **position du levier**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Le corps a besoin d'assurer une grande **variété de mouvements**, certains d'entre eux demandant une **force intense**, d'autres assurant de **grands déplacements**. C'est pour cette raison qu'il existe une grande variété de muscles ; certains sont **longs** et leur contraction entraîne **un déplacement important**, certains sont **courts** mais ont de grandes surfaces de coupe et peuvent ainsi engendrer des **forces importantes sur de courtes distances**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Muscles agonistes et antagonistes
 - » La position de chaque partie du corps prise isolément, comme par exemple un membre, est déterminée par **l'importance relative de la contraction des muscles agonistes et antagonistes**. Par exemple, si un membre est mis en position médiane du mouvement, par exemple avant-bras à demi fléchi sur le bras en position horizontale, le degré d'excitation des muscles antagonistes (ici le triceps) est comparable à celui des agonistes (le biceps).

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Force des muscles
 - » *La force contractile* d'un muscle dépend essentiellement de sa taille et atteint une valeur maximum de 3 à 4 kg par cm² de section transversale.
 - » L'athlète qui a développé ses muscles par l'entraînement dispose d'une force musculaire plus grande que le commun des mortels.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- La puissance de la contraction
 - » **Énergie totale** qu'un muscle peut fournir pendant une unité de temps
 - » La puissance est déterminée par
 - la **force** développée par la contraction
 - la **longueur** du raccourcissement
 - le **nombre de contractions** effectuées en une minute.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

En kilogrammètres par minute.

- Un muscle, qui peut soulever un Kg sur une hauteur de 1 m (ou déplacer latéralement un objet contre une force de 1 kg sur une distance de 1 m) en une minute a une puissance de 1 kgm/min (= 9.81 kj/min ou 163 W).

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **Développement d'une grande puissance** pendant un temps très bref comme une course de 100 m en 10 secondes où la puissance atteint 7000 kgm/min (pour un athlète de haut niveau bien sûr),
- **Pendant les activités d'endurance**, la puissance musculaire disponible n'est que le **quart** de celle d'un effort très intense et très bref.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Cependant, **le rendement de la puissance musculaire** est moindre pendant les mouvements rapides et de courte durée que pour les efforts plus longs et soutenus. Ainsi, la vitesse de course d'un 100 m n'est que 1.75 fois plus grande que celle d'une course de 30 minutes, alors que le rapport des puissances correspondantes est de 4.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» **l'endurance** dépend pour une large part de la disponibilité en substances énergétiques et en particulier de la quantité de **glycogène** mise en réserve dans le muscle avant l'exercice. L'endurance est donc augmentée par les **régimes riches en hydrates de carbone.**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Rôle respectif des fibres musculaires rapides et des fibres musculaires lentes dans les aptitudes sportives individuelles.

Les muscles de certains sujets contiennent beaucoup plus de **fibres rapides que de fibres lentes** et inversement..

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

L'entraînement sportif ne modifie pas sensiblement les proportions des 2 types de fibres dans les muscles. Ces proportions sont essentiellement déterminées par **l'héritage génétique**.

Schématiquement, on peut dire que certains sujets sont nés pour être marathoniens et d'autres pour être sprinters ou sauteurs

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Remaniement du muscle pour l'adaptation à sa fonction
 - » Tous les muscles du corps sont constamment remaniés afin de pouvoir s'adapter à la fonction requise. Leur **diamètre, leur longueur, leur force et leurs apports vasculaires** sont modifiés. Ce remaniement est souvent très rapide de l'ordre de **quelques semaines**. En effet, des expériences ont montré que, même à l'état normal, les protéines contractiles peuvent être totalement renouvelées **toutes les 2 semaines**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » **L' hypertrophie musculaire**
 - **l'hérédité** et la sécrétion de **testostérone** sont les 2 principaux facteurs qui déterminent la dimension des muscles d'un sujet donné.
 - **l'entraînement** : mais l'entraînement peut permettre une hypertrophie de 30 à 60% de la masse musculaire.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- le taux de synthèse des protéines contractiles du muscle est largement supérieur au taux de dégradation
- multiplication des myofibrilles
- système enzymatique accru

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Ajustement de la longueur du muscle.
Un autre type d'hypertrophie musculaire survient lorsque les muscles sont étendus à une longueur au-delà de la normale. Ceci provoque l'apparition de nouveaux sarcomères au niveau de l'extrémité par laquelle les fibres musculaires rejoignent les tendons.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » Au contraire, lorsque le muscle est étendu à une longueur au-dessous de la normale, les sarcomères au niveau de l'extrémité musculaire disparaissent.
- » C'est ainsi que les muscles sont constamment remodelés afin d'avoir une longueur adaptée à la contraction

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

»atrophie musculaire

- L'arrêt de l'entraînement détermine une diminution très rapide de la force maximale. La moitié du bénéfice acquis peut disparaître en 4 semaines. La diminution est ensuite beaucoup plus lente.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Lorsqu'un muscle n'est pas utilisé pendant longtemps, le **taux de dégradation** des protéines contractiles ainsi que **la diminution du nombre de myofibrilles** sont plus rapides que leur remplacement. C'est ce qui explique la survenue de l'atrophie.

La contraction musculaire

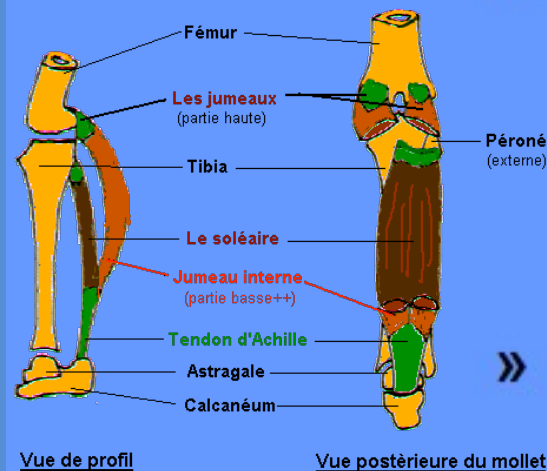
Le muscle squelettique

C'est ce qu'on voit par exemple lors d'une immobilisation par plâtre. **La force maximale** décroît dès le premier jour et atteint 20% en une semaine. Ce phénomène se ralentit ensuite, puisque la réduction de force maximale est de 30 à 40% après 6 semaines d'immobilisation. L'alitement complet aboutit mais plus lentement à un résultat analogue.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Remaniement des muscles lents chez les marathoniens
 - » Les muscles à contraction très rapide comme les muscles jumeaux de la jambe peuvent maintenir une force contractile intense mais seulement pendant de courtes périodes de contraction continue.
 - » C'est pour ça que les muscles lents comme le muscle soléaire sont utilisés pour une activité prolongée comme les marathons. Ces muscles ne s'hypertrophient pas autant que les muscles rapides mais sont remaniés de façon différente



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Une activité prolongée de l'ordre de plusieurs heures par jour provoque, en dehors d'une discrète **hypertrophie** des fibres, les **modifications** suivantes, susceptibles d'augmenter la **capacité d'utilisation des substances nutritives** par les fibres :

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **augmentation du taux de myoglobine** dans chaque fibre pour transporter l'oxygène vers les mitochondries
- augmentation importante du nombre de **mitochondries** afin de former une quantité accrue d'ATP

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Effets de la dénervation musculaire
 - » début presque immédiat de l'**atrophie**
 - » Après environ 2 mois , début de **dégénérescence des fibres**
 - » Si le muscle est **réinnervé**, il y a un retour de la fonction au cours des 3 premiers mois mais au-delà, la récupération fonctionnelle devient de plus en plus incomplète avec une perte définitive de la fonction au bout d'une période comprise entre 1 et 2 ans.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- » Au stade final d'atrophie de dénervation,
 - **destruction** complète des fibres musculaires et remplacement par du tissu **fibreux et graisseux**.
 - Les fibres restantes : longue membrane cellulaire avec une lignée de noyaux cellulaires; elles n'ont plus de propriétés contractiles ni de capacité à régénérer des myofibrilles.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Malheureusement, **le tissu fibreux** qui remplace les fibres musculaires lors de l'atrophie de dénervation a tendance à se raccourcir, c'est la **contracture**. Un des problèmes majeurs en rééducation fonctionnelle est d'empêcher le développement de ces contractures.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Récupération de la contraction musculaire dans la poliomyélite : développement d'unités macromotrices.
 - » Lorsque quelques unes parmi les fibres nerveuses qui innervent un muscle sont détruites, comme c'est le cas dans la poliomyélite, les fibres restantes développent de **nouveaux axones** afin de former de nouvelles ramifications qui vont alors innervées une grande partie des fibres musculaires paralysées.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» Ceci est à l'origine de très vastes unités motrices qu'on appelle **unités macromotrices** dont le nombre de fibres musculaires est de 5 fois supérieur au nombre de fibres normalement en rapport avec un neurone spinal. Ceci diminue bien évidemment la finesse du contrôle du muscle mais permet néanmoins à celui-ci de retrouver sa force.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Rigidité cadavérique
 - » Plusieurs heures après la mort, tous les muscles du corps sont en état de **contracture** qu'on appelle rigidité cadavérique.
 - » Cette rigidité est liée à une **disparition de tout l'ATP** nécessaire pour provoquer la rupture des ponts transversaux des filaments d'actine pendant le relâchement musculaire.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

» La rigidité des muscles persiste jusqu'à la **destruction des protéines musculaires**. Cette destruction est généralement liée à une autolyse par des enzymes relarguées par les lysosomes au bout de **15 à 25 heures** avec un déclenchement plus rapide lorsque la température est plus élevée.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **COUPLAGE EXCITATION-CONTRACTION**
 - **La jonction neuromusculaire : la plaque motrice**

Les fibres musculaires squelettiques sont innervées par des grosses fibres myélinisées, axones des **motoneurones** de la corne antérieure de la moelle épinière.

Chaque fibre nerveuse donne naissance à de multiples branches et stimule de **3 à plusieurs centaines de fibres musculaires squelettiques**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

Chaque terminaison nerveuse fait synapse avec la fibre musculaire près du point central de la fibre musculaire au niveau d'une structure particulière appelée **jonction neuromusculaire** ou « **plaque motrice** ». A l'exception d'environ 2% des fibres musculaires, il n'y a qu'une seule jonction de ce type par fibre.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

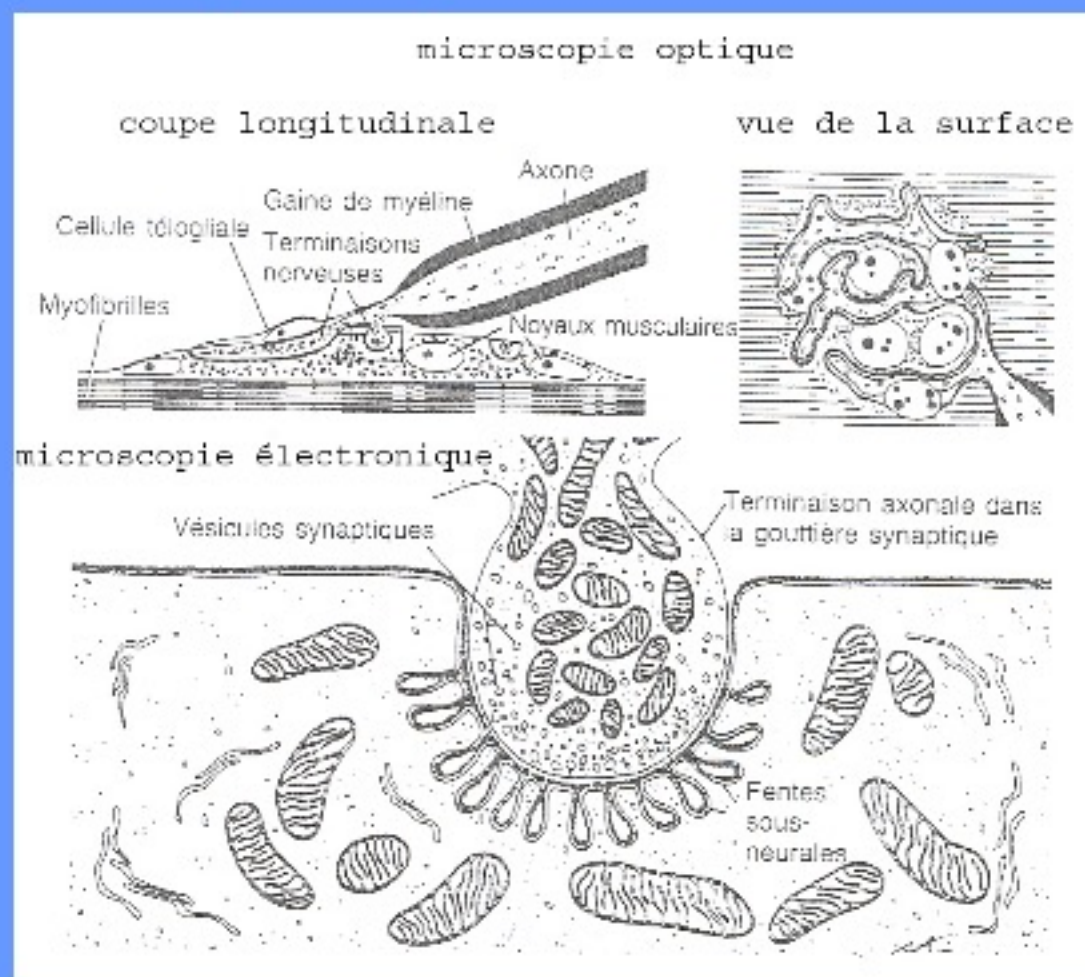
- Anatomie physiologique
 - Les **branches terminales de la fibre nerveuse** forment un complexe de terminaisons nerveuses en rameau qui s'invaginent dans la fibre musculaire tout en restant entièrement situé à l'extérieur de la membrane plasmatique.
 - » Chaque terminaison nerveuse est renflée en un **bouton synaptique**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- **La plaque motrice** est recouverte par une ou plusieurs cellules de Schwann qui l'isolent des liquides environnants
- L'invagination de la membrane est appelée **gouttière ou creux synaptique**,

La jonction neuromusculaire : la plaque motrice

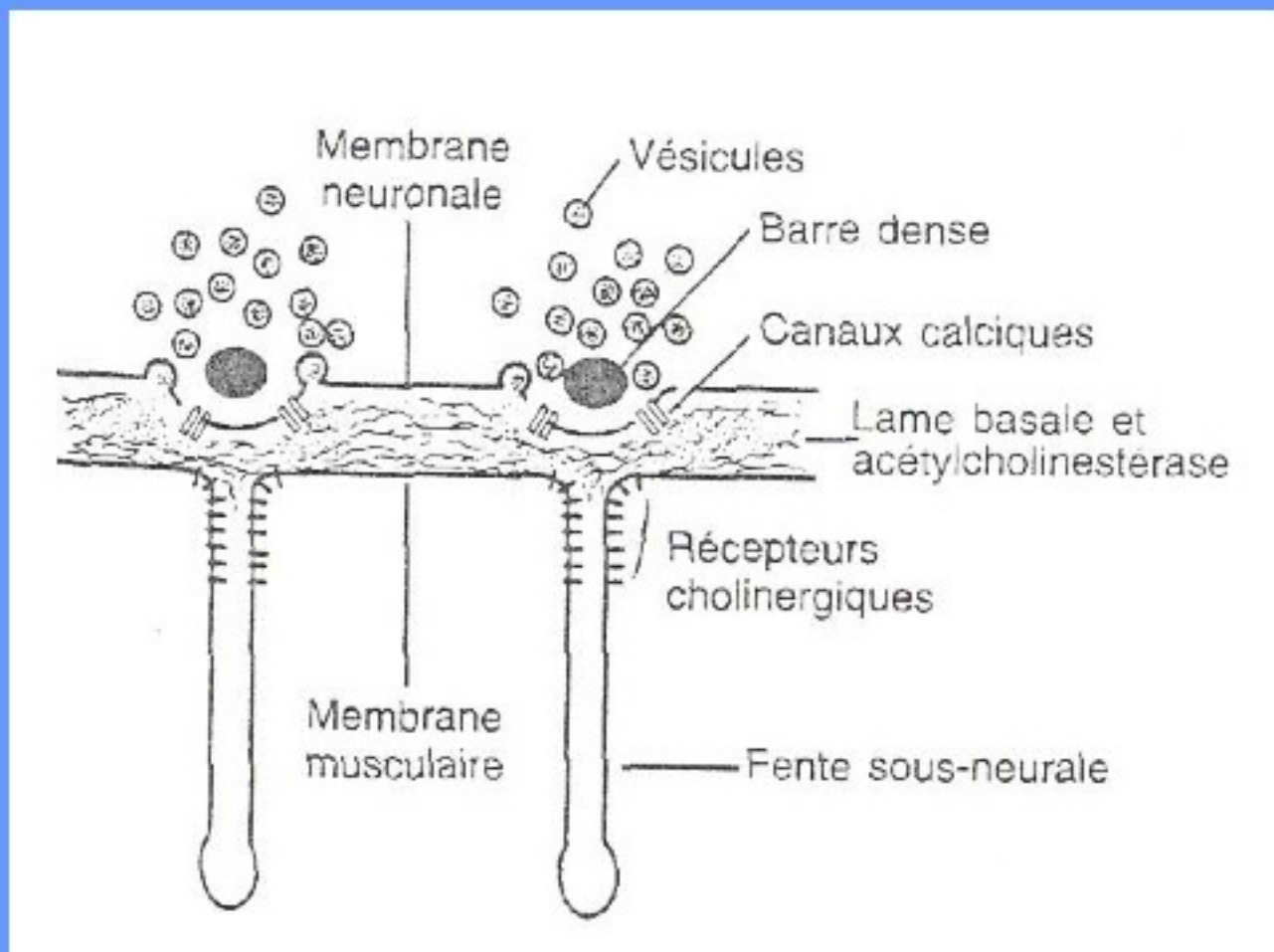


La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Dans la **terminaison axonale**
 - » nombreuses **mitochondries** qui pourvoient à l'énergie nécessaire à la synthèse du médiateur excitateur **l'acétylcholine (ACh)**
 - » L'ACh est synthétisé dans le cytoplasme de la terminaison, mais il est rapidement absorbé dans des **vésicules synaptiques** de petite taille

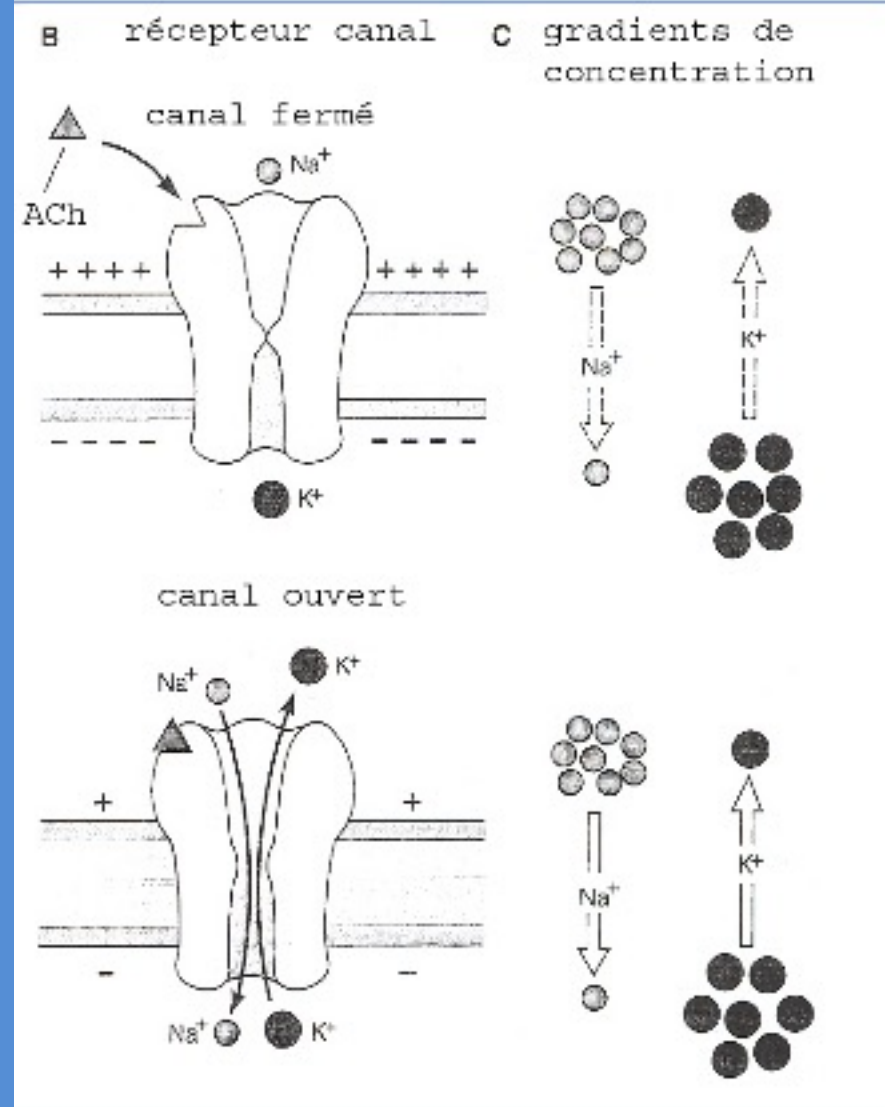
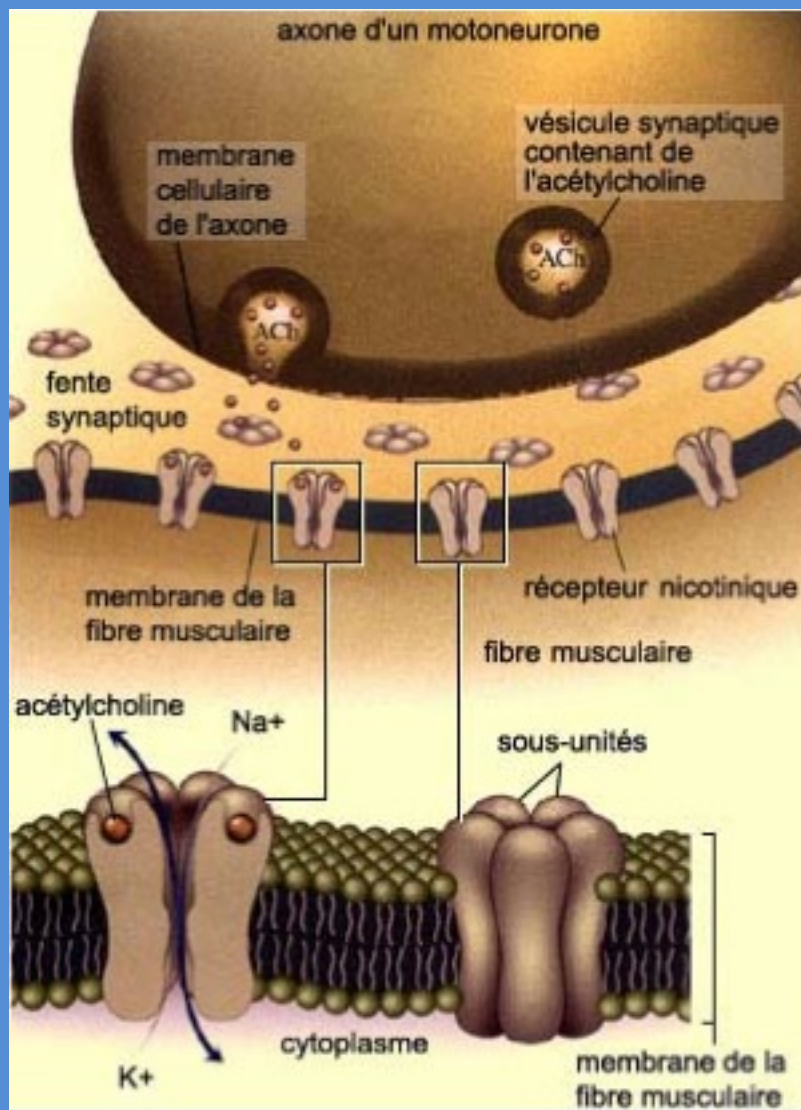
La jonction neuromusculaire : la plaque motrice



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- La fixation d'acétylcholine sur ces récepteurs ouvrent les canaux ce qui permet **l'entrée de Na^+** dans la fibre musculaire et **la sortie d'ions K^+** de la fibre musculaire.
- Beaucoup plus d'ions Na^+ entrent que d'ions K^+ ne sortent. Il s'ensuit une dépolarisation : **un potentiel local, le potentiel de plaque motrice.**
- Celui-ci est habituellement suffisamment ample pour engendrer **un potentiel d'action** sur la fibre musculaire entraînant secondairement la contraction du muscle.



La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- Fatigue de la jonction neuromusculaire :
 - » D'habitude, **chaque impulsion** qui arrive au niveau de la jonction neuromusculaire provoque **3 à 4 fois plus de potentiel de plaque que nécessaire à la stimulation de la fibre musculaire**. Par conséquent, la jonction neuromusculaire normale est dite avoir un **très haut niveau de sécurité**.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

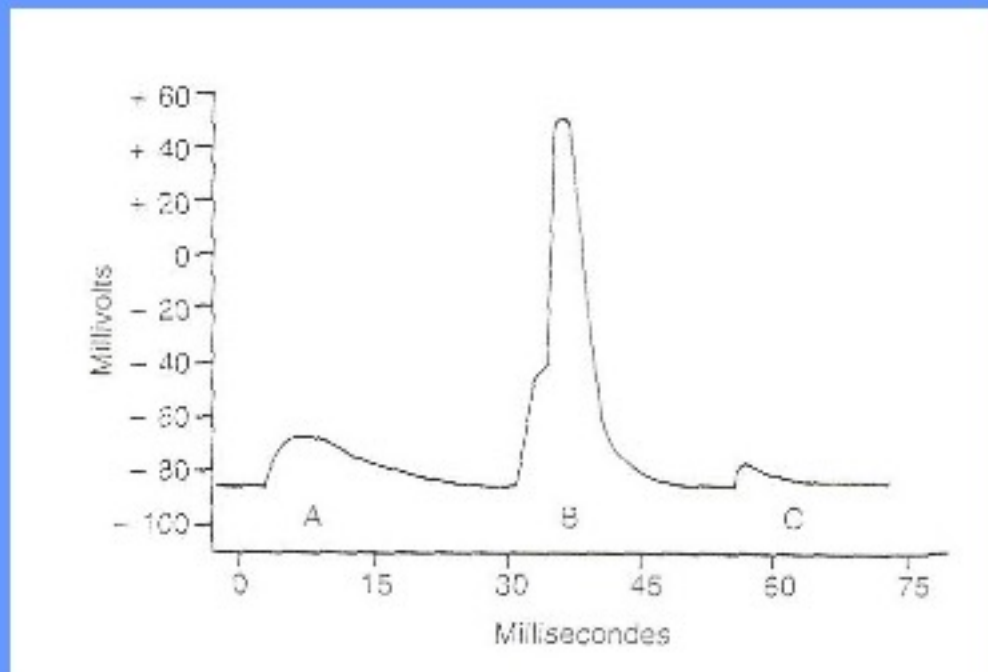
» Cependant, une stimulation artificielle de la fibre nerveuse, **à une fréquence élevée pendant plusieurs minutes, diminue souvent le nombre des vésicules d'acétylcholine** libérées à chaque potentiel d'action, de sorte que **la fréquence des potentiels postsynaptiques est diminuée**. Ceci est appelé **fatigue**. Dans les conditions normales de fonctionnement, la fatigue de la jonction neuromusculaire survient très rarement et seulement lors d'efforts musculaires épuisants.

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- La myasthénie
 - » 1 personne sur 20000
 - » **Paralysie** du fait de l'incapacité des jonctions neuromusculaires à transmettre les signaux nerveux aux fibres musculaires.
 - » maladie **autoimmune** au cours de laquelle les patients ont développé des anticorps contre les canaux ioniques à ACh

Potentiels d'action du muscle



- **Potentiels de plaque motrice**
 - **A. Potentiel affaibli enregistré dans un muscle curarisé, ne pouvant déclencher le PA**
 - **B. Potentiel de plaque motrice normal**
 - **C. Potentiel de plaque motrice affaibli par la toxine botulinique réduisant trop la libération d'ACh au niveau de la plaque motrice pour déclencher un PA**

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

– Potentiels d'action du muscle

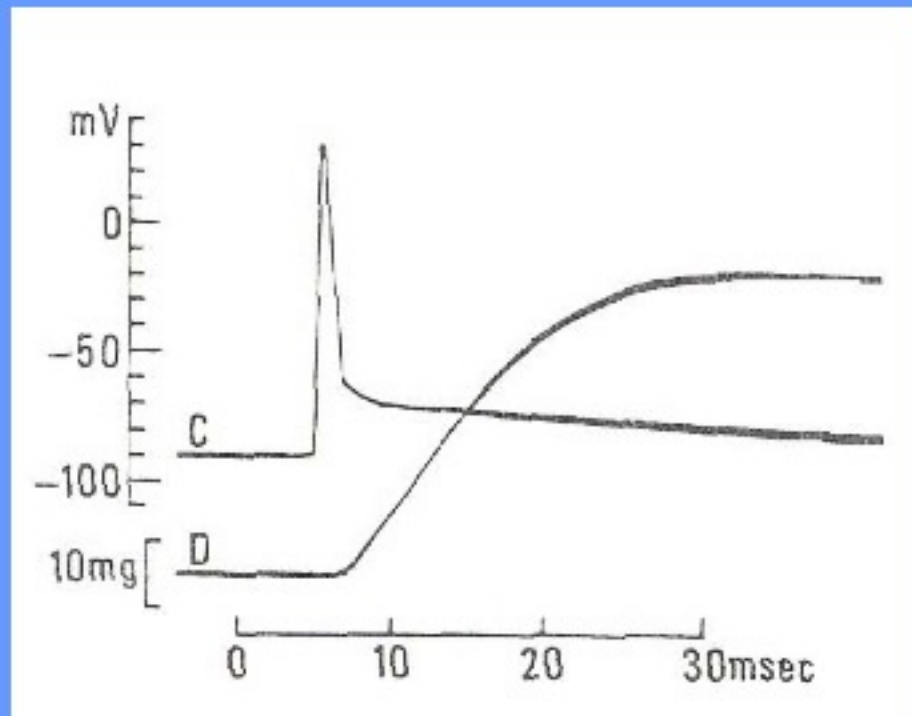
- Il existe des **similitudes** et quelques **différences** entre la conduction de l'influx dans les fibres musculaires et la conduction dans les fibres nerveuses :

La contraction musculaire

Le muscle squelettique

- le potentiel de repos dans les fibres musculaires est le même que celui des grosses fibres myélinisées à savoir - **80 à - 90 mV**
- la durée du PA de **1 à 5 millisecondes** est 5 fois plus longue que dans les fibres myélinisées
- la vitesse de conduction est de **3 à 5 m/s**

Potentiels d'action du muscle



- **PA (C) et contraction isométrique (D) d'une fibre musculaire striée isolée**

D'après Fig. 7, p. 737. ch. X. M. Worcel, B. Swynghedauw. Le muscle, contraction musculaire. Physiologie humaine. P. Meyer (edt.), Flammarion, 1977.

Potentiels de l'unité motrice :

Ce sont les PA détectés par une électrode concentrique dans un muscle effectuant une contraction volontaire.

Ces potentiels proviennent de groupes de fibres proches innervées par le même motoneurone

Le potentiel d'unité motrice représente un échantillon de l'activité des fibres de l'unité motrice :

- Électrode ne couvre que qq fibres (~ 30)
- Dépend de la position de la position de l'électrode par rapport ax fibres

Taille de l'unité motrice :

Elle est donnée par le taux d'innervation qui est égal :

$$(\text{Nombre de fibres musculaires dans un muscle}) / (\text{Nombre d'axones moteurs du muscle})$$

Plaque motrice :

Région délimitée où les terminaisons nerveuses se répartissent le long du muscle.

Elle se situe en général dans la partie centrale des fibres musculaires

Point moteur :

Lieu de pénétration du nerf dans le muscle

Situé de manière proche de la plaque motrice

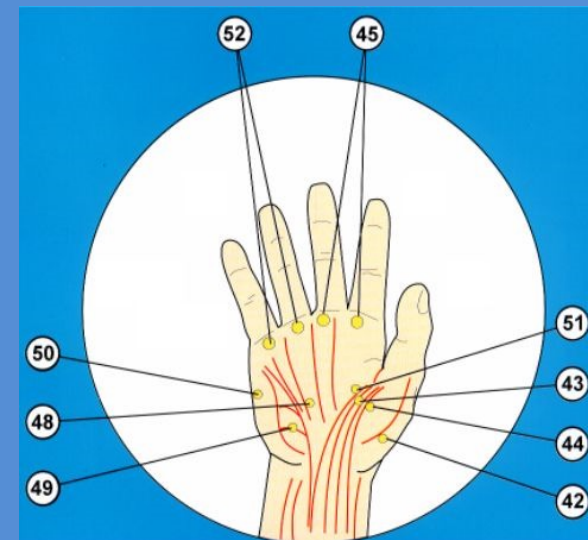
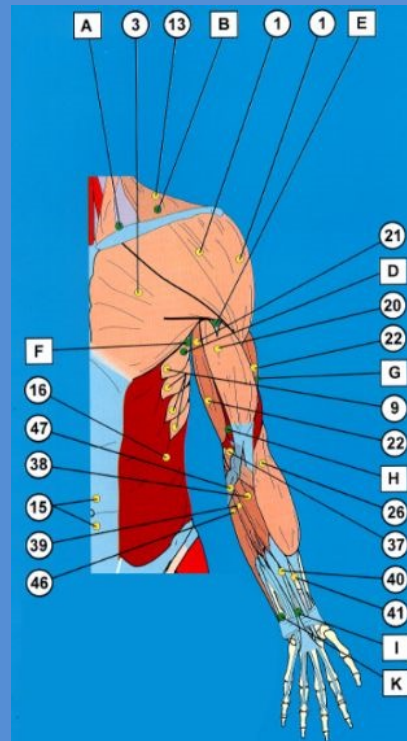
Point moteur (suite) :

Un point à la surface du revêtement cutané où la réponse du muscle est obtenue par une stimulation la plus faible possible

Le point moteur représente une zone sous laquelle se situe une grande densité de plaques motrices

Il existe à la surface du corps humain un très grand nombre de points moteurs (cartographie)

*Points moteurs du membre supérieur
et de la main*



On distingue 2 types d'unités motrices :

- Unités rapides : fibres blanches
 - Contraction rapide, intense mais fatigable
- Unités lentes : fibres rouges (riches en myoglobine)
 - Contraction lente, continue et non fatigable

Recrutement et fréquence de décharge :

Force de contraction dépend :

- Du nombre d'unités recrutées
- De leur fréquence de décharge

Recrutement et fréquence de décharge

- Au cours d'une contraction volontaire, les unités motrices sont recrutées par ordre de taille, les plus petites unités étant les premières mises en jeu.
 - Les plus petits neurones sont les plus excitables
- Plus le muscle se contracte plus le nombre d'unités motrices recrutées augmente
 - Si l'intensité du stimulus diminue alors le nombre de PA va diminuer car il y aura de moins en moins de fibres qui vont être dépolarisées.

Recrutement et fréquence de décharge

- Fréquences de décharge :
 - Fréquence des impulsions nerveuses :
5 à 100Hz
 - Fréquence de décharges des unités motrices :
< 50Hz

Electromyographie

L'EMG étudie l'activité d'un muscle en recueillant les potentiels d'action émis par les fibres qui se contractent.

Le signal peut être recueilli par voie transcutanée, au moyen d'électrodes de surface, mais aussi le plus souvent d'électrodes aiguilles concentriques insérées dans le muscle.

L'électrode ne recueille que les potentiels émis par les fibres les plus proches

2 types d'électrodiagnostics :

➡ Electrodiagnostic de détection (EMG)

➡ Electrodiagnostic de stimulation

Electrodiagnostic de détection

Consiste à enregistrer et à analyser l'activité des unités motrices.

Définir ses caractères dans les conditions physiologiques et ses altérations dans les états pathologiques intéressant les fonctionnements neuromusculaires

Cet examen permet :

- le diagnostic des lésions du nerf périphérique
- la reconnaissance et à l'étude des neuropathies périphériques et des maladies musculaires (myopathies)
- l'identification des lésions de la corne antérieure

On distingue :

- L'EMG élémentaire ou analytique qui consiste à recueillir et à analyser les potentiels engendrés par l'unité motrice, au moyen d'électrodes aiguilles introduites dans le muscle.
- L'EMG globale ou cinésiologique qui enregistre l'activité globale du muscle au moyen d'électrodes de surface.

Pour recueillir l'activité des unités motrices, différents types d'électrodes peuvent être utilisées.

2 types d'électrodes EMG :

- Électrodes de surface
- Électrodes aiguilles

- Les électrodes de surface

Permettent l'enregistrement de l'EMG global

Recueillent l'activité électrique globale d'une contraction musculaire volontaire, spontanée, réflexe ou stimulée.

Le tracé EMG est le résultat du recueil des lignes de champ électrique appartenant à de nombreux potentiels.

Cette méthodologie permet :

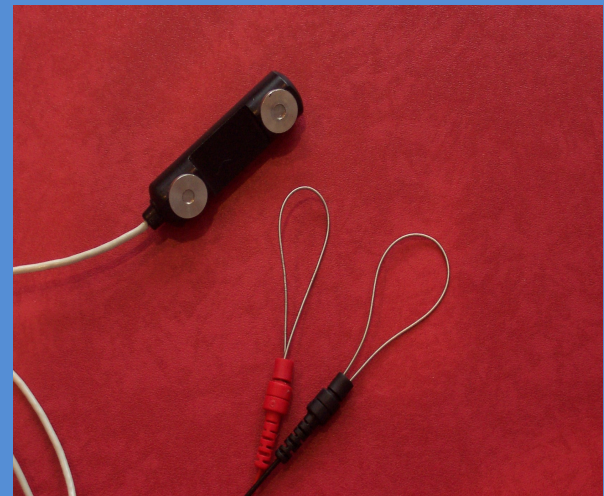
- l'analyse des mouvements en cinésiologie, ergonomie, médecine du sport et du travail
- l'étude des réflexes
- l'étude des mouvements anormaux ou spontanés (contractures, tremblements, ...)

- la mise en évidence de l'activité musculaire électriquement provoquée (vitesse de conduction nerveuse, myasthénie, réflexologie, électroneurographie quantitative)

Pour le recueil l'activité électrique d'un maximum de fibres musculaires, les électrodes de surface sont distantes de 4 cm.

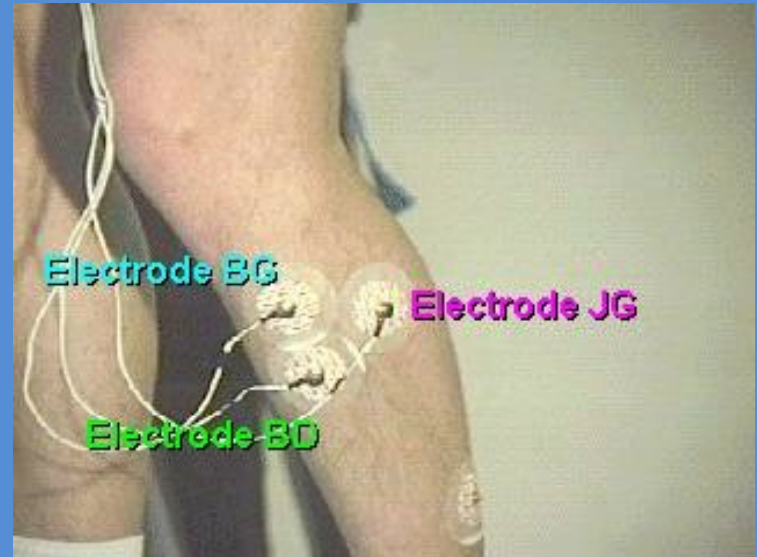
Surface (électrode) = 1 cm^2 (variable)

Ce sont généralement de petites plaques métalliques rondes ou carrés ou en anneau pour les doigts



Pour disposer d'un meilleur signal EMG, il faut diminuer l'impédance des électrodes. Pour cela, on augmente la conduction du signal en plaçant un gel conducteur entre la peau et l'électrode de surface

Actuellement, les électrodes renferment le gel conducteur et disposent d'une couronne adhésive pour la fixation sur la peau.



Électrodes de surface sont le plus souvent utilisées pour la stimulo-détection

- Les électrodes aiguilles

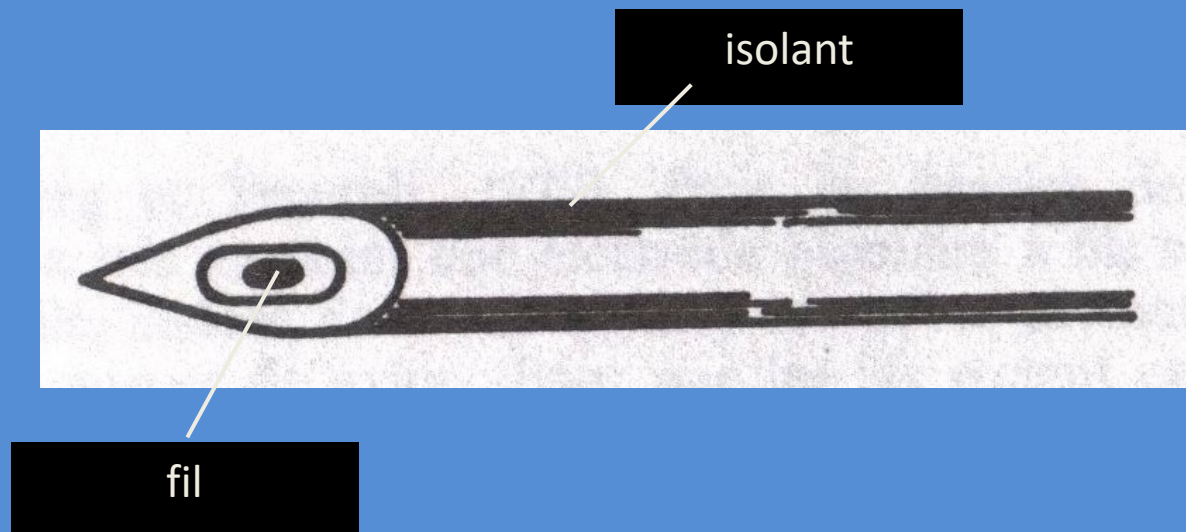
On distingue plusieurs types :

- Électrodes aiguilles concentriques bipolaires unifilaires

Les plus souvent utilisés en EMG

Aiguille dans laquelle se trouve un fil d'acier ou de platine recouvert d'isolant sauf à sa pointe

Enregistrement de la ddp entre la pointe du fil et la surface externe de l'aiguille

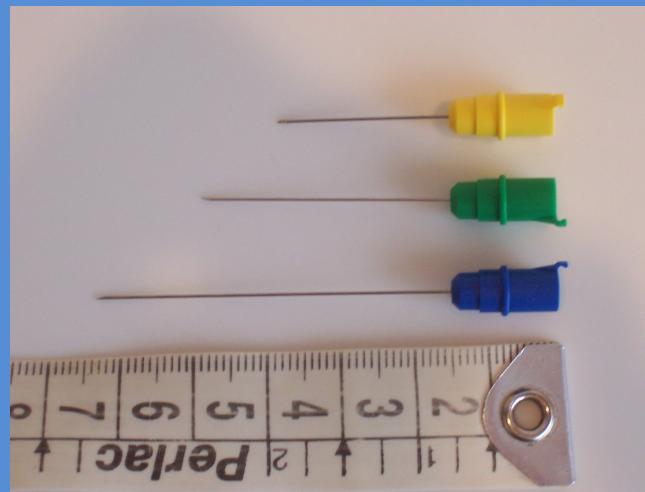


La surface de contact de l'électrode est de forme elliptique
 $\emptyset : 0,45\text{mm}$

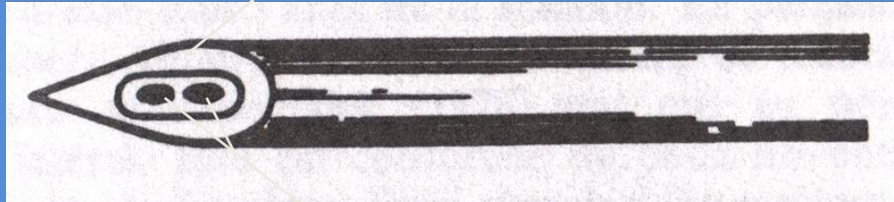
Champ de recueil relativement large : électrode peu sélective
Elle capte au cours d'une contraction intense jusqu'à 30 PA d'unités motrices différentes

Rayon du champ de recueil : 1mm pour les composantes rapides du potentiel d'unité motrice

Fil central et surface externe de l'aiguille sur un ampli différentiel
alors il faut une 3^{ème} électrode à la masse (électrode de surface)
sinon l'aiguille elle même doit être mise à la masse.

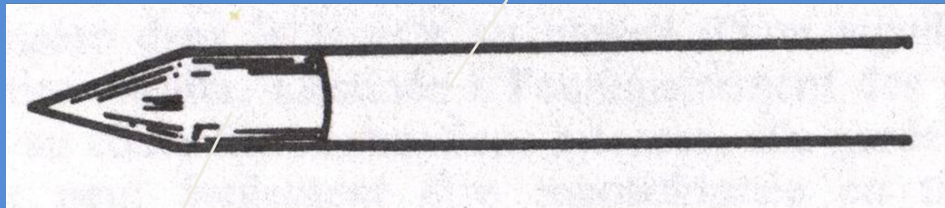


Canule

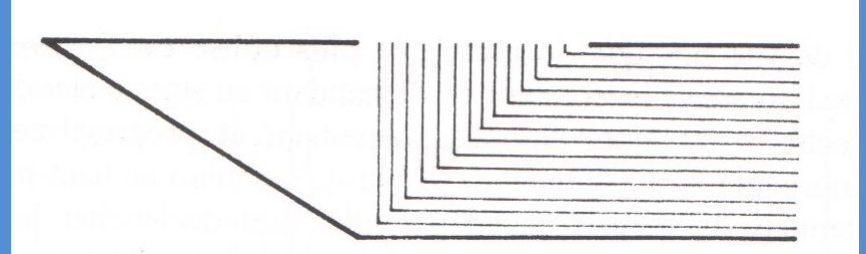
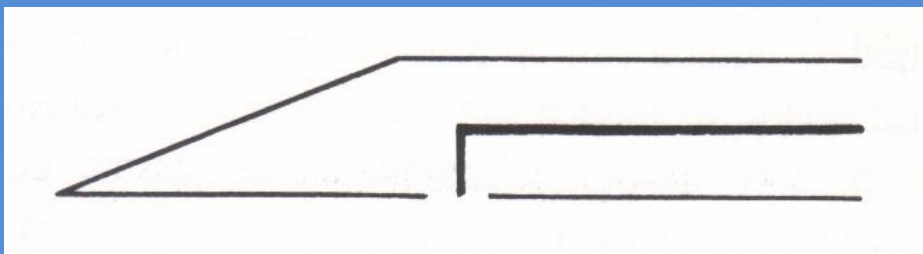
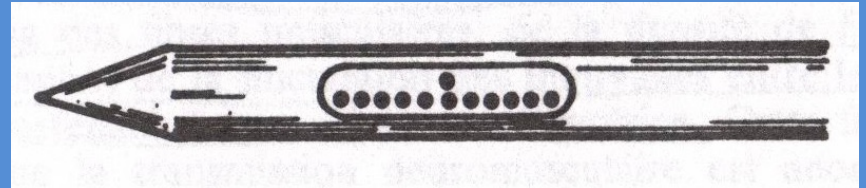
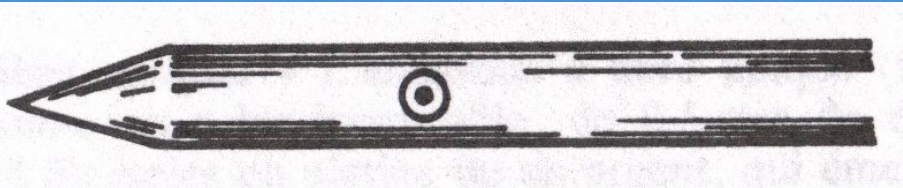


2 fils

Vernis isolant



Pointe dénudée



Électrodes utilisées pour les enregistrements de l'EMG.

<i>Application</i>	<i>Description</i>	<i>Surface d'enregistrement</i>	<i>Électrode de référence</i>	<i>Paramètre mesuré</i>	<i>Impédance de l'électrode (kΩ)</i>
EMG de fibre unique	Surface d'enregistrement sur le côté de l'aiguille	25 μ m de diamètre	Manchon de l'aiguille	Fibre musculaire isolée	100
EMG de routine	Aiguille coaxiale	0,07 mm ²	Manchon de l'aiguille	Potentiel d'action d'unité motrice	5
	Aiguille monopolaire	0,12 mm ²	Électrode de surface ou autre aiguille	Potentiel d'action d'unité motrice	5
Pattern de décharge	Aiguille coaxiale bipolaire	0,015 mm ²	Canule	Potentiel d'action d'unité motrice isolé	20
Macro-EMG	Aiguille à EMG de fibre unique modifiée	15 mm au sommet ; surface sur le côté : 25 μ m	Aiguille de surface, canule	Macro-potentiel d'action d'unité motrice	1 – 5 ; 100
Kinésiologie (enregistrements à long terme)	Filament isolé 50–70 μ m	50 μ m – 5 mm au sommet	Électrode de surface	Sommation de l'activité des unités motrices	2 – 150
EMG de surface	Électrodes de métal	20 à 100 mm ²	Seconde électrode de surface	Sommation de l'activité des unités motrices	1 – 5
Nerf moteur, enregistrement de surface	Électrodes de métal	20 à 100 mm ²	Seconde électrode de surface	Potentiel d'action composite du muscle	1 – 5
Nerf sensitif, enregistrement de surface	Électrodes de métal	20 à 100 mm ²	Seconde électrode de surface	Potentiel d'action de nerf sensitif	1 – 5
Micro-neurographie	Microélectrode en tungstène	5 – 10 μ m au sommet	Électrode de surface	Potentiel d'action de fibre nerveuse unique	75 – 150
Études à proximité du nerf	Aiguille monopolaire	2 – 3 mm au sommet	Seconde aiguille ou électrode de surface	Potentiel d'action composite de nerf	1 – 2
Électrode de masse	Électrode de métal	Surface > 100 mm ²	–	–	0,4 – 1

Conclusion

Relation entre le type d'électrode et le paramètre mesuré

Taille et le type des électrodes (surface ou aiguille) varient selon l'application souhaitée

Plus la surface d'enregistrement est fine, plus l'exploration est précise et plus l'analyse est détaillée

Le choix des électrodes dépend :

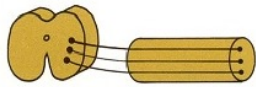
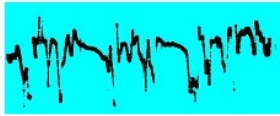
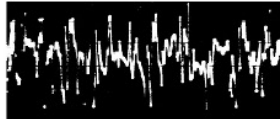
- du but de l'examen
- du nombre de fibres à enregistrer
- de distribution spatiale des fibres

Signal EMG chez le sujet normal

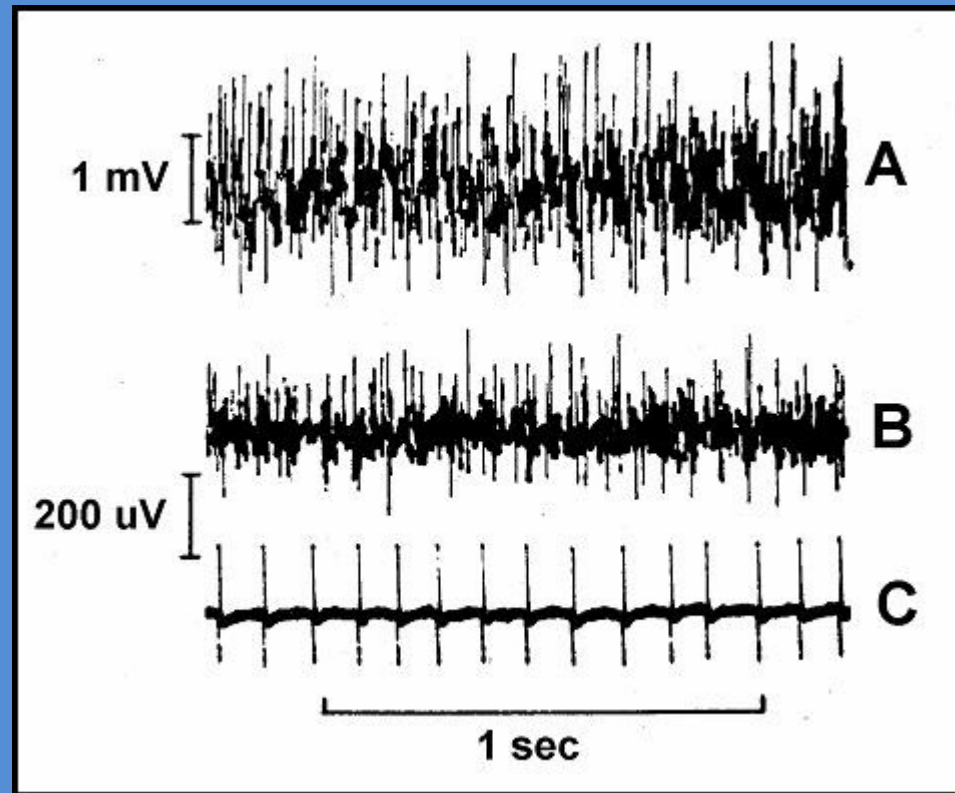
On insère une électrode aiguille dans le muscle du patient et on lui demande de réaliser une contraction musculaire croissante

L'organisme met alors en activité un nombre progressivement croissant d'Unités Motrices (sommation spatiale).

Les tracés EMG reflètent fidèlement ce mécanisme physiologique

Gradation de la contraction volontaire	Électromyogramme
Repos	Aucune activité électrique
	Quelques Unités Motrices sont en activité
 Faible	Tracé Simple 
	On constate la pulsion d'un nombre plus important d'UM. On peut toutefois distinguer chacune d'elle.
Moyenne 	Tracé Intermédiaire 
	Par suite du très grand nombre d'UM en activité, leurs potentiels interfèrent.
Maximale 	Tracé Interférentiel 

Il existe donc un gradient de la contraction musculaire qui est caractérisé par la fréquence de décharges des unités individuelles et le nombre d'unités motrices innervées



Fréquence +++

Amplitude ++

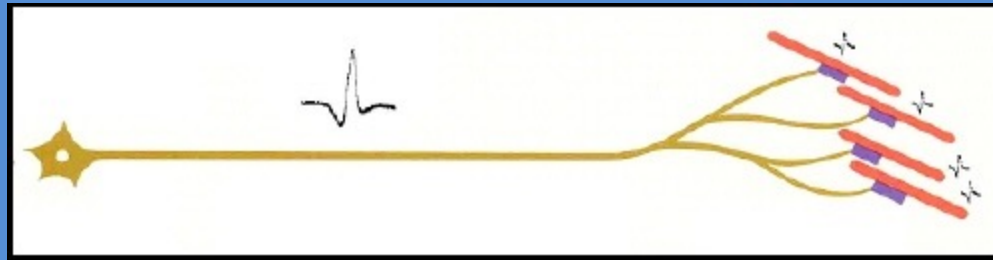
Fréquence ++

Fréquence +

A. Contraction maximale, B. Contraction intermédiaire, C. Contraction simple

Lors d'une action volontaire, les potentiels d'unité motrice sont les principaux phénomènes électriques que l'on recueille dans un muscle

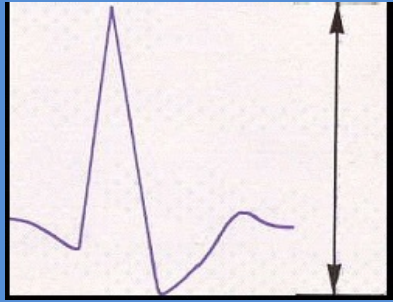
Chacun de ces potentiels est la somme des potentiels d'action de groupes de fibres musculaires



$PA(\text{unité motrice}) = \Sigma \text{ Potentiels élémentaires des fibres musculaires} = \Sigma PA (\text{fibres musculaires})$

Potentiel d'action de l'unité motrice normale est caractérisé par:

- une amplitude
- une forme
- une durée
- une fréquence



Mesure pic à pic

L'amplitude :

Entre 100 et 500 μ V

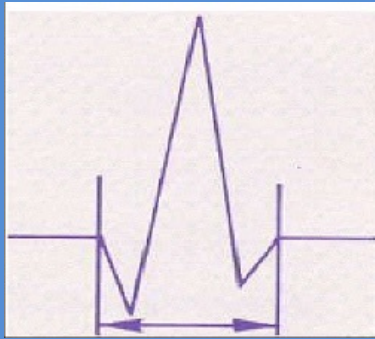
Dépend de la distance entre

l'électrode et l'unité motrice

Objectif : se rapprocher au maximum de l'unité motrice

2 Moyens d'y parvenir :

- Plus on s'approche de l'unité motrice et plus le bruit émis par le HP est sec (sinon bruit sourd)
- Sur l'écran du PC, plus on s'approche et plus l'amplitude du signal est élevée



La durée :

Caractéristique la plus constante du potentiel de l'UM : Varie entre 3 et 6msec

Aucune influence de la position de l'électrode

Dépend surtout de la synchronisation des courants d'action des fibres dont elle est la somme.

Plus la synchronisation est importante plus la durée sera longue

Dépend aussi de l'âge du patient : durée augmente avec l'âge

Ex: chez l'enfant Potentiel Unité Motrice = 8,3msec

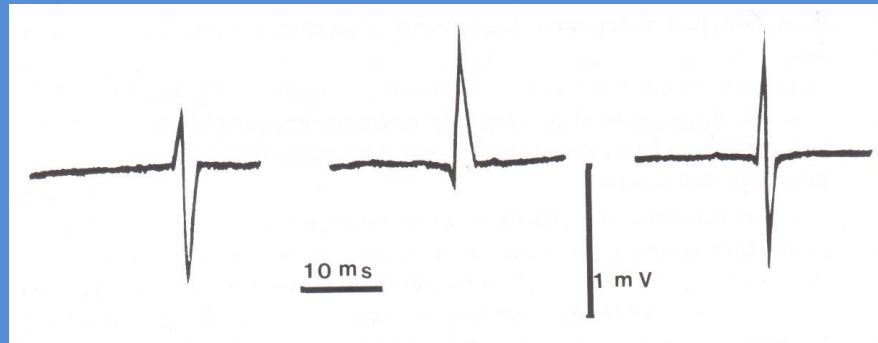
chez sujet âgé PUM = 12,6msec (pour le même muscle)

La forme :

Le plus souvent le potentiel d'unité motrice est triphasique, mais il peut être mono-, bi- ou polyphasique.

Le potentiel triphasique présente une phase initiale positive suivie par une grande phase négative en général pointue, et une phase finale positive.

Parfois, le potentiel débute directement par une ascension raide négative, indiquant que la pointe de l'électrode est dans le voisinage immédiat de l'origine du potentiel, c'est-à-dire dans la zone d'innervation.



Dans un muscle normal, il y a en moyenne moins de 10% de potentiels polyphasiques.

La fréquence :

L'unité motrice en activité émet un PA qui se répète à la fréquence de 4 à 12 par secondes (Hz), rythme imposé à l'unité motrice par l'activité de la cellule de la corne antérieure de la moelle (neurone moteur)

Influence de la température du muscle :

Le froid augmente la durée et le nombre de potentiels polyphasiques

La chaleur augmente l'amplitude et le rythme

Potentiel de nerf ou activité d'insertion

Lorsque l'on enfonce une aiguille dans un muscle sain, bien relâché, on ne détecte habituellement aucun potentiel.

Néanmoins, on observe parfois une bouffée de pointes brèves qui disparaissent dès que l'aiguille s'immobilise.



Ce phénomène, dû à l'irritation des fibres nerveuses et musculaires par les mouvements de l'électrode, est intitulé activité d'insertion.

Mais si l'aiguille, accidentellement blesse une fibre nerveuse intramusculaire, on enregistre une activité électrique caractéristique appelée potentiel de nerf.

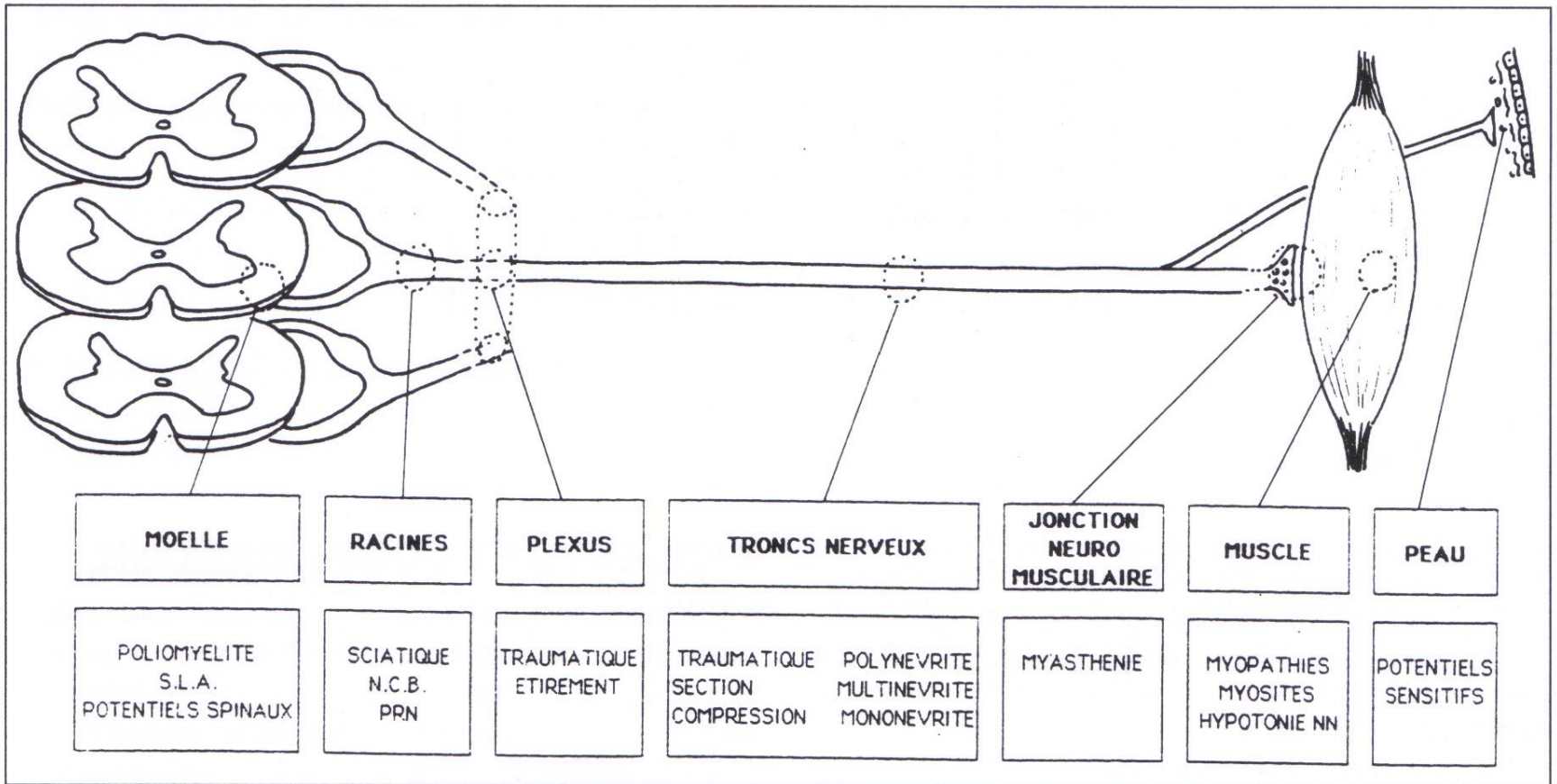
Caractéristique du potentiel de nerf :

- Ce phénomène peut durer plusieurs millisecondes
- Son amplitude est de 50 à 300 μV
- Sa forme : biphasique
- Fréquence : 50 / sec

Il n'est pas influencé par la contraction volontaire

On rencontre principalement ces potentiels dans la région du point moteur musculaire

Champs d'application de l'EMG :



Potentiel pathologiques

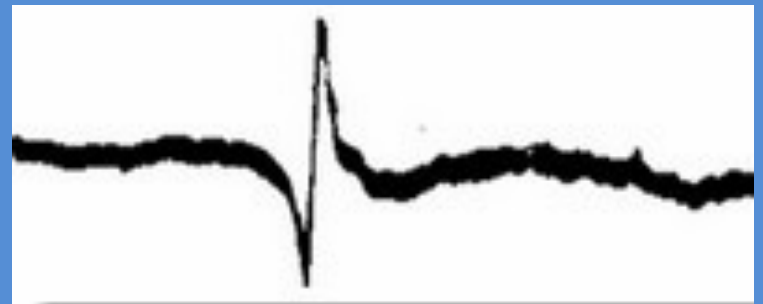
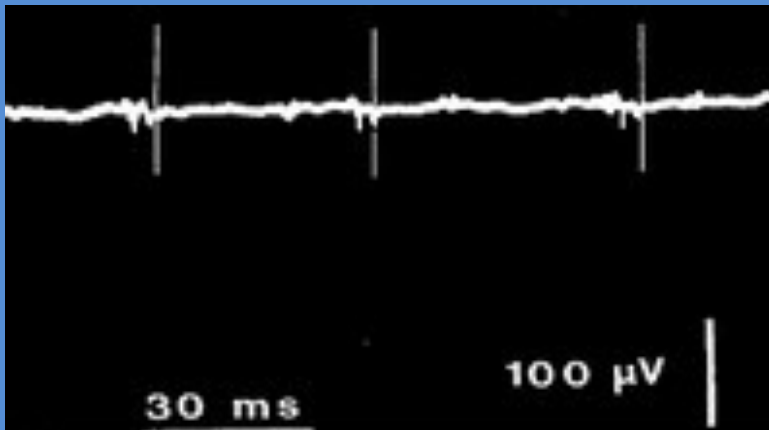
- Fibrillations

Ne sont normalement pas visibles sur des structures neuromusculaires en activité, sauf à la surface des muscles de la langue.

Leur présence n'est détectée que dans le muscle au repos

Ces potentiels apparaissent au cours des dénervations axonales mais ne sont pas présents immédiatement après la lésion nerveuse

Rq: La fibrillation cesse avec l'apparition de la réinnervation



- Fibrillation (suite) :

Amplitude	50 à 200 μV
Durée	0,5 à 3 ms
Morphologie	Tri- ou biphasique
Fréquence	2 à 10 Hz

- Potentiels positifs ou potentiels lents de dénervation :

Ces potentiels spontanés proviennent vraisemblablement d'une zone de lésion d'une fibre musculaire

→ le courant d'action fuse de l'intérieur de la fibre vers les tissus conducteurs environnants

Jamais au niveau des muscles sains

Ils sont un signe important dans la suspicion d'une dénervation.

- Potentiels positifs ou potentiels lents de dénervation :
Les potentiels lents se rencontrent dans les lésions neurogènes périphériques, mais sont moins fréquents que les fibrillations



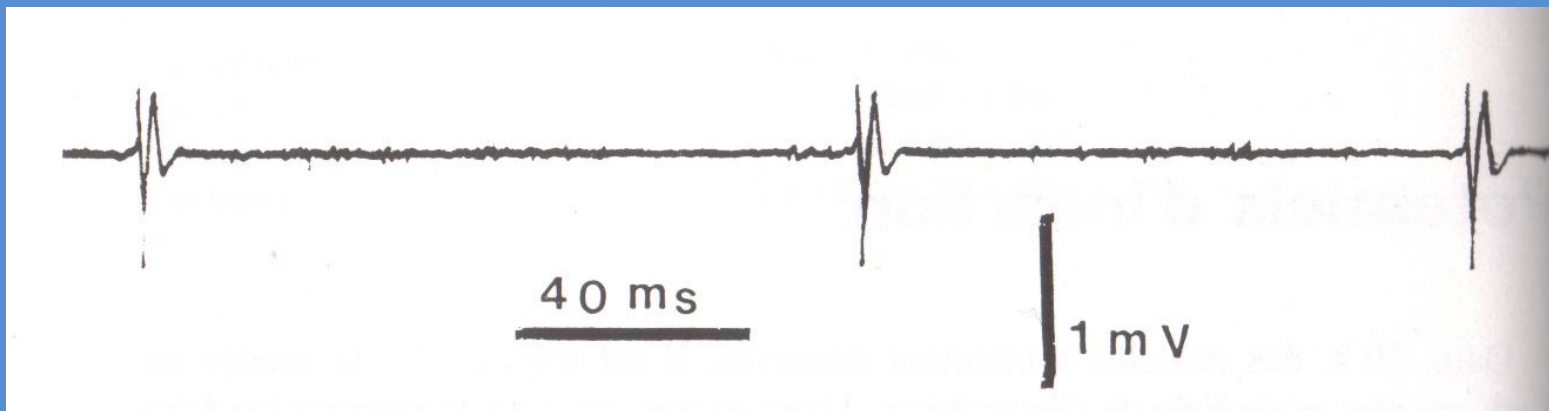
Amplitude	200 à 1000 μV
Durée	15 à 100 ms
Morphologie	biphasique
Fréquence	2 à 10 Hz

- Fasciculations :

Ces potentiels correspondent à la décharge spontanée d'unités motrices individuelles

Leurs morphologies sont identiques à celles des potentiels d'action moteurs normaux

On enregistre cette activité spontanée dans les atteintes chroniques des cornes ventrales de la moelle (sclérose latérale amyotrophique SLA), dans les compressions médullaires par tumeur



- Fasciculations (suite) :

Tous ces potentiels peuvent être dérivés de muscles sans la moindre contraction volontaire

L'apparition de ces potentiels signifie que le motoneurone est dans un état d'hyperexcitabilité ce qui provoque une activité spontanée.

En général, plusieurs motoneurones activés de manière synchrone
→ forme polyphasique des potentiels

- Potentiels myopathiques :

Disparition de certaines fibres musculaires → densité des fibres diminue → raccourcissement de la durée moyenne du potentiel

→ diminution de l'amplitude du potentiel

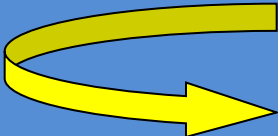
→ aspect polyphasique du potentiel

- Potentiels myopathiques (suite) :



- Faible amplitude (25 à 100μV)
- Courte durée (1 à 2ms)
- Forme polyphasique

Examen d'électroneuromyographie (« EMG »)

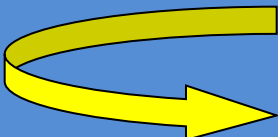
- 
- Electrodiagnostic de détection
→ Electromyographie (EMG)



EMG global ou cinésiologique



EMG élémentaire ou analytique

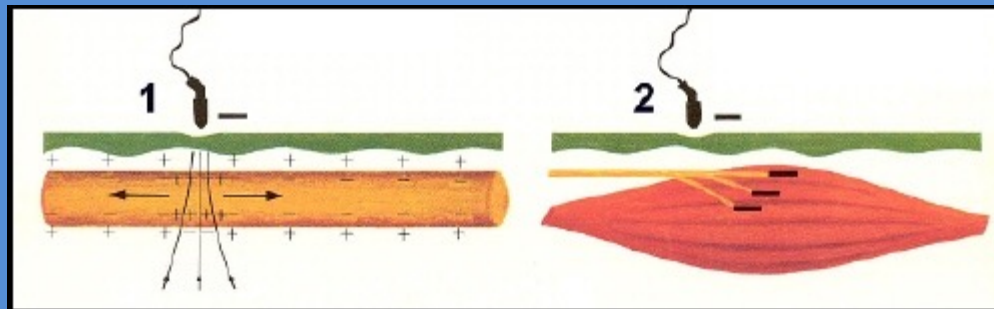
- 
- Electrodiagnostic de stimulation
→ Vitesse de conduction nerveuse

Electrodiagnostic de stimulation : **muscle**

Principe :

- On stimule les structures neuromusculaires par des impulsions électriques aux paramètres variables caractérisés par trois éléments principaux.

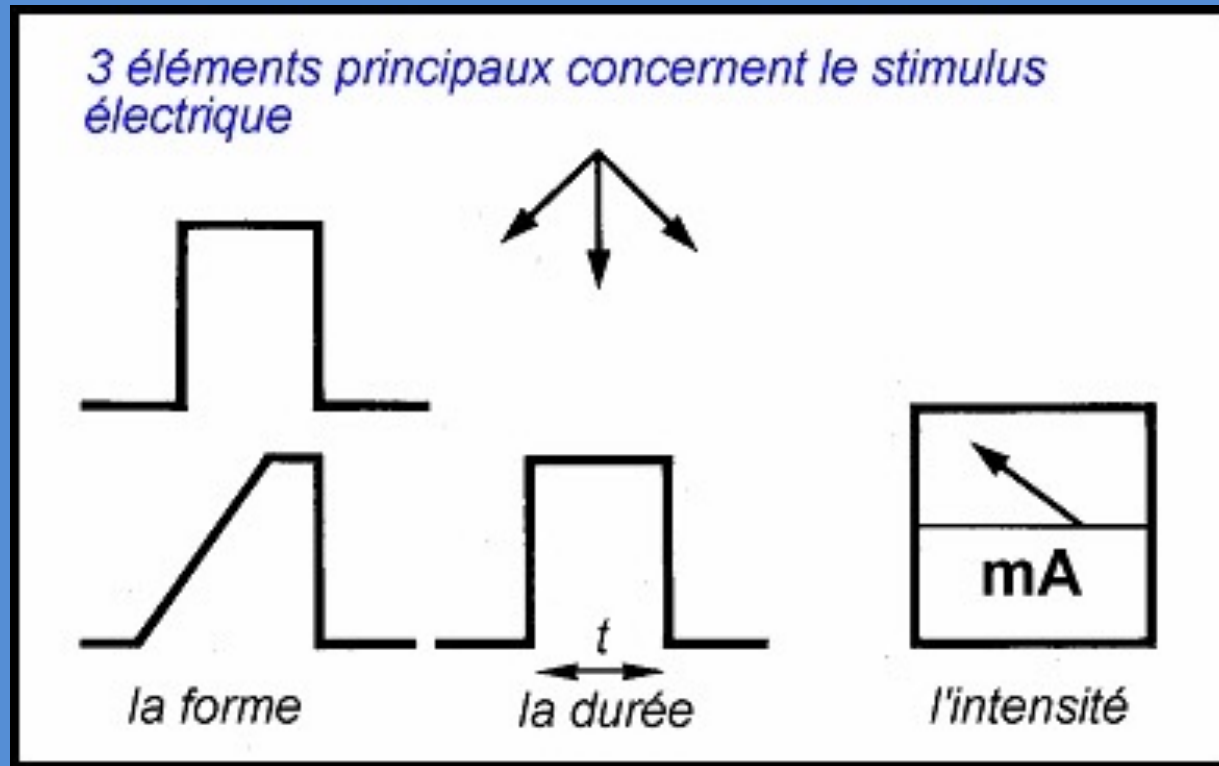
La stimulation est effectuée au niveau du point moteur du nerf ou du muscle, sauf au cours des dégénérescences où celle-ci est effectuée d'une manière longitudinale. En effet, dans les syndromes de dénerivation, le point moteur disparaît.



1. Point moteur nerveux 2. Point moteur musculaire

3 grands paramètres de stimulation peuvent variés :

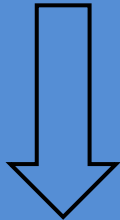
- La forme du signal électrique (carré, rampe, impulsionnelle,...)
- La durée de la stimulation
- L'intensité de la stimulation



Electrodiagnostic de stimulation

```
graph TD; A[Electrodiagnostic de stimulation] --> B[Electrodiagnostic quantitatif]; A --> C[Electrodiagnostic qualitatif]; B --> D[Étudie la réponse motrice en considérant sa morphologie, ses conditions d'apparition, son amplitude.]; C --> E[Mesure les conditions d'excitabilité de la réponse musculaire, la vitesse d'excitabilité, la chronaxie et les divers indices chronaxiques.]
```

Electrodiagnostic quantitatif



Étudie la réponse motrice en considérant sa morphologie, ses conditions d'apparition, son amplitude.

Electrodiagnostic qualitatif



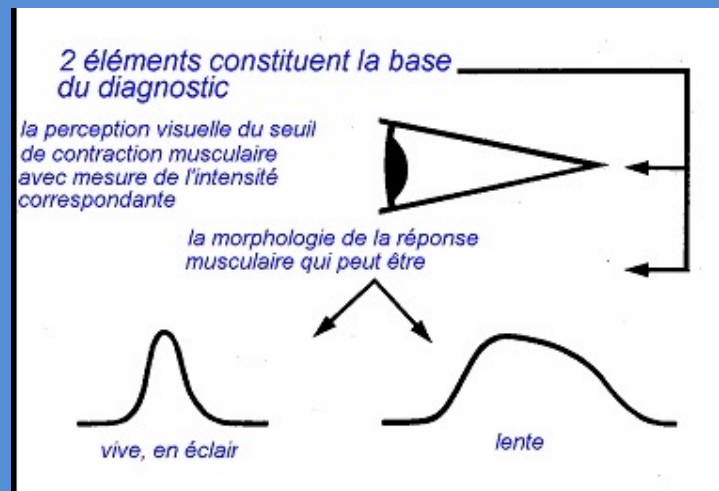
Mesure les conditions d'excitabilité de la réponse musculaire, la vitesse d'excitabilité, la chronaxie et les divers indices chronaxiques.

Electrodiagnostic qualitatif :

2 principaux facteurs sont à retenir :

- Le **seuil** : la plus petite contraction musculaire décelable « à fleur de peau »
- La **morphologie** de la réponse musculaire, qui peut être vive, en éclair, ou bien lente.

Ce dernier caractère présente un intérêt primordial au cours des processus de dégénérescence. En effet, la dénervation musculaire est caractérisée par une lenteur de la réponse.



Electrodiagnostic quantitatif :

Il comprend plusieurs types d'examens et de mesures

- L'examen en galvano-faradique

Cet examen permet de différencier un muscle sain d'un muscle dénervé. Test le plus connu et le plus pratiqué

Stimulations au moyen d'impulsions de courte durée (1 ms) et de longue durée (100 ms et plus)

Courant bref : stimulation faradique

Courant continu : stimulation galvanique

Au moyen de ces deux modalités de stimulation (galvanique et faradique), on mesure l'intensité ou le voltage liminaire nécessaire pour obtenir la contraction du muscle.

Si le muscle ne répond pas à un courant bref (faradique) alors il est dénervé. Ce même muscle répondra par contre à un courant continu (galvanique).

L'intensité-seuil aux stimulations galvaniques porte le nom de Rhéobase.

La rhéobase est donc défini comme l'intensité la plus faible du stimulus de durée infinie, susceptible d'évoquer une réponse artificielle du muscle

- Les courbes intensité-durée

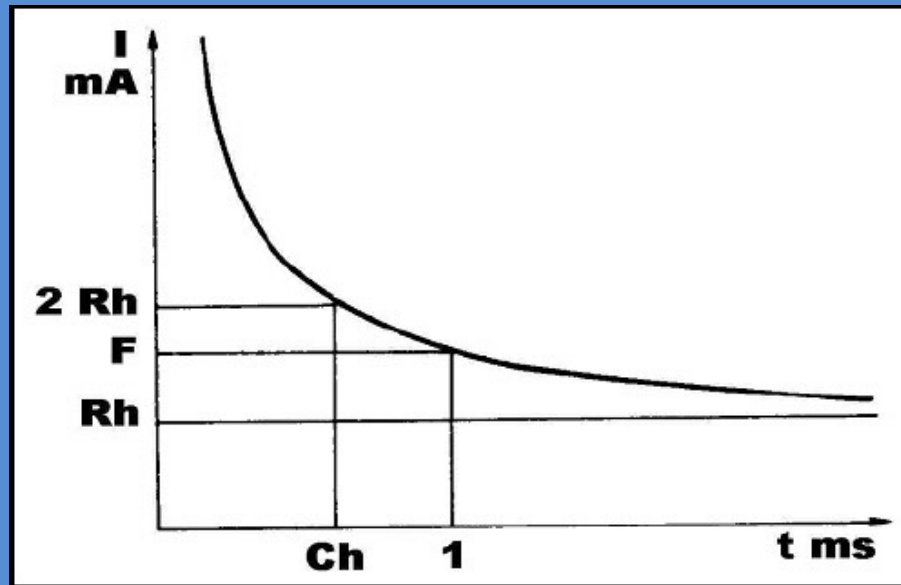
On stimule avec des impulsions dont on fait varier progressivement la durée

On trace alors un graphe sur lequel on inscrit sur l'axe des abscisses, la durée et on note en ordonnée l'intensité-seuil du stimulus

On obtient pour des structures neuromusculaires normales une hyperbole

La Rhéobase (Rh) s'inscrit en ordonnée en un point correspondant à l'asymptote horizontale

Le Seuil Faradique (F) s'inscrit aussi en ordonnée en un point correspondant à une abscisse de 1 ms.



Courbe valable pour tous les types de nerfs

- La chronaxie :

Afin de disposer d'une valeur caractéristique de l'excitabilité d'un tissu, Lapicque a défini une valeur de temps: la chronaxie.

C'est le temps pendant lequel il faut faire passer un courant d'intensité double de celle de la rhéobase pour atteindre le seuil.

Il s'agit d'un indice de la rapidité fonctionnelle d'un tissu, caractéristique de celui-ci.

Il faut savoir qu'il existe un parallélisme entre la grandeur de la chronaxie et d'autres caractéristiques fonctionnelles telle que la durée de la période réfractaire absolue ou la vitesse de conduction.

La mesure des chronaxies constitue un moyen d'électrodiagnostic précieux, indépendant des conditions expérimentales, mesurable en valeurs absolues.

- Le test d'excitabilité (Nerve Excitability Test)

Ce procédé (Laumans, 1965) consiste à mesurer l'intensité liminaire pour une durée d'impulsion fixe et prédéterminée (0,3 ms), d'une manière bilatérale et symétrique.

→ quelle intensité pour obtenir l'excitation du nerf ?

Il est principalement utilisé en ORL pour suivre l'évolution des paralysies faciales idiopathiques (PF) durant la phase aiguë (12 premiers jours) sous le nom de test de Hilger.

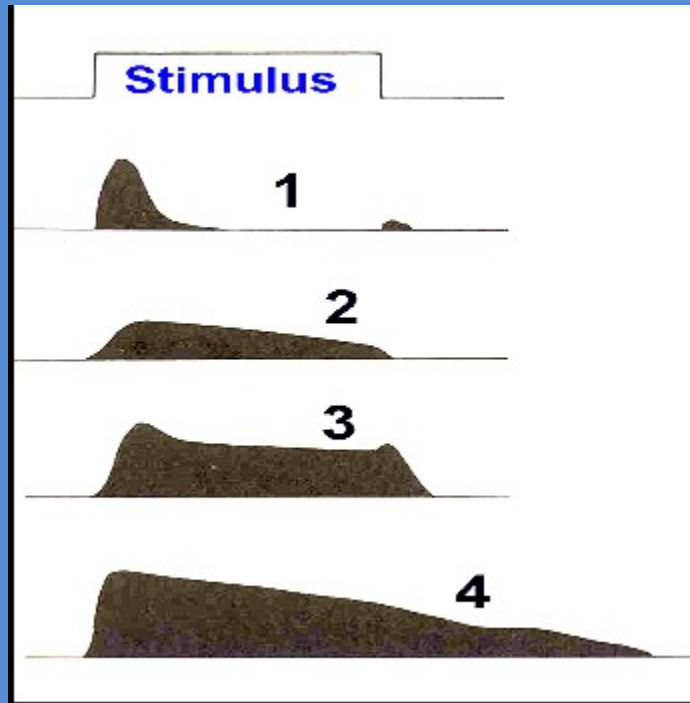
L'intérêt de ce test repose sur le fait qu'il n'est pas invasif et qu'il est réalisé en quelques minutes.

- L'indice galvanotonique

On peut voir, à partir d'un certain seuil galvanique, la contraction musculaire durer durant tout le temps de passage du courant, c'est le seuil galvanotonique.

Sur un muscle normal, il apparaît pour une intensité dépassant la double rhéobase.

Le rapport (Seuil galvanotonique) / (Rhéobase) = Indice galvanotonique.



Différentes réponses musculaires qualitatives lors d'un stimulus rectangulaire de longue durée

Electrodiagnostic de stimulation : nerfs

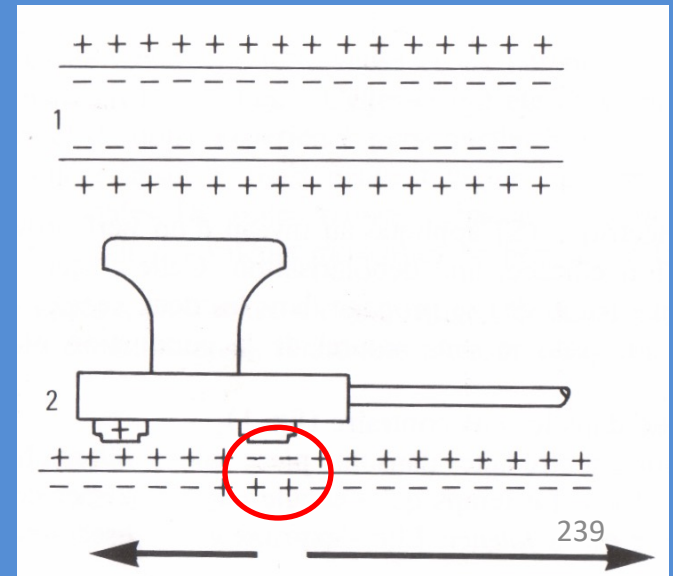
(Stimulo-détection)

Ce sont aussi toutes les méthodes d'étude des conductions nerveuses

- Principe :

Un stimulus électrique (S) appliqué au niveau d'un nerf provoque, pour un certain seuil de stimulation, une dépolarisation. Celle-ci qui se produit sous l'électrode négative (cathode) se propage dans les sens :

- Orthodromique c'est-à-dire dans le sens naturel de la conduction physiologique du nerf (vers SN central)
- Antidromique dans le sens contraire (vers SN périphérique)



- La stimulation :

En général, on utilise deux électrodes de surface fixées sur un soquet, séparées l'une de l'autre de 25mm.



On peut aussi utiliser un stimulateur électrique composé de deux électrodes

Les paramètres de stimulation sont variables en terme de durée (0,1 à 0,5ms), de fréquence de stimulation (1 ou 0,5 Hz), intensité (supramaximale)

Le temps qui s'écoule entre le stimulus et la réponse évoquée est appelée latence. Elle s'exprime en millisecondes.

Plus on stimule loin de l'électrode réceptrice plus la latence est longue

Étude de la conduction nerveuse motrice

L'influx nerveux électriquement provoqué engendre une réponse électrique musculaire enregistrée par une électrode

La vitesse de conduction nerveuse motrice (VCNM) est égale au rapport de la distance entre les deux points de stimulation et la différence des latences

$$\text{VCNM} = \frac{\text{distance entre le pt de stim 1 et 2 (mm)} \quad d}{\text{Latence de 2 – Latence de 1 (msec)} \quad t}$$

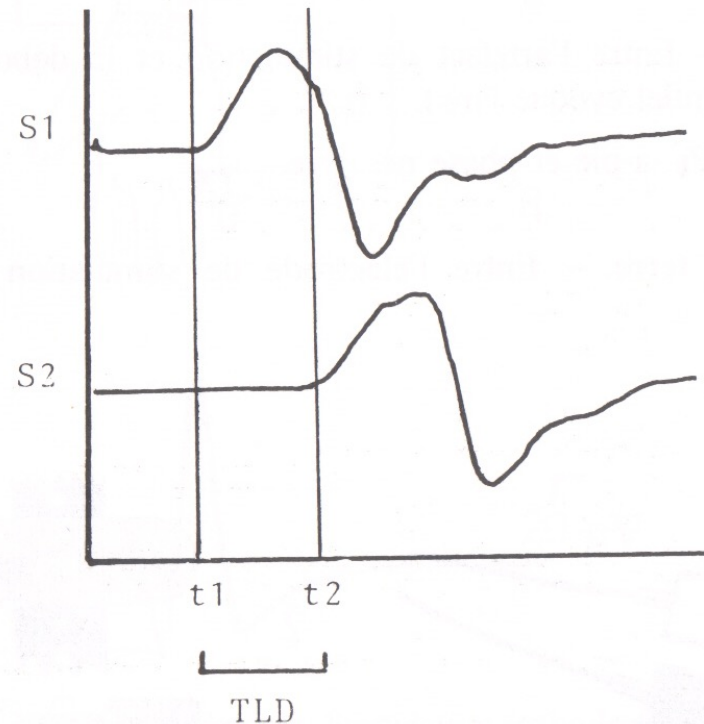
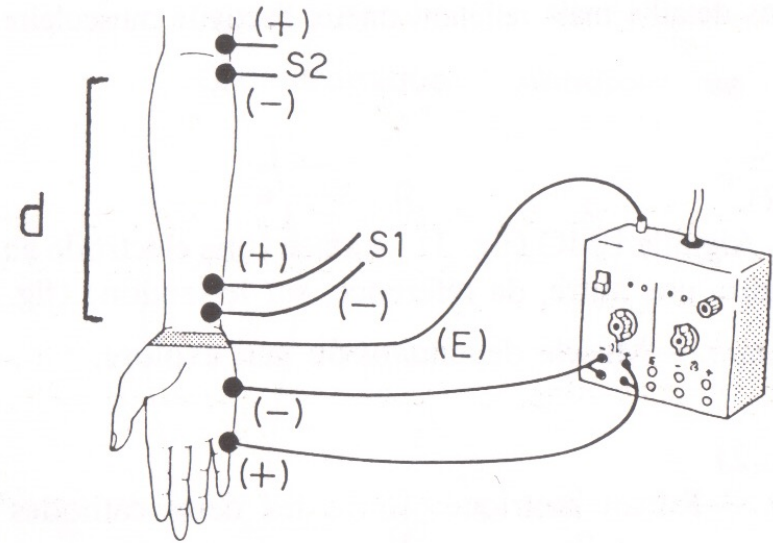
S1, S2 : Points de stimulation

E: électrode de masse

d: distance entre les points de stimulation (mm)

t1, t2: latences

TLD: temps de latence distale (t2-t1)



Électrodes de
surface
(réception)



stimulateur

Étude de la conduction nerveuse sensitive :

L'influx nerveux électriquement provoqué se traduit par un potentiel d'action qui peut être enregistré sur le trajet du nerf.

La vitesse de conduction nerveuse sensitive (VCNS) s'exprime par le rapport de la distance stimulus-réponse à la latence

$$\text{VCNS} = \frac{\text{Distance stimulus-réponse}}{\text{Latence}} = \frac{d}{t}$$

S: électrode de stimulation

R: électrode de détection

Cercle noir: cathode

t: latence

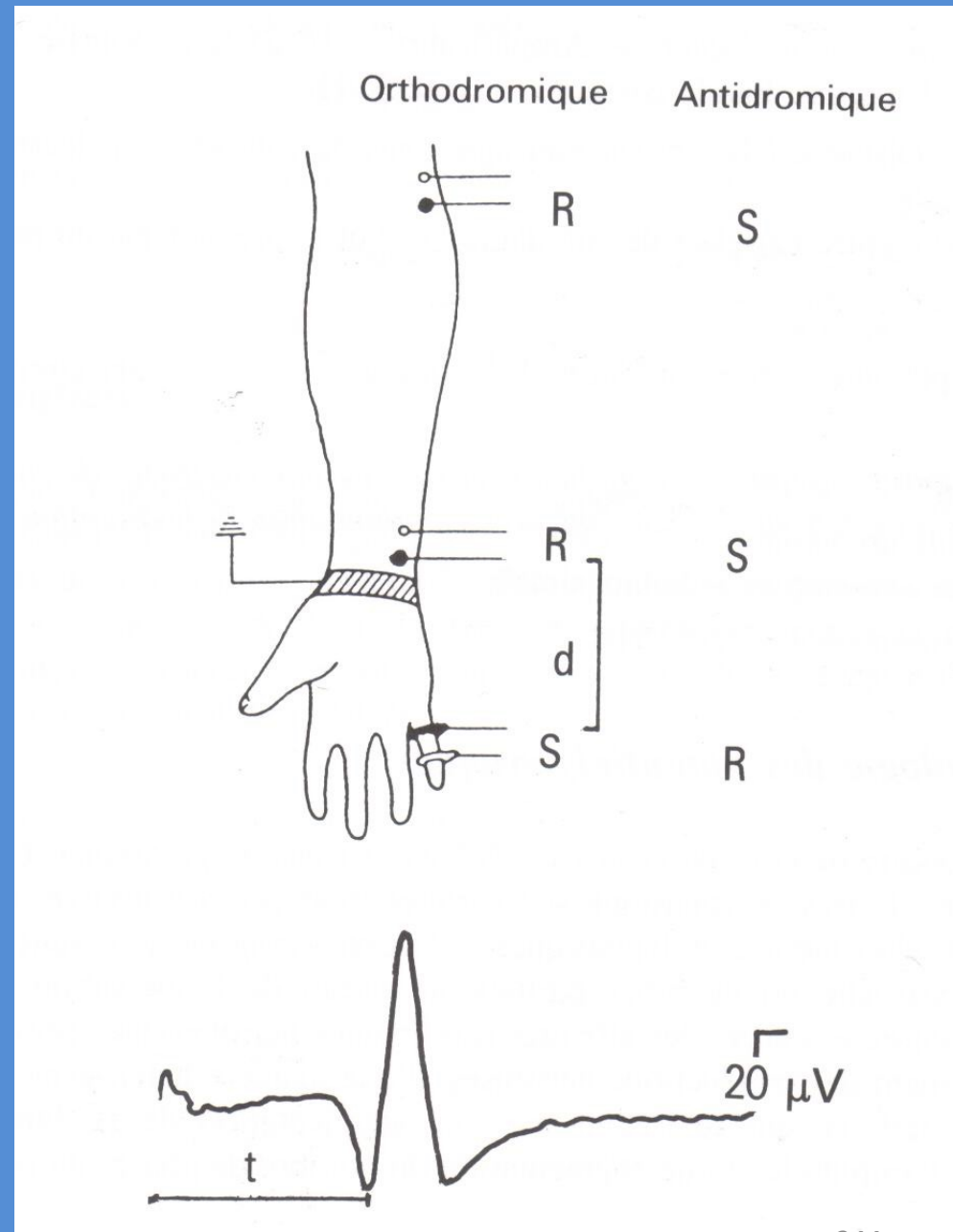
d: distance stimulus-réception



stimulateur



*Électrodes de surface
(réception)*



Valeurs « standardisées »

La conduction motrice :

Latence des membres supérieures < 3,7ms

inférieures < 5ms

Amplitude au membre supérieur > 5mV

inférieur > 4mV

La conduction sensitive :

VCS au membre supérieur : 40 à 45 m/sec

inférieur : 30 à 35 m/sec

Amplitude au membre supérieur > 10 μ V

inférieur > 5 μ V

Exemples :

	MEDIAN	CUBITAL	RADIAL	SPE	SPI
MOTEUR					
LATENCE (msec.)	< 4,2	< 3,6		< 5	< 6
VCM (m/sec.)	> 45	> 46	> 40	> 42	> 42
AMPLITUDE (mv)	> 4	> 4	> 2,5	> 2	> 4,5
SENSITIF					SURAL
VCS distale (m/sec.)	> 45	> 45	> 50		> 40
VCS proximale (m/sec.)	> 55	> 52			
AMPLITUDE (uv)	> 14	> 8	> 18		> 4,5