

# Anatomie et physiologie du muscle squelettique, du tendon et du ligament

On dénombre environ 600 muscles squelettiques chez l'homme, représentant 40 à 45 % de la masse corporelle totale. Ils sont dits « volontaires », c'est-à-dire sous le contrôle du système nerveux central (SNC) et sont les effecteurs des bras de levier ostéo-articulaires. Ils s'opposent aux muscles lisses (intestin, vessie, bronches...) ou au muscle cardiaque dont l'activité est sous la dépendance du système nerveux autonome.

Dans la chaîne dynamique assurant le mouvement, le tendon transmet les forces du muscle à l'os. Cette chaîne structurelle et fonctionnelle est une entité adaptée, avec des liens étroits entre structure et fonction, permettant un rendement maximum pour un minimum d'effort. À cela s'ajoute la viscoélasticité de l'ensemble qui assure un amortissement et une répartition des contraintes avec une certaine marge de sécurité.

## Anatomie du muscle : du muscle entier au myofilament

### Anatomie macroscopique

On distingue :

- des muscles longs, fusiformes, dont le corps charnu, renflé, se termine par un à quatre tendons (bi-, tri-, quadriceps);
  - des muscles plats (ex. : grand pectoral, diaphragme);
  - des muscles courts ou annulaires (ex. : muscles sphinctériens, orbiculaire des lèvres).
- Selon leur fonction principale, on décrit :
- muscles agonistes, responsables d'un mouvement (ex. : flexion du coude → biceps brachial);

- muscles antagonistes qui s'opposent à ce mouvement (ex. : flexion du coude → triceps brachial);
- muscles synergiques qui aident les agonistes en rajoutant de la force à la contraction des agonistes;
- muscles fixateurs : muscles synergiques qui immobilisent une articulation (ex. : muscles fixateurs de l'épaule qui immobilisent la scapula).

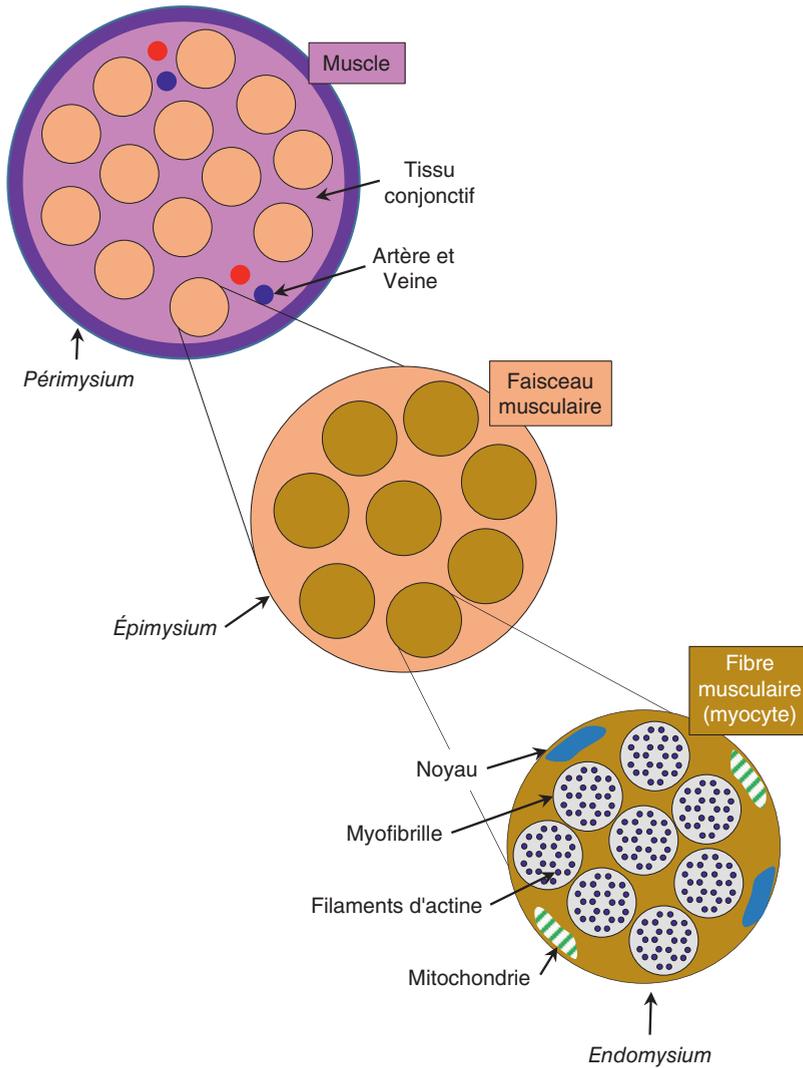
### Anatomie microscopique

Un muscle squelettique est constitué de cellules musculaires ou myocytes maintenues groupées par du tissu conjonctif dans lequel cheminent vaisseaux et nerfs (figure 4.1). La membrane plasmique de la cellule musculaire est appelée sarcolemme et son réticulum endoplasmique, réticulum sarcoplasmique.

Le myocyte, est une cellule géante plurinucléée, encore appelée « fibre musculaire » à cause de sa forme très allongée, cylindrique. Sa longueur peut atteindre 20 cm. La majeure partie du cytoplasme contient de fines fibres, les myofibrilles. Le regroupement de plusieurs fibres musculaires constitue un faisceau musculaire.

Les myofibrilles sont parallèles au grand axe de la cellule et sont constituées d'éléments répétitifs (les sarcomères) abouchés les uns aux autres. Il en existe deux types :

- des filaments épais, longues protéines contractiles de myosine, porteuses de site actif pour fixer l'actine et l'ATP (fournisseur de l'énergie nécessaire à la contraction) et localisées dans le centre du sarcomère;
- des filaments fins, protéines contractiles d'actine et de deux autres protéines : la troponine et la tropomyosine, qui régulent la contraction.

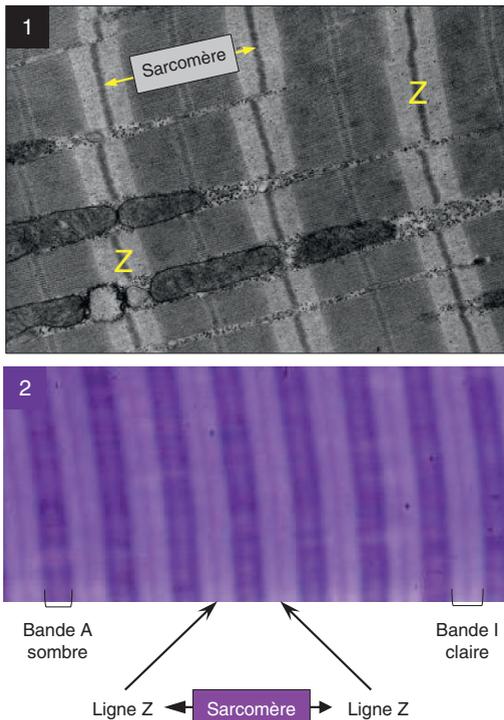


**Figure 4.1. Structure du muscle squelettique.**

Il est constitué des faisceaux musculaires noyés dans un tissu conjonctif de soutien, qui contiennent des fibres musculaires (myocytes) qui contiennent des microfibrilles. Cette organisation rappelle celle d'un nerf.

Chaque sarcomère contient deux filaments fins, un à chaque extrémité. Une extrémité se connecte, par des protéines de liaison (ligne Z), avec le fin filament du sarcomère voisin, l'autre est libre, enchevêtrée entre les filaments de myosine.

Sous microscope (figure 4.2), les alternances de zones où chevauchent les deux types de myofibrilles (zones foncées) et les zones où ne sont présents que les filaments fins (zones claires) donnent un aspect strié (d'où le terme de muscle strié). L'espace entre deux lignes Z est l'unité de base, le sarcomère. Ces unités se répètent à la queue leu leu.



**Figure 4.2.** Plusieurs myofibrilles accolées (1) vues en microscopie électronique (grossissement  $\times 20\,000$ ) et (2) en microscopie optique. Source figure 1 : *Pathophysiology, Fourth Edition, 9781416055433, Lee-Ellen C. Copstead, Jacquelyn L. Banasik, Elsevier Inc., 2010*

## Mécanismes moléculaires de la contraction

### Le phénomène mécanique

Lors de la contraction musculaire, les filaments épais et fins gardent la même longueur, mais ils se rapprochent en glissant les uns sur les autres (figure 4.3), entraînant un raccourcissement des sarcomères et donc de la myofibrille.

### Les phénomènes chimiques

Cette contraction mécanique est pilotée par une cascade de réactions chimiques dans lesquelles les ions  $\text{Ca}^{++}$  contenus dans le réticulum sarcoplasmique jouent un rôle majeur. Lorsque la contraction cesse, le cycle des réactions chimiques s'inverse. De multiples cycles sur l'ensemble des filaments permettent

le raccourcissement global et graduel des sarcomères et le raccourcissement maximal du muscle dépend du nombre de sarcomères impliqués.

### Le phénomène électrique

Les cellules nerveuses qui vont au muscle sont des neurones moteurs (efférents). Ils transmettent les messages électriques à grande vitesse. L'axone se divise en multiples branches terminales, une pour chaque fibre musculaire.

### La jonction neuromusculaire

C'est la réunion de la terminaison de l'axone qui contient des vésicules riches en un neurotransmetteur spécifique : l'acétylcholine et la zone du muscle en regard, appelée « plaque motrice ».

Quand un potentiel d'action (secousse électrique) d'un neurone gagne la terminaison axonale, il libère l'acétylcholine dans la fente synaptique qui se fixe sur ses récepteurs spécifiques de la plaque motrice. Ces récepteurs ainsi activés induisent une dépolarisation de la plaque motrice qui génère un courant électrique qui se propage de proche en proche le long du sarcolemme vers les deux extrémités du muscle (figure 4.4). Ceci libère le  $\text{Ca}^{++}$  qui se fixe sur la troponine et déclenche les phénomènes chimiques et mécaniques de la contraction (figure 4.5).

### Pour la pratique, on retiendra

En clinique, plusieurs étapes de la contraction musculaire peuvent être bloquées :

- La **toxine botulique** (produite par la bactérie *Clostridium botulinum*) bloque la libération de l'acétylcholine de ses vésicules. Responsable d'une intoxication alimentaire (botulisme), elle est utilisée en médecine, par voies locales, pour traiter certaines spasticités ou certaines dermatoses et en médecine esthétique (botox).
- Le **curare**, poison puissant, est un antagoniste de l'acétylcholine dont il prend la place sur les récepteurs membranaires, bloquant ainsi le potentiel de plaque motrice et empêchant la contraction. On l'utilise en anesthésie pour obtenir un relâchement musculaire au cours d'interventions chirurgicales, au prix d'une ventilation assistée puisque les muscles respiratoires sont ainsi paralysés.

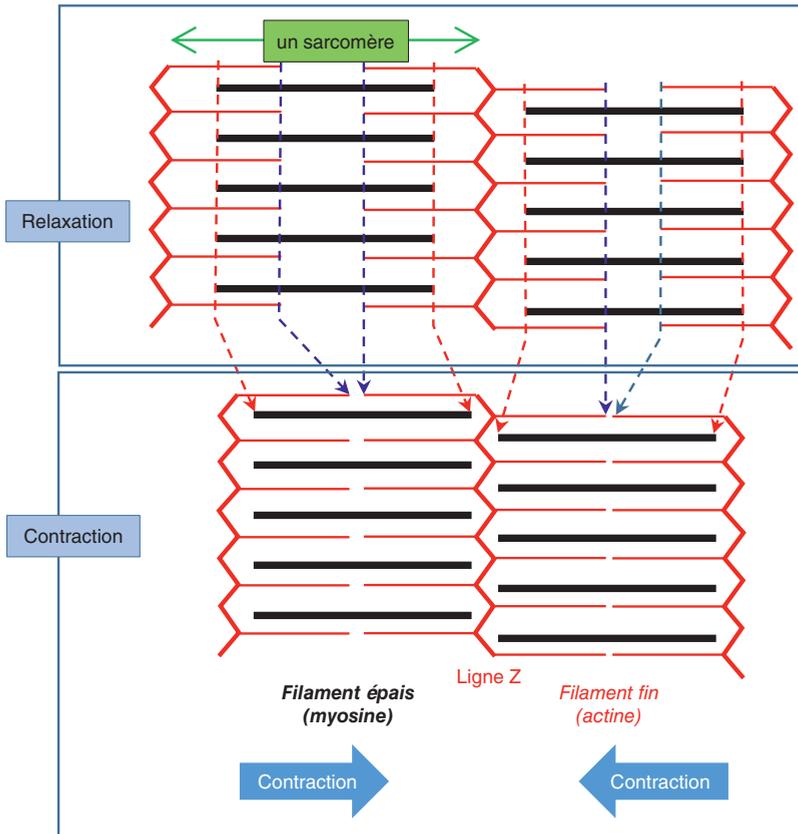


Figure 4.3. Effet de la contraction sur les myofibrilles.

- Certains **composés organophosphorés** (pesticides, gaz neurotoxiques) empêchent la dégradation de l'acétylcholine après usage, bloquant le repolarisation avec le même résultat que le curare : mort par asphyxie.

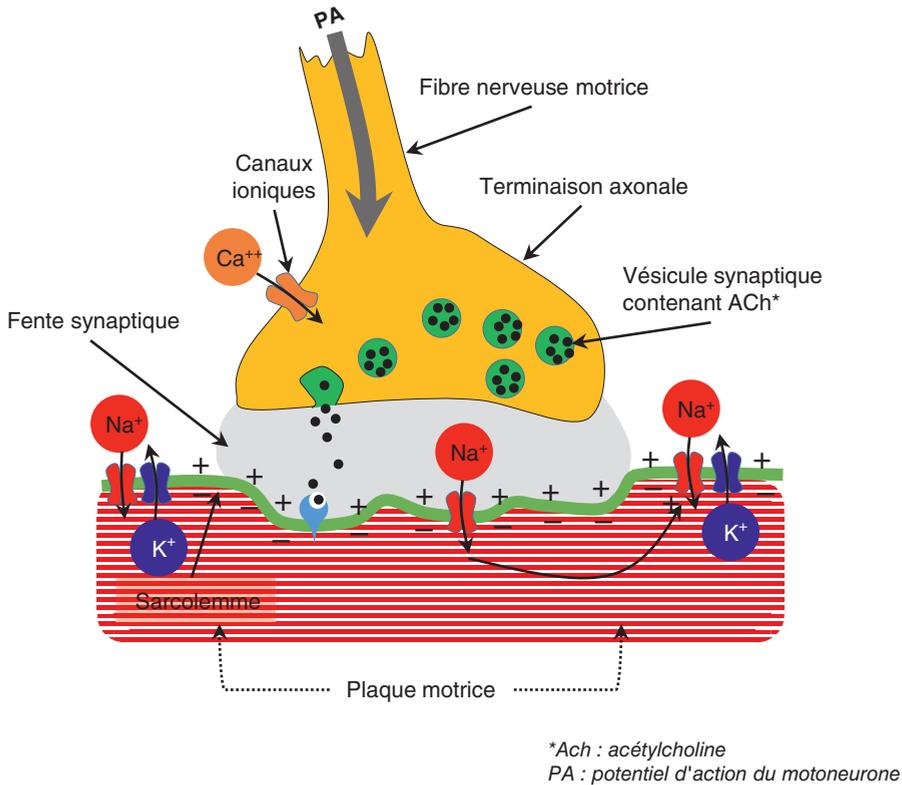
## Anatomie du tendon

Qu'ils soient ronds, longs, plats ou courts, les tendons<sup>1</sup>, bandelettes nacrées, transmettent les forces du muscle à l'os, permettant la mobilisation et la stabilisation articulaire.

<sup>1</sup> On parle ici des tendons principaux, excluant les tendons accessoires (assurant la liaison muscle-muscle), les aponévroses ou les arcades fibreuses d'insertion.

## Un tendon se compose de trois parties

- la jonction muscle-tendon (lame basale) (figure 4.6), zone la plus fragile, est agencée de telle sorte que la plus grande surface de contact existe entre ces deux éléments (pennation) pour mieux répartir les forces de tension qui s'exercent sur les fibres tendineuses;
- le corps tendineux, de longueur extrêmement variable, est blanc nacré;
- la jonction tendon-os (ou enthèse), zone la plus robuste, mais la plus difficile à cicatriser et qui ne régénère pas après lésion. Ces trois parties du tendon ont des vascularisations et des innervations différentes et donc des propriétés, notamment de résistance et de cicatrisation, différentes.



**Figure 4.4. Schéma de la jonction neuromusculaire.**

Un potentiel d'action gagne la terminaison axonale → dépolarisation de la membrane plasmique → ouverture des canaux calciques → entrée du calcium du liquide extracellulaire → libération de l'acétylcholine dans la fente synaptique. Ce neurotransmetteur se fixe sur ses récepteurs spécifiques de la plaque motrice du myocyte (de 10 à 100 millions par jonction neuromusculaire). Ainsi activés, ils ouvrent des canaux ioniques → entrée du sodium et sortie du potassium. Ces mouvements ioniques → dépolarisation de la plaque motrice → potentiel de plaque motrice → potentiel d'action qui se propage de proche en proche le long du sarcolemme vers les deux extrémités du muscle.

Le tendon doit pouvoir assurer ses fonctions en glissant dans des espaces anatomiques étroits. Pour cela, il est entouré d'éléments qui lui sont étroitement liés : gaine synoviale (téno-synoviale), bourses, graisse péri-tendineuse, aponévroses (figure 4.7). Ils pourront être affectés par tout processus pathologique tendineux et inversement, leurs atteintes pourront retentir directement sur le tendon.

Le ligament<sup>2</sup> est une bandelette conjonctive de même constitution que le tendon, mais qui unit deux extrémités osseuses entre elles et en assure la stabilité et le verrouillage articulaire.

## Structure du tendon

Comme tout tissu conjonctif, le tendon est constitué de cellules spécialisées (les ténocytes) enchâssées entre les fibrilles de collagène dans une MEC qu'elles ont elles-mêmes secrétée. On décrit aussi l'existence de cellules souches tendineuses qui assurent le renouvellement des ténocytes, selon les besoins, notamment dans des situations pathologiques.

Au cours de la vie, la cellularité du tendon diminue et parallèlement le diamètre des fibres de collagène augmente jusqu'à l'âge adulte, pour diminuer ensuite avec le vieillissement.

La vascularisation du tendon est assurée aux extrémités par le muscle d'un côté, par l'os de l'autre, mais elle est pauvre dans le corps tendineux proprement dit, provenant des vaisseaux des

<sup>2</sup> Les ligaments reliant des viscères entre eux (ex. : ligament suspenseur du diaphragme) ne sont pas étudiés ici.

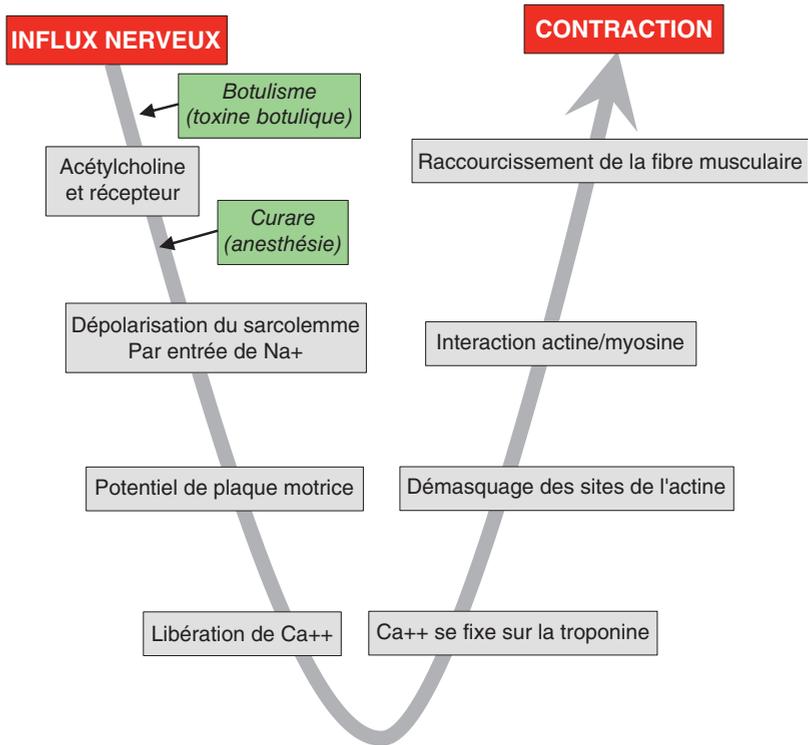


Figure 4.5. Schéma général de la contraction musculaire.

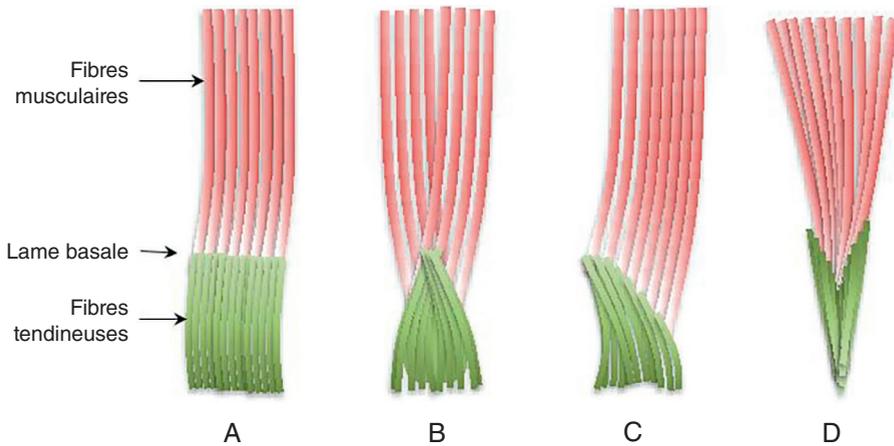
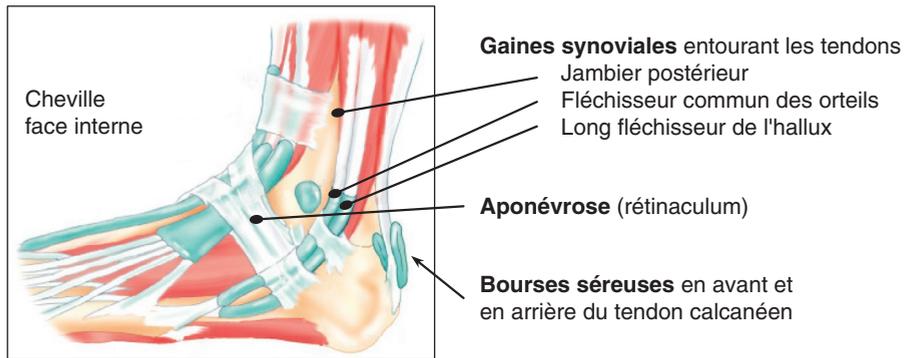


Figure 4.6. Différents types de jonction tendon-muscle (pennation).

Insertions : (a) bout à bout (muscle de l'abdomen); (b) bilatérale (muscles interosseux palmaires); (c) unilatérale (muscle semi-membraneux); (d) dans un cône tendineux.



**Figure 4.7. Annexes péritendineuses.**

Les tendons des extrémités sont entourés d'une gaine synoviale (ex. : tendons de la gouttière calcanéenne) ou de bourses séreuses de glissement (ex. : tendon calcanéen). Ils sont entourés de graisse ainsi que de rétinaclums, épaisissements des fascias aponévrotiques, notamment dans les zones où les tendons changent de direction. *Source : Kinesiology: The Skeletal System and Muscle Function, Fourth Edition, 9780323812764, J. E. Muscolino, Elsevier Inc., 2023.*

enveloppes entourant le tendon. La consommation d'oxygène du tendon est bien moindre que celle du muscle, mais l'exercice physique l'augmente. L'avantage est que le tendon peut supporter des forces pendant une longue période, sans risquer de nécrose. L'inconvénient est que la cicatrisation d'une lésion tendineuse est longue.

## Propriétés physiques du muscle squelettique

Le muscle a cinq propriétés principales.

### La plasticité

Propriété d'un muscle de modifier sa structure selon le travail effectué et à s'adapter au type d'effort à fournir. L'entraînement physique la renforce en augmentant le diamètre des fibres musculaires; le vieillissement, l'immobilisation la diminuent.

### Le tonus musculaire

Fond permanent de contraction musculaire, même au repos (tonus de base).

### L'élasticité et la viscosité

Capacités du muscle à revenir passivement à sa longueur initiale après un étirement ou une contraction. Le muscle ne présente jamais d'élongation résiduelle.

## L'excitabilité

Toutes les fibres musculaires n'ont pas les mêmes caractéristiques structurales et métaboliques. On en distingue différents types, certaines à contraction rapide, d'autres à contraction lente. Toutes les fibres d'une unité motrice sont d'un même type. Au sein d'un muscle, les trois types sont présents en proportion variable déterminée par la génétique.

En athlétisme, le sprinter a besoin de muscles dans lesquels prédominent les fibres à contraction rapide, alors que les muscles du coureur de fond requièrent surtout des fibres à contraction lente. L'entraînement pour tel ou tel sport développe préférentiellement tel ou tel type de fibres.

## La contractilité

La **contractilité** d'un muscle est sa propriété à se raccourcir sous l'influence d'une excitation nerveuse. L'importance de la contraction et sa vitesse sont proportionnelles au nombre d'unités motrices recrutées (recrutement ou sommation spatiale). Il en existe deux types.

## La contraction isométrique (statique)

En l'absence de mouvement, la longueur du muscle reste constante, sa tension augmente. Ce type de contraction ne développe pas la masse musculaire, mais ne présente aucun danger (pas d'étirement) et permet d'obtenir un gain de force. Il est utilisé en début de rééducation.

## La contraction isotonique (dynamique)

La contraction isotonique peut être concentrique (à tension constante, le muscle se contracte activement en se raccourcissant) ou excentrique (le muscle se contracte en s'allongeant : travail passif de résistance).

## Propriétés physiques du tendon

Ses trois propriétés sont :

- la résistance. Le tendon est plus résistant qu'un muscle à l'étirement et peut supporter jusqu'à 17 fois le poids du corps (tendon rotulien);
- l'élasticité : selon le module d'élasticité de Young, les fibres, dans la phase linéaire de déformation, supportent un étirement de 4 à 10 % de sa longueur et la suppression de la contrainte entraîne un retour à la normale (élasticité);
- la flexibilité.

## Quelques applications pratiques

### L'entraînement physique

Le principe est d'augmenter progressivement la charge en augmentant le nombre de contractions/

résistances. Les exercices aérobies (cardio-training) ont aussi un impact sur les systèmes respiratoire et circulatoire pour augmenter l'apport d'oxygène au muscle; les exercices anaérobies (en force) ont aussi un impact sur l'os et les tendons qu'ils renforcent.

La force musculaire peut augmenter après 3 mois d'entraînement physique régulier (3 séances/semaine). Le développement de la masse musculaire est sous la dépendance de facteurs généraux tels que les facteurs génétiques, l'imprégnation hormonale (hormone de croissance, thyroxine, testostérone) et l'alimentation (régimes glucido-protéiques). C'est la base de la diététique du sportif, celle aussi du dopage.

L'arrêt de l'entraînement, à l'inverse, favorise une perte de la force musculaire. La moitié des bénéfices acquis par l'entraînement disparaissent en 4 semaines. En cas d'immobilisation (plâtre pour fracture par exemple), une perte de 20 % de la force musculaire s'observe en une semaine. Le travail isométrique (possible sous plâtre) ralentit cette perte.

## Le vieillissement musculaire : la sarcopénie

Perte de masse musculaire involontaire liée à l'âge (figure 4.8), la sarcopénie entraîne perte de force musculaire, et altération de la qualité contractile du muscle avec, pour conséquence, une limita-

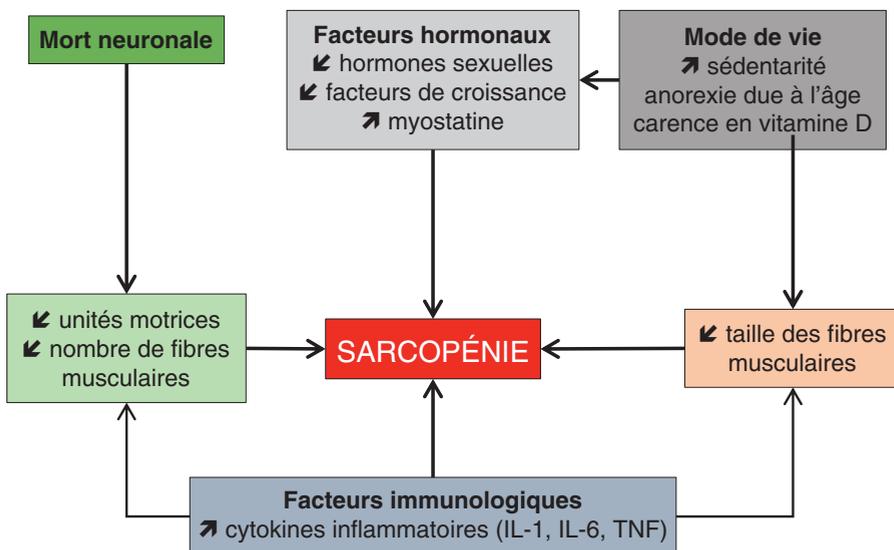


Figure 4.8. Facteurs impliqués dans la sarcopénie.