Chapitre 1
SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE

I – Structures et fonctions

A - Intro :

Le système cardiovasculaire réunit l'ensemble des parties de l'organisme et approvisionne continuellement les muscles en nutriments et en oxygène. En retour l'appareil circulatoire récupère rapidement les produits du métabolisme énergétique.

B - Composantes :

Tout système circulatoire doit comporter :

- une pompe : le cœur
- un système de canaux : les vaisseaux sanguins
- un liquide circulant : le sang

1 – Le cœur :

Le muscle cardiaque ou myocarde , est un muscle strié semblable aux muscles squelettiques.

Il est divisé en 2 compartiments (pompes) distincts séparés par une cloison :

- le **cœur droit** pour la circulation pulmonaire
- le **cœur gauche** pour la circulation systémique

a – Fonctionnement du cœur :

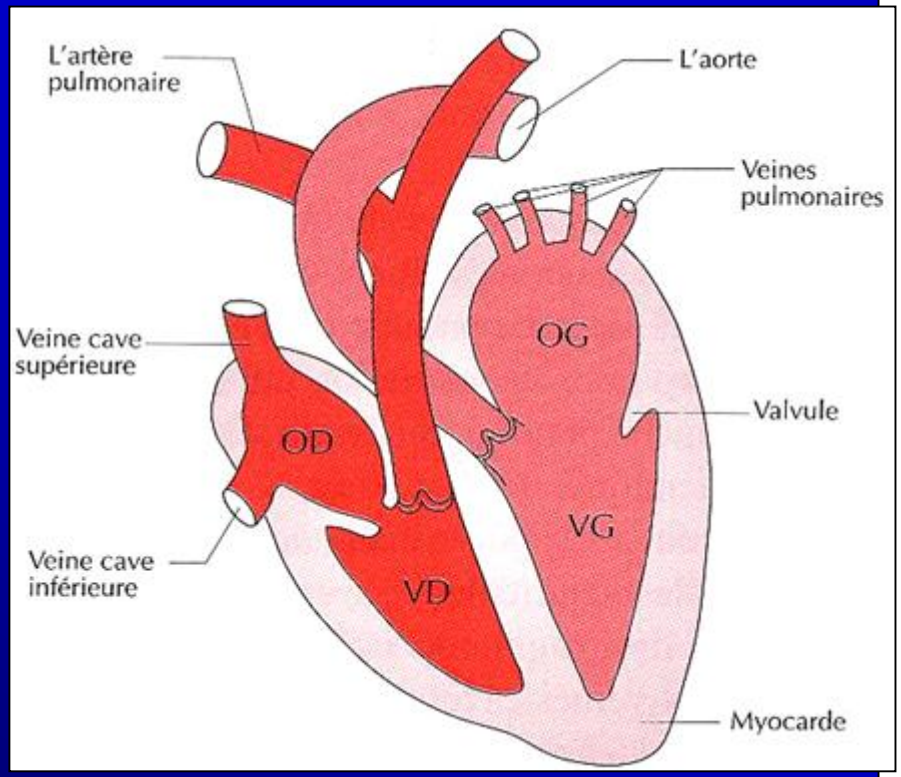
Chaque compartiment se subdivise en 2 cavités : oreillettes et ventricules.

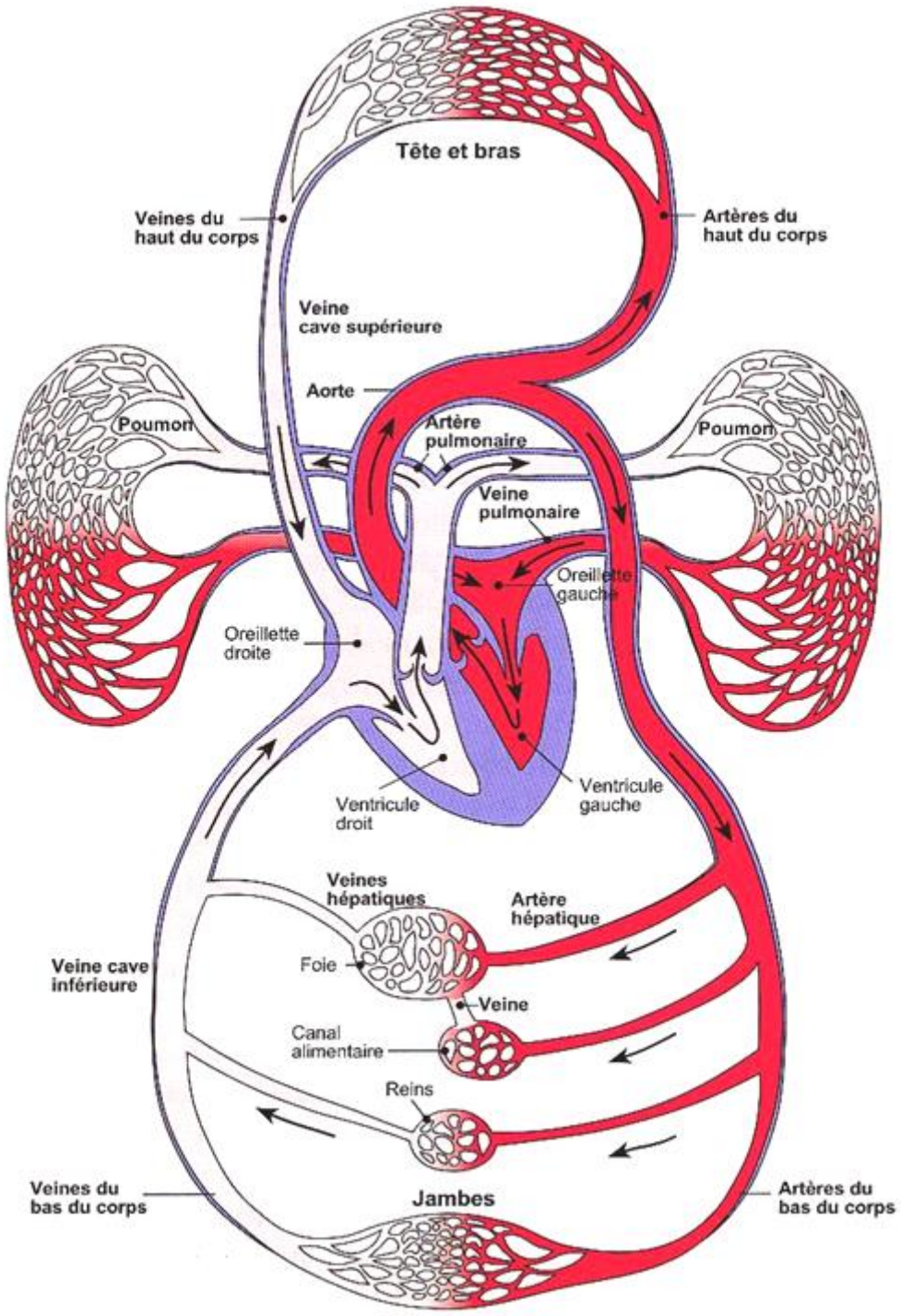
☞ le cœur droit : circulation pulmonaire = petite circulation

- reçoit le sang veineux (pauvre en O_2 et riche en CO_2) de toutes les régions de l'organisme au niveau de l'oreillette droite par les 2 veines caves
- le ventricule droit propulse le sang dans la circulation pulmonaire par l'artère pulmonaire pour l'oxygéner.

☞ le cœur gauche : circulation systémique = grande circulation

- l'oreillette gauche reçoit le sang des poumons par les 4 veines pulmonaires
- le ventricule gauche propulse le sang oxygéné dans l'organisme par l'aorte.


L'artère pulmonaire
L'aorte
Veines pulmonaires
Veine cave supérieure
OG
Valvule
OD
VG
Veine cave inférieure
VD
Myocarde


Tête et bras
Veines du haut du corps
Artères du haut du corps
Veine cave supérieure
Aorte
Poumon
Artère pulmonaire
Poumon
Veine pulmonaire
Oreillette gauche
Oreillette droite
Ventricule droit
Ventricule gauche
Veines hépatiques
Artère hépatique
Veine cave inférieure
Foie
Veine
Canal alimentaire
Reins
Veines du bas du corps
Jambes
Artères du bas du corps

Les valvules permettent d'empêcher le sang de retourner dans son compartiment d'origine au moment où il est propulser.

- valvule tricuspide : entre OD et VD
- valvule mitrale : entre OG et VG
- valvules sigmoïdes :

  aortique : entre VG et aorte

  pulmonaire : entre VD et artère pulmonaire

b – Cycle cardiaque :

Afin d'envoyer le sang riche en oxygène dans l'organisme le cœur doit alterner contraction et relâchement.

☞ la contraction = systole

Pendant la systole les ventricules se contractent et propulsent leur contenu

☞ le relâchement = diastole

pendant la diastole les ventricules se remplissent de sang

Un cycle cardiaque correspond à la succession d'une diastole et d'une systole = révolution cardiaque

b1 – Fréquence cardiaque :

La fréquence cardiaque (FC) correspond au nombre de cycles (battements) par minute.
Chez une population sédentaire elle est au repos d'environ 60 à 80 cycles par minute.

b2 – Volume d'éjection systolique : VES

A chaque systole un certain volume de sang est éjecté du VG.
Ce volume correspond au volume d'éjection systolique VES.
Au repos VES = 60 à 80 mL

b3 – Débit cardiaque :

Le débit cardiaque $\dot{Q}$ correspond au volume sanguin total éjecté par le VG en 1 minute.
C'est donc le produit du VES par la FC.
Au repos le débit cardiaque = 5 à 7 L

$$\dot{Q} = FC \cdot VES$$

b4 – Tension artérielle : pression sanguine

Correspond à la pression exercée par le sang sur la paroi des vaisseaux.

2 - Les vaisseaux sanguins :

Le sang est propulsé par le cœur et acheminé par l'intermédiaire d'un système de canaux, les vaisseaux.

a – Les artères :

Conduisent le sang oxygéné du cœur vers les organes.
Naissent de l'aorte et des artères pulmonaires et se divisent en artérioles et capillaires pour pénétrer dans les tissus.
Leur élasticité joue un rôle important dans la régulation du débit sanguin.

b – Les veines :

Ramènent le sang des organes vers le cœur. Dépourvues de fibres élastiques et présentent au niveau des membres inférieurs des valvules qui permettent de remonter le sang vers le cœur et empêchent son retour en arrière (retour veineux).

c – Les capillaires :

Permettent d'irriguer les tissus.
Assurent la continuité entre artères et veines.

3 – Le sang :

Le sang est constitué de cellules en suspension dans un liquide le plasma. Il est impliqué dans la régulation de nombreuses fonctions physiologiques : transport, T°, équilibre acido-basique.

a – Les cellules sanguines :

a1 – Les globules rouges : hématies

Cellules ne possédant pas de noyau.
L'hémoglobine (Hb) présente dans les hématies contient du fer qui permet le transport de l'O_2.
Chaque molécule d'Hb peut fixer 4 molécules de fer.
Le sang contient 16g d'Hb pour 100 ml de sang soit environ 20 ml d'O2 pour 100 ml de sang.

a2 – Les globules blancs :

Jouent un rôle fondamental dans les défenses de l'organisme.

II – Réponses cardiovasculaires à l'exercice

A - Intro :

Lors de l'exercice, le système cardiovasculaire doit s'adapter pour répondre au mieux à l'augmentation des besoins et pour optimiser les conditions de transport.
Ces adaptations concernes : FC, VES, débits sanguin et cardiaque

1 – La FC :

a – FC de repos :

Chez les sujets entraînés en endurance elle est comprise au repos entre 28 et 40 bpm.
Elle peut augmenter avant le début de l'exercice lors de la libération d'adrénaline par le SN sympathique.
Pour la mesurer efficacement au repos il faut la mesurer le matin au réveil.

b – FC d'exercice :

A l'exercice la FC augmente en fonction de l'intensité d'exercice.
Cette intensité est exprimé par $\dot{V}O_2max$ en laboratoire et VMA sur le terrain.

b1 – FC maximale :

Au cours d'un exercice d'endurance, lorsque le sujet atteint ses possibilités maximales, la FC plafonne.
La FCmax est donc la valeur la plus élevée qui peut être atteinte lors d'un exercice exhaustif.
On peut l'estimer par la formule :

FCmax = 220 - âge (± 10%)

b2 – FC & entraînement :

Avec l'entraînement :
La FCmax d'un sujet entraîné est atteinte plus tardivement que celle d'un sédentaire.
Par contre pour une même intensité d'exercice la FC d'un sujet entraîné se stabilise plus vite et à un seuil plus bas que celle d'un sujet sédentaire.
Le retour à une FC de repos est aussi plus rapide.

2 – Le VES :

a – VES au repos :

Chez les sujets entraînés le VES peut atteindre 110 mL au repos

b – VES à l'exercice :

Le VES augmente jusqu'à une intensité d'exercice de 40 à 60% des possibilités max de l'individu, ensuite il atteint un plateau qui se maintient même si l'exercice est poursuivi jusqu'au maximum.

b1 – VES & entraînement :

Le sujet entraîné présente comme au repos un VES beaucoup plus important pendant l'exercice.

C'est l'amélioration des qualités contractiles du myocarde qui permet au sujet entraîné d'avoir un VES plus important que le sédentaire.

3 – Le débit cardiaque :

a – $\dot{Q}$ au repos :

Chez les sujets entraînés et sédentaires les sujets ont un débit équivalent

Sédentaire = 70 x 71 = 5000 mL
Entraîné = 50 x 100 = 5000mL

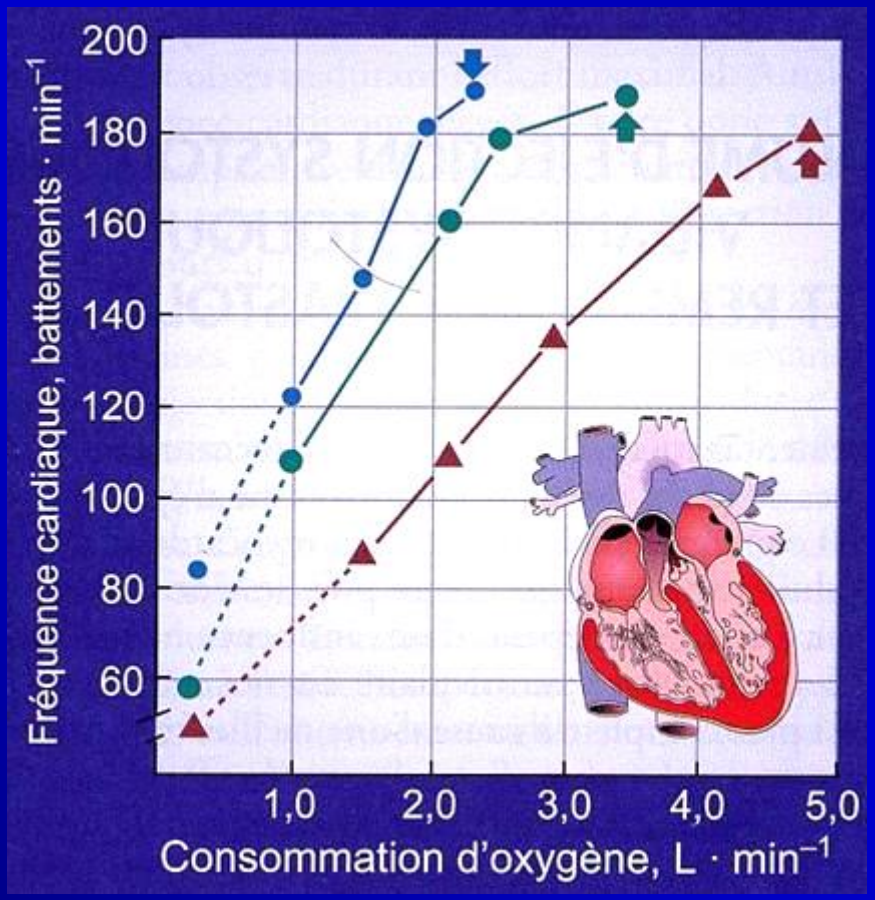
b – $\dot{Q}$ à l'exercice :

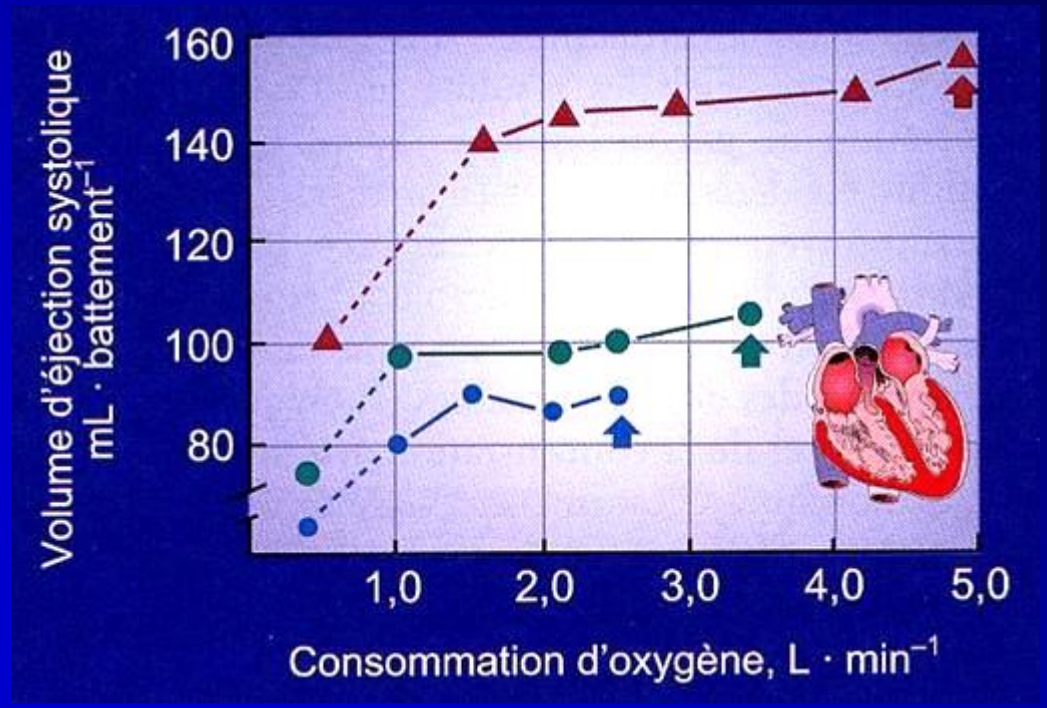
Il augmente proportionnellement avec l'intensité de l'exercice.
Il augmente essentiellement pour répondre à l'augmentation des besoins en O_2 des muscles actifs.

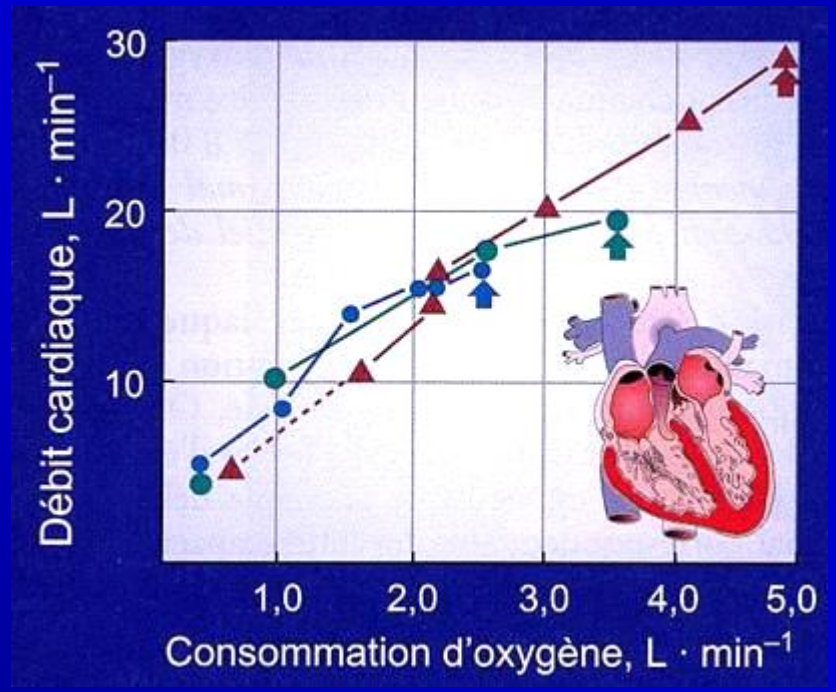
b1 – $\dot{Q}$ & entraînement :

Le débit cardiaque d'un sujet entraîné est supérieur à celui d'un sédentaire au cours d'un exercice maximal.

Sédentaire = 195 x 110 = 21450 mL
Entraîné = 190 x 160 = 30400 mL


Fréquence cardiaque, battements · min⁻¹
200
180
160
140
120
100
80
60
1,0
2,0
3,0
4,0
5,0
Consommation d'oxygène, L · min⁻¹


Volume d'éjection systolique
mL · battement⁻¹
160
140
120
100
80
1,0
2,0
3,0
4,0
5,0
Consommation d'oxygène, L · min⁻¹


Débit cardiaque, L · min⁻¹
30
20
10
1,0
2,0
3,0
4,0
5,0
Consommation d'oxygène, L · min⁻¹

Chapitre 2
SYSTÈME RESPIRATOIRE

I – INTRODUCTION

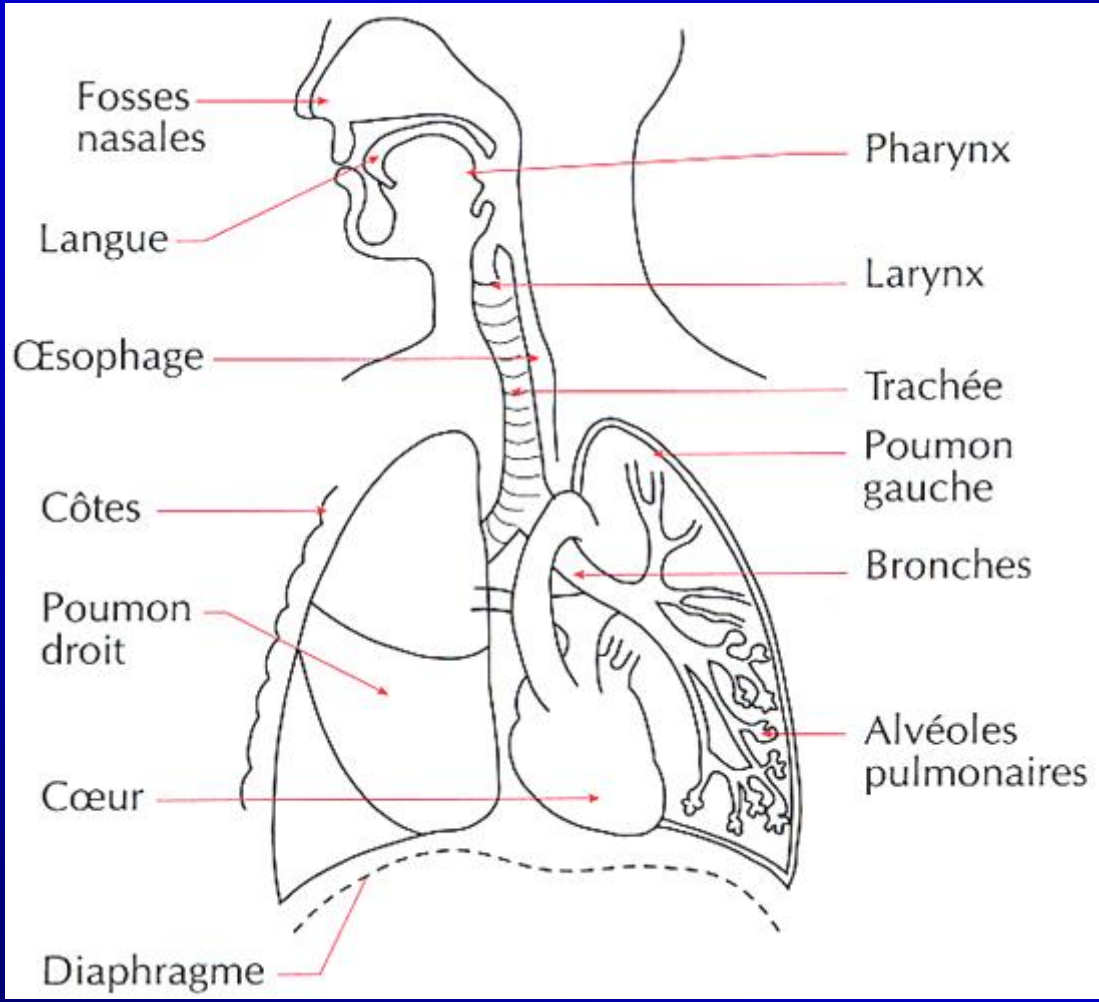
Toutes les cellules consomment du dioxygène (O_2) et rejettent du dioxyde de carbone (CO_2). La principale fonction du système respiratoire est d'amener le O_2 jusqu'aux cellules et de débarrasser l'organisme du CO_2 produit. Différentes étapes permettent d'amener le O_2 jusqu'aux cellules :

- la ventilation pulmonaire, qui permet d'amener le O2 jusqu'aux poumons,
- les échanges gazeux,
- le transport des gaz,
- l'utilisation par les muscles.

II – Structures et fonctions

A - Les voies respiratoires :

Ensemble des voies que l'air emprunte pour aboutir aux poumons : fosses nasales, pharynx, larynx, trachée, bronches.



B - Les poumons :

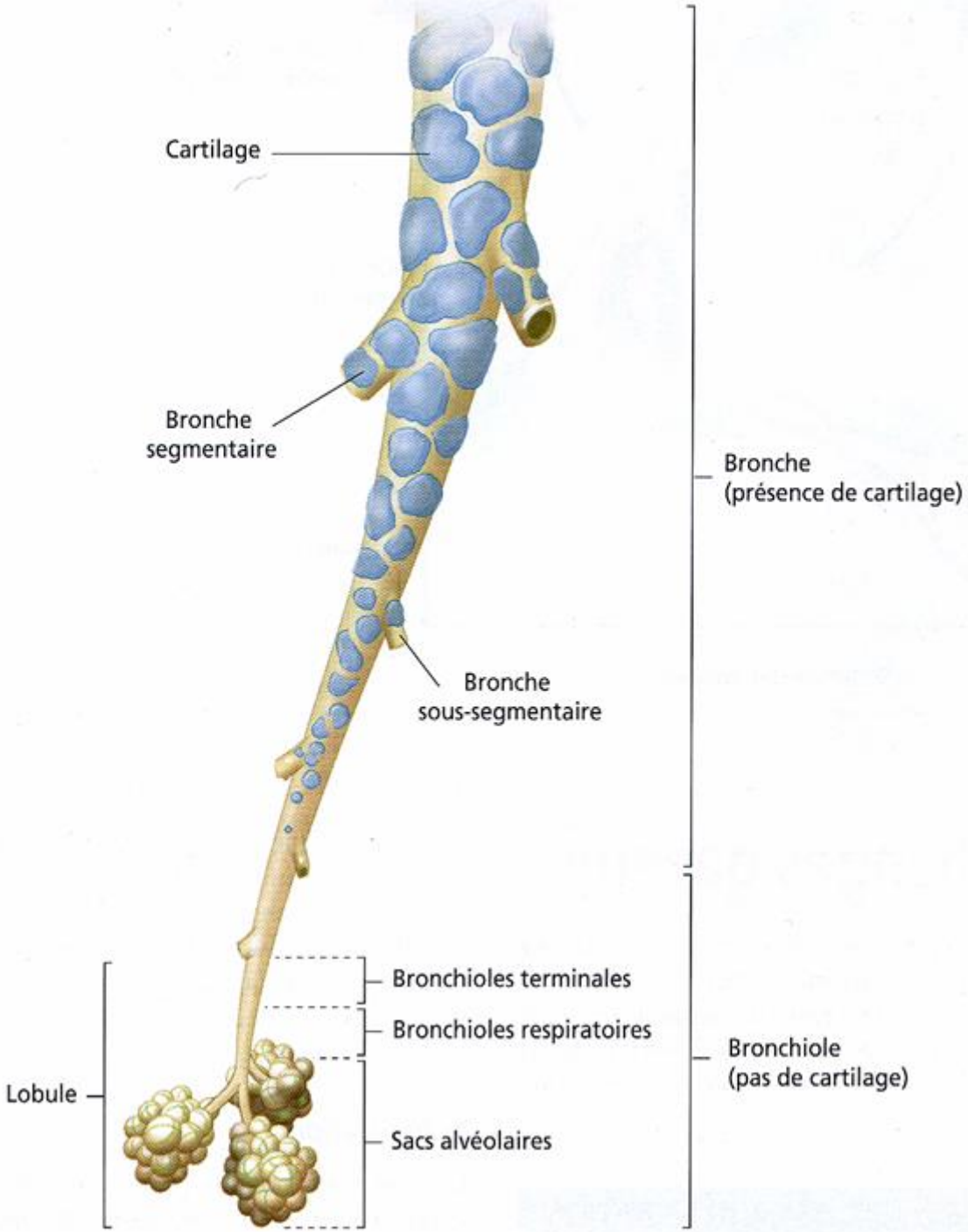
Les 2 poumons sont enfermés dans une enceinte close : la cage thoracique. Ils sont divisés en lobes pulmonaires (3 à droite et 2 à gauche). Chaque lobe est divisé en segments. La plus petite division visible à l'œil nu s'appelle un lobule. Le lobule reçoit une bronchiole, une artériole pulmonaire et donnent naissance à des veinules pulmonaires. La bronchiole se termine par un acinus (unité fonctionnelle du poumon), composée d'alvéoles pulmonaires qui assurent le transfert de l'O_2 dans le sang.

1 – La plèvre pulmonaire :

La plèvre est une une membrane humide constituée de 2 feuillets.

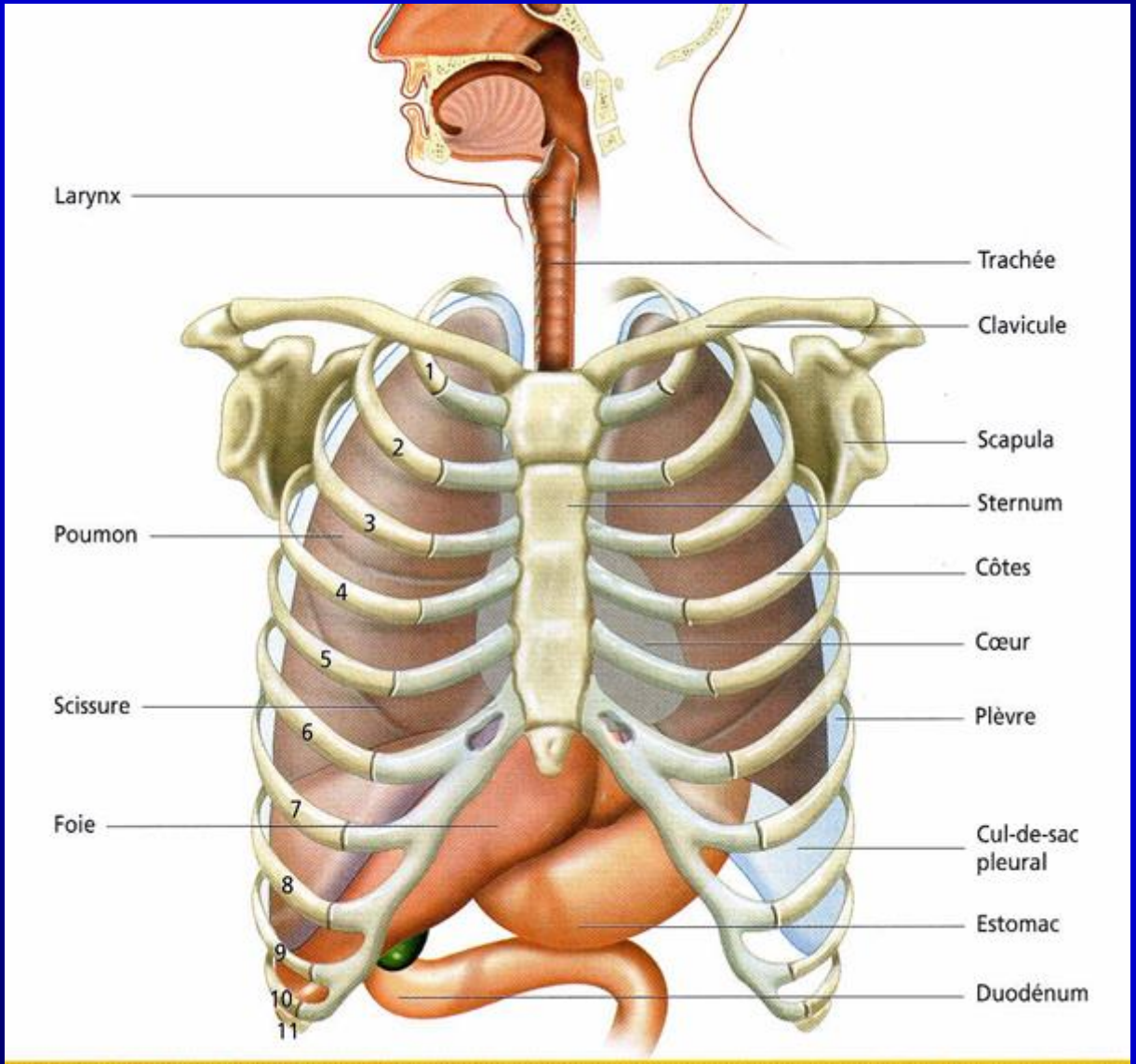
- Le feuillet viscéral a une position interne. Il est accolé au poumon.
- Le feuillet pariétal a une position externe. Il est accolé à la cage thoracique, au diaphragme.

Les feuillets ne se touchent pas. L'espace entre les deux feuillets est appelé le sac pleural. A l'intérieur de ce sac se trouve le liquide pleural, qui permet aux deux feuillets de glisser l'un sur l'autre.


Cartilage
Bronche segmentaire
Bronche sous-segmentaire
Bronche (présence de cartilage)
Bronchioles terminales
Bronchioles respiratoires
Sacs alvéolaires
Lobule
Bronchiole (pas de cartilage)

B - La cage thoracique :

Composée des côtes et du sternum, ce n'est pas une cavité rigide mais déformable grâce à l'élasticité des côtes et des cartilages costaux.



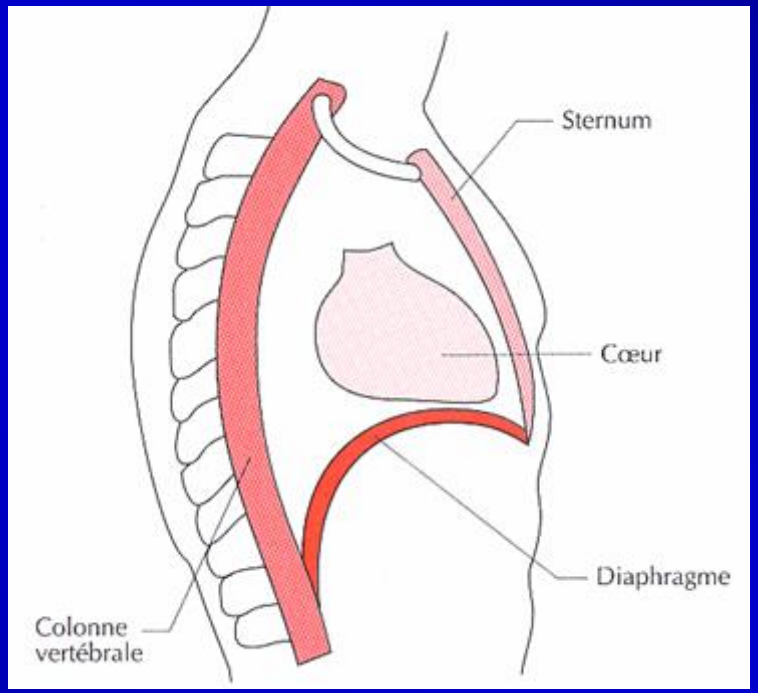
C - Les muscles respiratoires :

1 – muscles inspirateurs :

- le diaphragme est le principal muscle inspirateur, il sépare la cage thoracique de la cavité abdominale.
- les muscles du cou : scalènes et SCM
- les muscles intercostaux externes

2 – muscles expirateurs :

- les abdominaux
- les muscles intercostaux internes



III – La respiration

A - Phénomènes chimiques de la respiration :

1 – La diffusion des gaz :

La diffusion est le déplacement des molécules de gaz d'une région où sa concentration est forte vers une région où sa concentration est faible. Le nombre de molécules de gaz dans le milieu est représenté par la pression partielle (Pa).

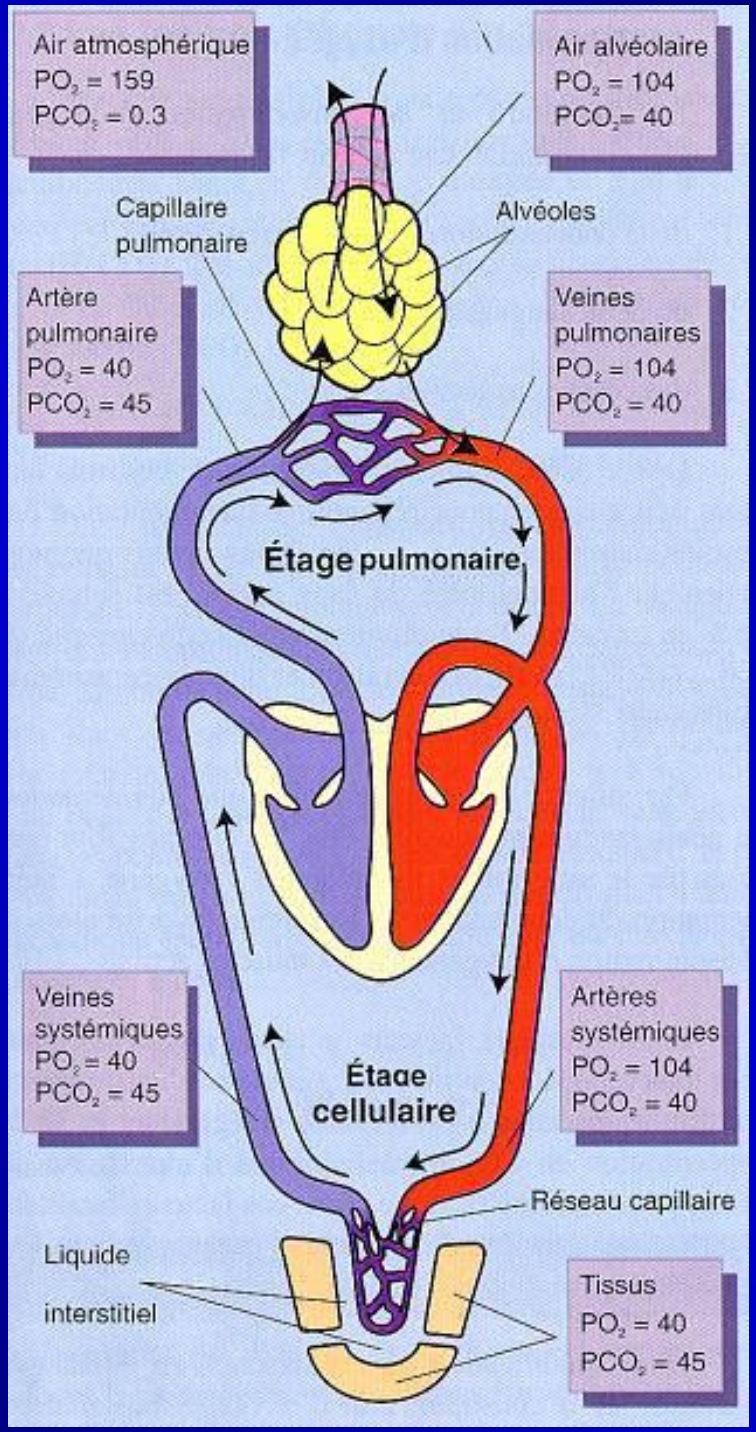
2 – La diffusion alvéolo-capillaire :

Dans l'organisme la diffusion permet les échanges :

- entre les alvéoles et le sang contenu dans les capillaires
- entre les capillaires et les cellules

- La PaO_2 étant plus élevée dans les alvéoles que dans les capillaires, l'O_2 diffuse de ces dernières vers les capillaires.
- Au niveau des cellules ou la PaO_2 intracellulaire est inférieure, l'O_2 diffuse des capillaires vers les cellules.
- Le CO_2 déchet des cellules suit le chemin inverse :

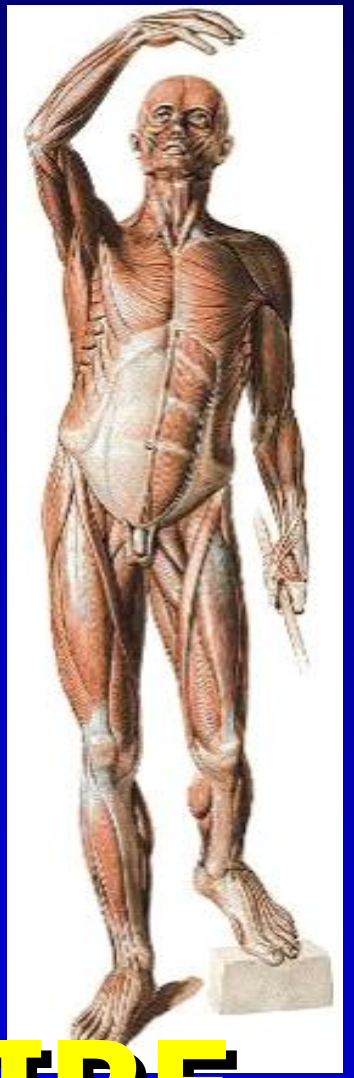
Cellule → capillaire → alvéole


Air atmosphérique
PO_2 = 159
PCO_2 = 0.3
Air alvéolaire
PO_2 = 104
PCO_2 = 40
Capillaire pulmonaire
Alvéoles
Artère pulmonaire
PO_2 = 40
PCO_2 = 45
Veines pulmonaires
PO_2 = 104
PCO_2 = 40
Étage pulmonaire
Veines systémiques
PO_2 = 40
PCO_2 = 45
Étage cellulaire
Artères systémiques
PO_2 = 104
PCO_2 = 40
Réseau capillaire
Liquide interstitiel
Tissus
PO_2 = 40
PCO_2 = 45

3 – Transport O_2 et CO_2:

L'O_2 est combiné de façon réversible à l'Hb sous forme d'oxyhémoglobine HbO_2. Plus la PaO_2 est élevée plus l'O_2 sur fixe sur Hb. Le gradient de pression entre capillaires et tissu permet sa diffusion vers les tissus.

Le CO2 est présent dans le sang sous forme d'ions bicarbonate ou par liaison avec l'Hb. Il est produit localement au niveau des cellules et diffuse par gradient de pression des cellules au sang puis vers les poumons.



Chapitre 3

CONTRÔLE MUSCULAIRE DU MOUVEMENT

I – STRUCTURE DU MUSCLE

A - Structure macroscopique :

A l'intérieur d'un muscle, les fibres ou cellules musculaires sont regroupées en faisceaux.
Chaque fibre est recouverte d'une membrane appelée sarcolemme.

1 – Composition chimique :

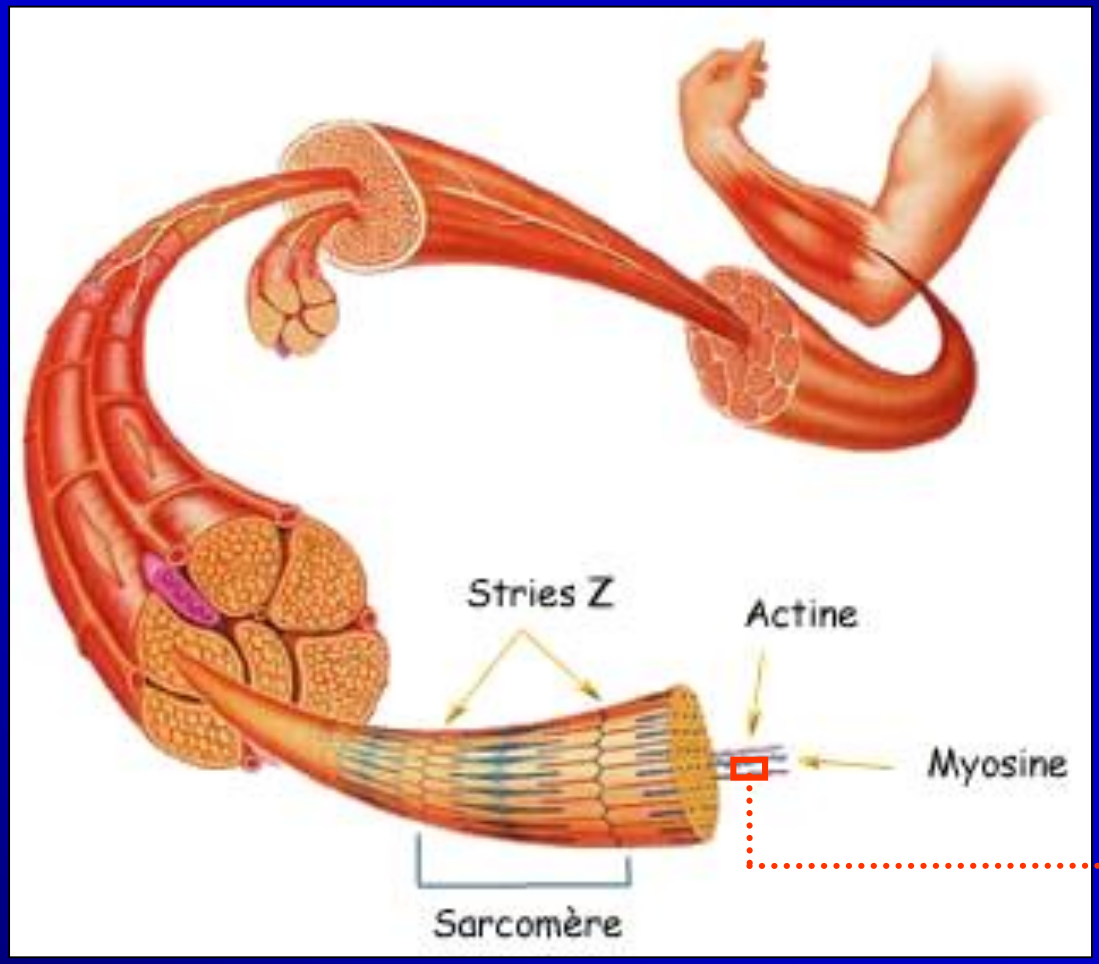
Le muscle strié squelettique comprend environ 75 % d'eau et 20 % de protéines plus des minéraux (calcium, magnésium) des enzymes, des ions (sodium, potassium, chlore) des acides aminés, des graisses et des sucres.
Il contient également en moyenne 700mg de myoglobine pour 100g de tissu musculaire.
Cette concentration est variable en fonction du muscle concerné et de l'entraînement.

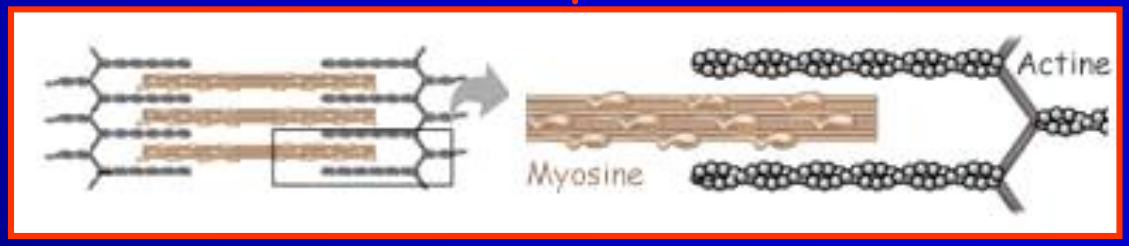
2 – Irrigation sanguine :

La consommation d'O_2 par le muscle varie dans des proportions importantes en fonction du niveau d'activité (pour un effort proche de PMA, la consommation est multipliée par 70).
Pour permettre le transport d'oxygène, l'irrigation sanguine est assurée par un réseau de capillaires très dense (4000 par mm² de coupe transversale). L'entraînement peut augmenter la capillarisation de l'ordre de 40 % chez une population d'athlètes spécialisés en course d'endurance par rapport à des sédentaires.
Dans le cas d'exercices de force (> à 60 % de Fmax) il y a interruption du débit sanguin (ischémie).

A - Structure microscopique :

L'unité fonctionnelle du muscle, est le sarcomère qui est délimité par 2 stries Z.
La contraction musculaire se déroule au niveau de chaque sarcomère par l'intermédiaire de 2 protéines contractiles les myofilaments.


Stries Z
Actine
Myosine
Sarcomère


Actine
Myosine

1 – Myofilaments :

a – Myosine : myofilament épais

formée d'1 tête et d'1 queue, cette molécule est capable d'hydrolyse l'ATP au niveau de sa tête.

b – Actine : myofilament fin

formée de 2 brins enroulés, elle est en contact avec les protéines régulatrices.

2 – Protéines régulatrices :

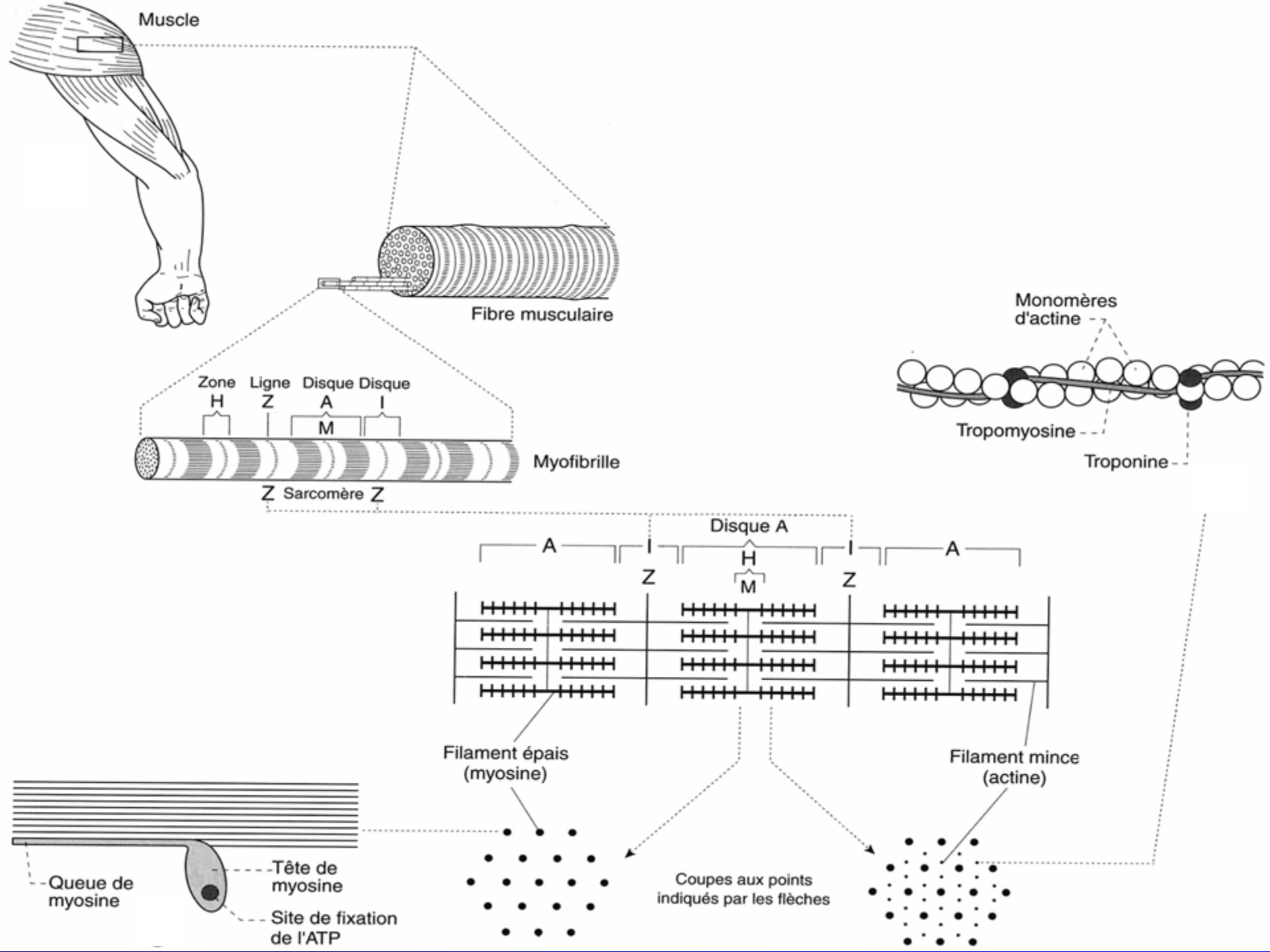
ensemble de protéines empêchant l'association permanente de l'actine à la myosine (inhibition de la contraction musculaire) :

a – Tropomyosine :

logée entre les 2 chaînes d'actine, elle bloque l'interaction entre l'actine et la myosine (empêche le contact).

b – Troponines :

dont l'une des sous-unités (TnC) est la structure de fixation des ions calcium, inducteurs de la contraction.


Muscle
Fibre musculaire
Zone
Ligne
Disque
Disque
H
Z
A
I
M
Myofibrille
Z Sarcomère Z
Monomères d'actine
Tropomyosine
Troponine
Disque A
A
I
H
I
A
Z
M
Z
Filament épais (myosine)
Filament mince (actine)
Queue de myosine
Tête de myosine
Site de fixation de l'ATP
Coupes aux points indiqués par les flèches

II – CONTRACTION MUSCULAIRE

A - Théorie des filaments glissants : Huxley

1 – Transmission du PA :

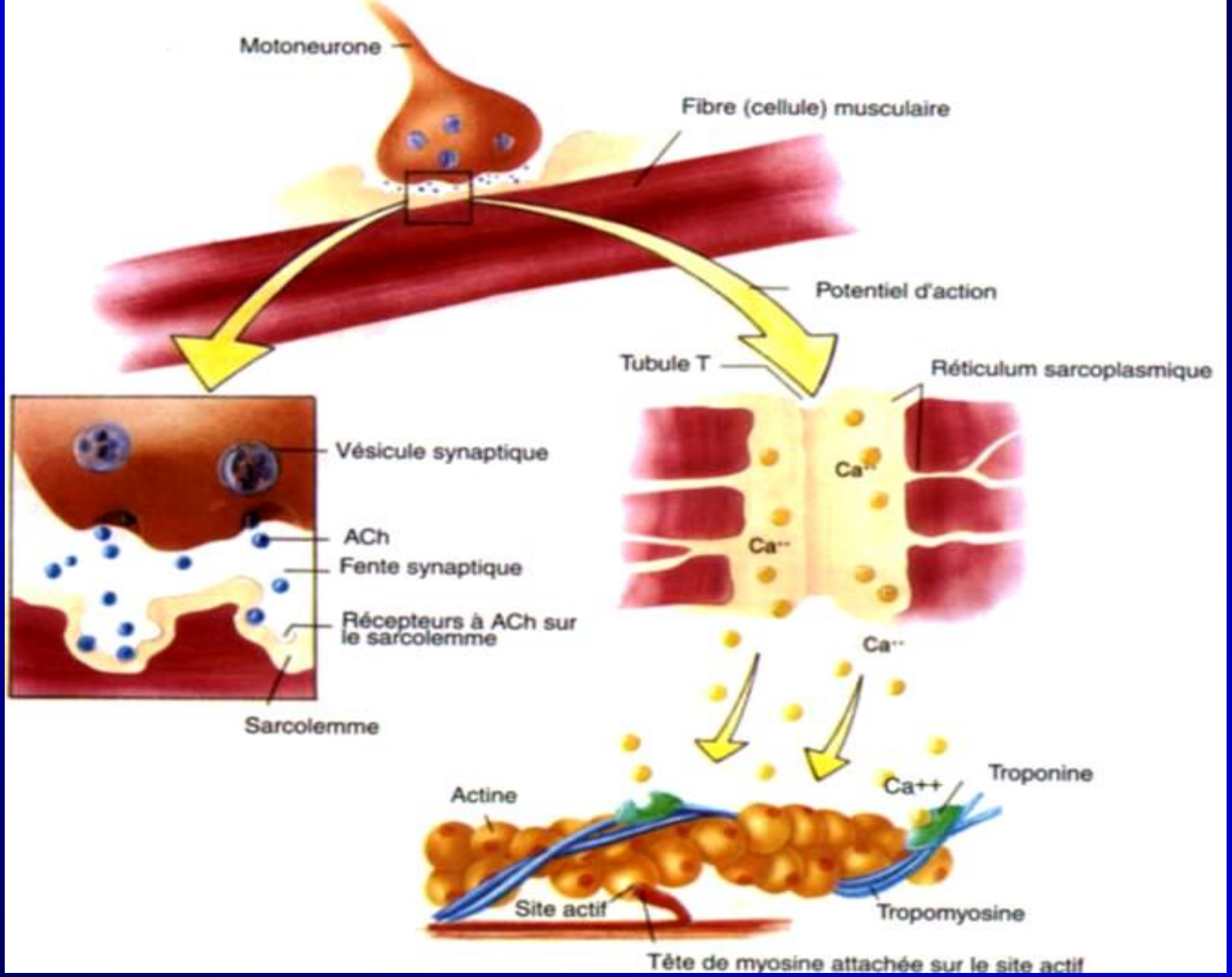
La contraction musculaire est déclenchée par l'activation d'un nerf moteur. Ce dernier libère l'acétylcholine au niveau de la plaque motrice, ce qui entraîne l'ouverture des canaux sodiums de la membrane musculaire et sa dépolarisation = naissance d'un PA.

2 – Rôle du PA :

Le PA se déplace tout le long du sarcolemme, et déclenche la sortie du Ca^{2+} stocké dans le réticulum sarcoplasmique (canaux membranaires perpendiculaires aux myofibrilles = stockage du Ca^{2+}).

3 – Rôle du Ca^{2+} :

Le Ca^{2+} se fixe sur la TnC et entraîne la rotation du complexe TnC-tropomyosine.

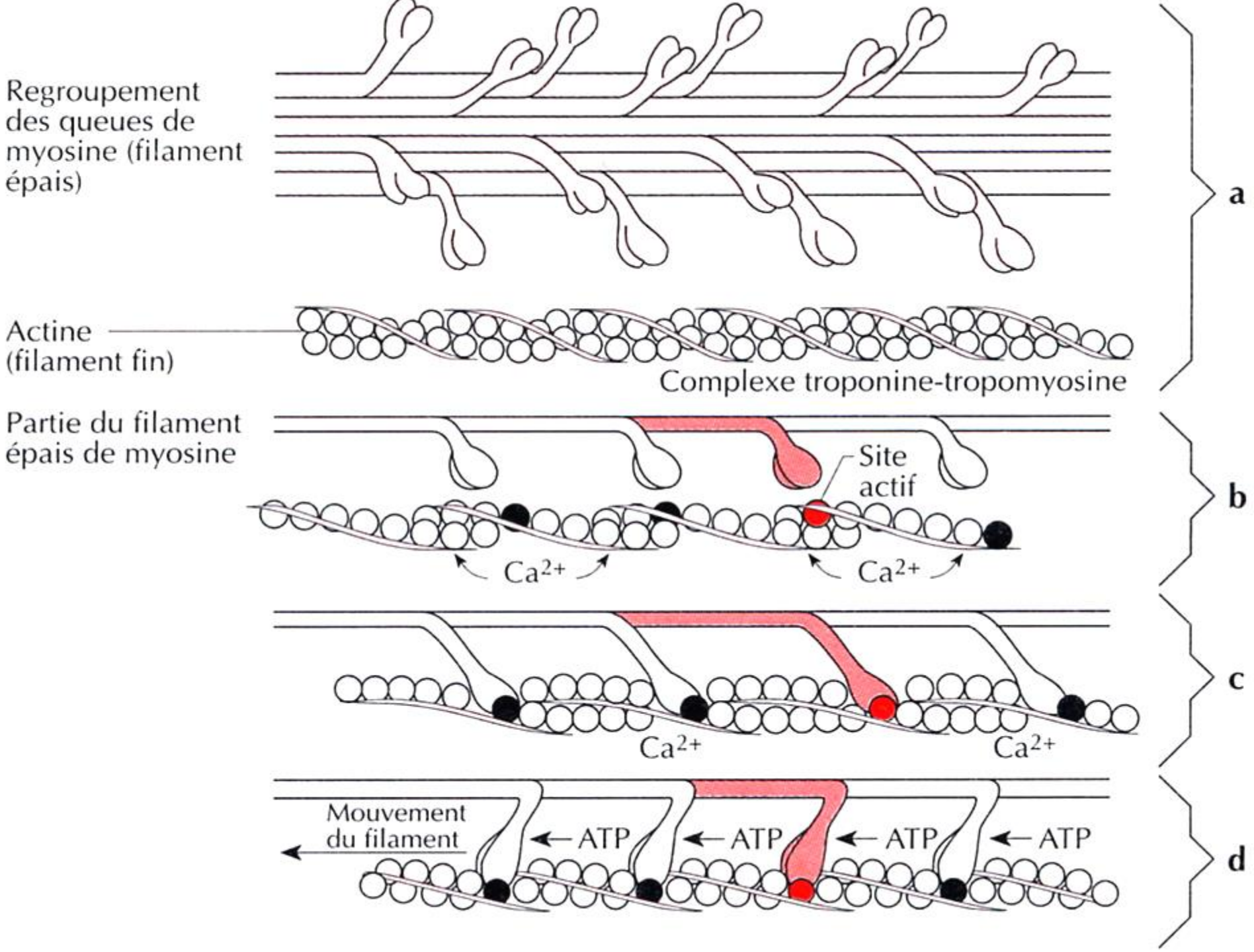

Motoneurone
Fibre (cellule) musculaire
Potentiel d'action
Tubule T
Réticulum sarcoplasmique
Vésicule synaptique
ACh
Fente synaptique
Récepteurs à ACh sur le sarcolemme
Sarcolemme
Ca++
Ca++
Ca++
Ca++
Troponine
Actine
Site actif
Tropomyosine
Tête de myosine attachée sur le site actif

4 – Rôle du complexe TnC-tropomyosine :

Le complexe TnC-tropomyosine a pour fonction d'empêcher tout contact entre la myosine et l'actine.
Ce complexe libère donc en présence de Ca^{2+} les sites actifs du filament d'actine occupés par les molécules de tropomyosine.
Ces sites sont alors disponibles pour une liaison avec la tête de myosine = pont actomyosine.

5 – Rôle de l'ATP :

La tête de myosine est alors en mesure d'hydrolyser une molécule d'ATP. L'énergie libérée va entraîner le pivotement de la tête de myosine et donc le glissement des filaments d'actine entre les filaments de myosine = théorie des filaments glissants.


Regroupement des queues de myosine (filament épais)
Actine (filament fin)
Complexe troponine-tropomyosine
a
Partie du filament épais de myosine
Site actif
Ca2+
Ca2+
b
Ca2+
Ca2+
c
Mouvement du filament
ATP
ATP
ATP
ATP
d

III – MYOTYPOLOGIE

A – Fibres musculaires :

Le muscle est constitué de différentes fibres qui possèdent des caractéristiques diverses : taille, pouvoir contractile, réserves de substrats, équipement enzymatique, nombre et taille des mitochondries, nombre de capillaires sanguins…

Suivant le message nerveux les fibres d'un même muscle ne sont pas toutes sollicitées en même temps.

B – Unités motrices :

Unité motrice (UM) = fibres musculaires + motoneurone α

Toutes les fibres musculaires d'une même UM ont les mêmes caractéristiques physiologiques et mécaniques. Ces caractéristiques sont liées à la spécificité du motoneurone α : fréquence…

C – Classification des fibres :

1 – Fibre de type I : à contraction lente (ST)

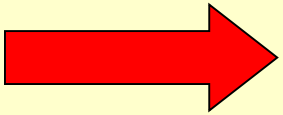
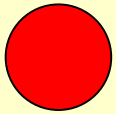
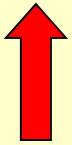
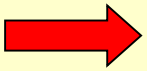
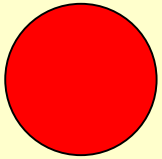
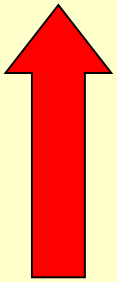
- très bonne adaptation pour travailler en condition aérobie (forte teneur en myoglobine)
- couleur rouge (capillarisation importante),
- grande résistance à la fatigue,
- force de contraction limitée,
- petit diamètre

2 – Fibre de type IIa : intermédiaire

- les fibres IIA sont a contraction rapide et développent une force importante comme celles du type IIB
- elles présentent par ailleurs, une grande capacité à résister à la fatigue comme les fibres de type I.

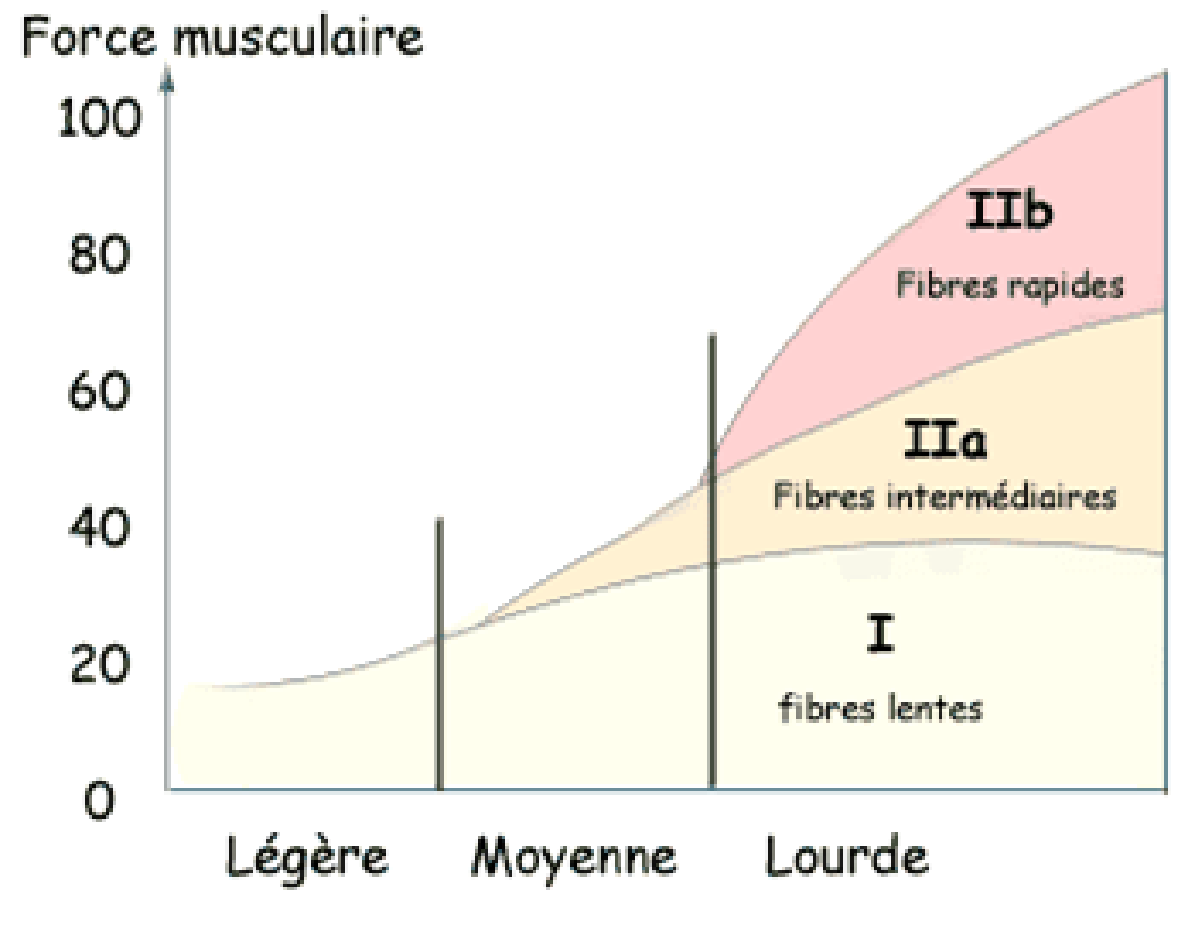
3 – Fibre de type IIb : à contraction rapide (FT)

Les paramètres qui caractérisent ces fibres rapides peuvent être opposés point par point à ceux observés pour les fibres lentes.

FIBRES (UM)	TAILLE	F	Résistance à la fatigue
LENTES I			
Rapides IIa			
Rapides IIa			

D – Recrutement des fibres : loi de la taille

Le recrutement des fibres musculaires est expliqué classiquement par la loi d'Henneman ou loi de la taille (size principle).
Les fibres lentes (petit diamètre) sont recrutées avant les fibres rapides en fonction du niveau de F : recrutement spatial et temporel.



IV – PLASTICITÉ MUSCULAIRE

"capacité des muscles à s'adapter où à se modifier grâce à l'entraînement (ou au désentraînement)".

la plasticité musculaire est liée à des :

- adaptations nerveuses (coordination) : recrutement
- adaptations périphériques (hypertrophie) : volume

A – Adaptations nerveuses : centrales

1 – Coordination intramusculaire : recrutement

Plus cette coordination est efficace (entraînement, motivation…), plus la force développée est importante. Cette augmentation dépend de 2 types de recrutements :

- recrutement spatial : nombre d'UM activées lors d'une contraction
- recrutement temporel (fréquence) : correspond à l'action synchrone des différentes UM. Plus la coordination intramusculaire fonctionne, plus le nombre de fibres musculaires activées simultanément est important.

2 – Coordination intermusculaire : synergie

Correspond à la collaboration entre tous les muscles participant à un même mouvement = synergie musculaire .

B – Adaptations périphériques : musculaires

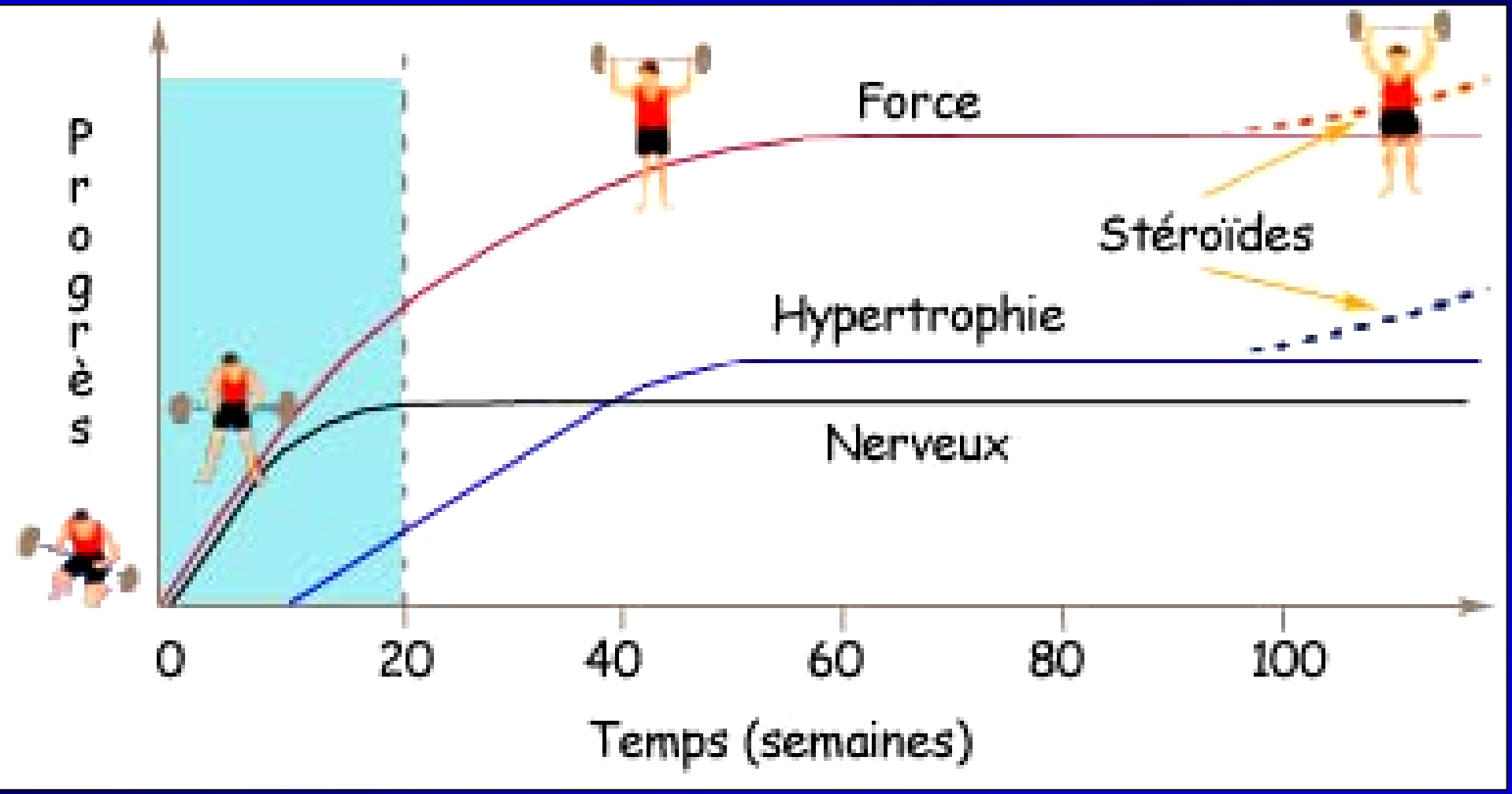
Ces adaptations correspondent à l'augmentation du volume musculaire = hypertrophie.

Il existe 2 types d'hypertrophie :

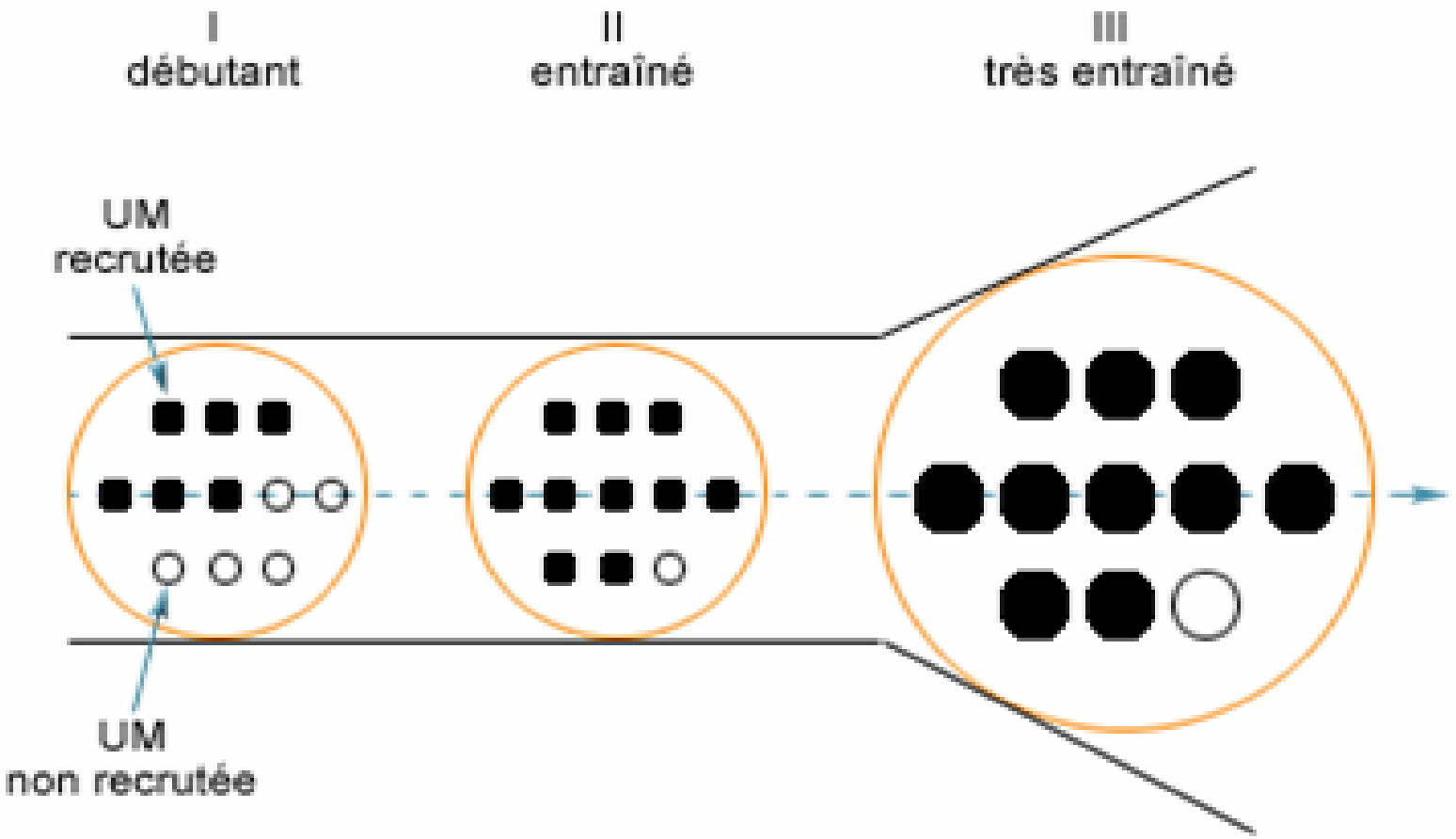
sarcoplasmique : augmentation de la quantité de liquide présent dans le muscle.

myofibrillaire : augmentation du diamètre des fibres.

Seule l'hypertrophie myofibrillaire à une influence sur la force musculaire. La force étant directement proportionnelle au volume musculaire.


Progrès
Force
Stéroïdes
Hypertrophie
Nerveux
0
20
40
60
80
100
Temps (semaines)

Situation I : le débutant ne recrute que peu de fibres.
Situation II : au bout de quelques semaines le nombres d'UM recrutées augmente sans hypertrophie.
Situation III : lorsque l'entraînement se prolonge c'est surtout l'hypertrophie qui est responsable des gains de force.



Place des phénomènes de recrutement dans l'augmentation de la force (d'après Fukunaga 1976)

Chapitre 4
BASES ÉNERGÉTIQUES DE L'EXERCICE PHYSIQUE

I – ÉNERGIE CELLULAIRE

L'énergie nécessaire à l'exercice physique est stockée dans les aliments sous forme de glucides, lipides et protides. Ces composants peuvent être dégradés dans nos cellules où ils libèrent l'énergie stockée.

L'énergie libérée est mesurée en kilocalorie (kcal ou Cal).

1 kcal = quantité d'énergie nécessaire pour augmenter d'1°C 1L d'eau à 15°C.

1 kcal = 1 Cal = 4,18 kJ

A - Métabolisme :

Le métabolisme correspond à l'ensemble des réactions chimiques du corps qui consomment ou libèrent de l'énergie.

B - Sources énergétiques :

Les éléments fondamentaux constituant les aliments sont :

- le carbone : C
- l'hydrogène : H
- l'oxygène : O
- l'azote : N

Les liaisons moléculaires entre ces éléments sont relativement faibles en énergie, c'est pourquoi les aliments ne sont pas utilisés directement pour la production d'énergie, mais dissociés pour donner un composé à haute énergie appelé ATP (Adénosine TriphosPhate)

1 – Les glucides : hydrates de carbone

Formule : Cn H2n On ou $(CH_2O)_n$ (glucose : $C_6 H_{12} O_6$)

Les sucres assimilés sont convertis en glucose acheminé par le sang vers toutes les cellules. Au repos il est capté par le foie et les muscles où il est transformé et stocké sous forme de glycogène hépatique et musculaire (glycogénèse). Ce dernier est ainsi stocké jusqu'à son utilisation par la cellule pour produire de l'ATP.

Les réserves de glycogène sont limités et s'épuisent rapidement si l'alimentation n'apporte pas une réserve suffisante de sucre.
Le glucose représente prés de 99% du sucre circulant dans le sang.
Nous trouvons le glycogène stocké sous 2 formes :

- glycogène hépatique ≈ 100g
- glycogène musculaire ≈ 300 à 400g soit 16g/kg de muscle frais

Ces stocks représentent au plus 2000 kcal (≈20 min de course).

1g de sucre ⇔ 4 kcal

2 – Les lipides : graisses

L'organisme stocke beaucoup + de lipides que de sucres (> 70000 kcal). Les graisses doivent être transformées de leur forme complexe (triglycéride) en composants de base glycérol et acides gras libres (AGL). Seuls les AGL peuvent donner de l'ATP.

1g de lipide ⇔ 9 kcal

3 – Les protides : protéines

Les protéines sont composées des acides aminés. Elles ne fournissent que 5% de l'énergie totale, mais sont surtout utilisées pour la construction cellulaire (muscle, tissu…).

C - Production d'énergie :

1 – Utilisation de l'ATP

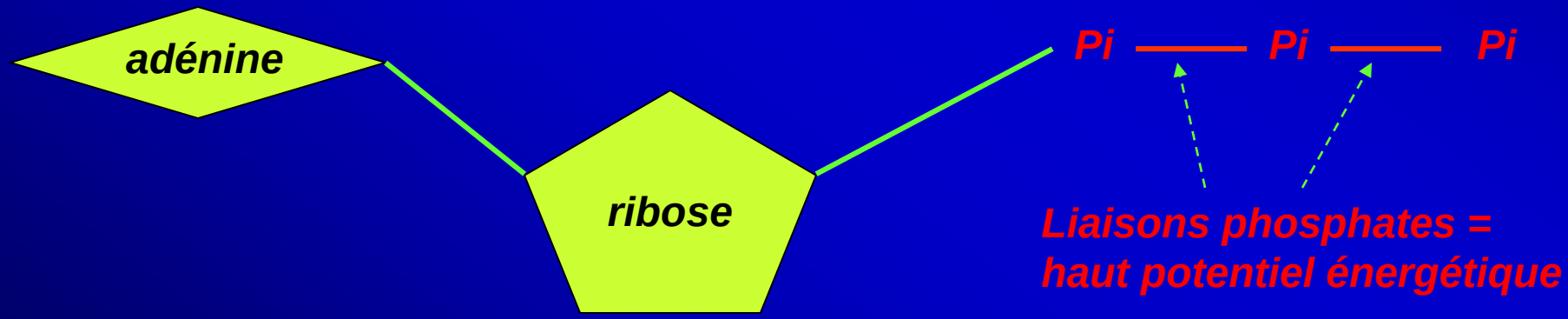
La fibre musculaire ne peut utiliser que l'énergie libérée par l'ATP (phosphate à haute énergie).

ATP est composé :

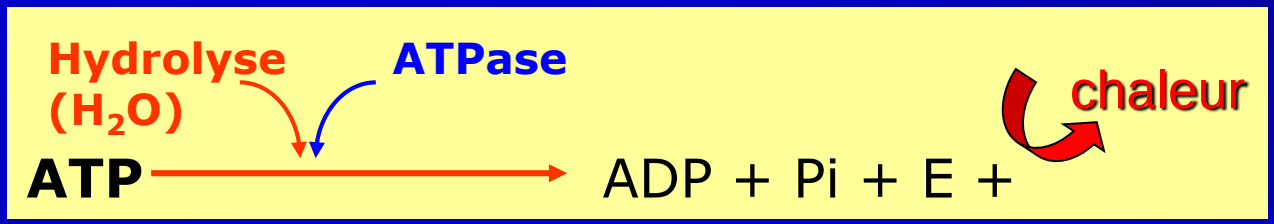
1 ADÉNOSINE = ADÉNINE (base azotée) + RIBOSE (glucide)

+

3 phosphates inorganiques : Pi



Les liaisons entre les Pi sont des liaisons riches en énergie.
L'ATP ne peut donner de l'énergie qu'en se séparant d'1 Pi, donc en libérant l'énergie contenue dans une des liaisons phosphates.
Cette libération n'est possible que par l'intervention d'une enzyme l'ATPase, qui va hydrolyser (couper) la liaison phosphate.



L'énergie libérée (E) par 1 mole d'ATP ≈ 7.6 kcal (32 kJ).

2 – Production d'ATP

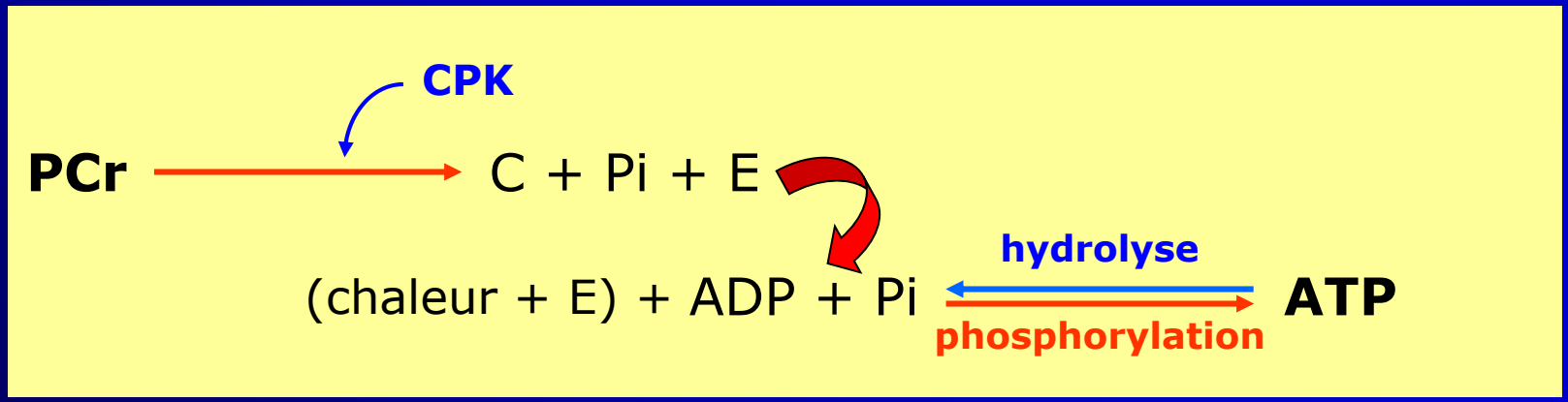
La concentration moyenne en ATP est de 5.5 mmoles / kg de muscle frais, (160 dans tout l'organisme). Mais lors de la contraction musculaire seulement 20% de l'énergie est utilisée pour le travail mécanique, 80% est dissipée sous forme de chaleur (rendement musculaire faible).

Les réserves en ATP sont donc très faibles. L'ATP doit être synthétisé en permanence.

3 systèmes permettent de synthétiser l'ATP :

a – Système ATP-PCr : système des phosphagènes

Le système énergétique le plus simple est le système ATP-PCr (roue énergétique). Il existe dans les cellules une autre molécule possédant une liaison phosphate à haute énergie, la phosphocréatine (PCr) ou créatine phosphate (CP).
L'énergie libérée par la rupture de la liaison phosphate n'est pas directement utilisée pour accomplir un travail cellulaire mais pour reconstituer les stocks d'ATP.



Ce système est simple et ne nécessite pas la présence d'O_2, il est donc appelé système anaérobie. Les réserves de PCr étant très faibles, d'autres systèmes doivent être utilisés pour synthétiser l'ATP.

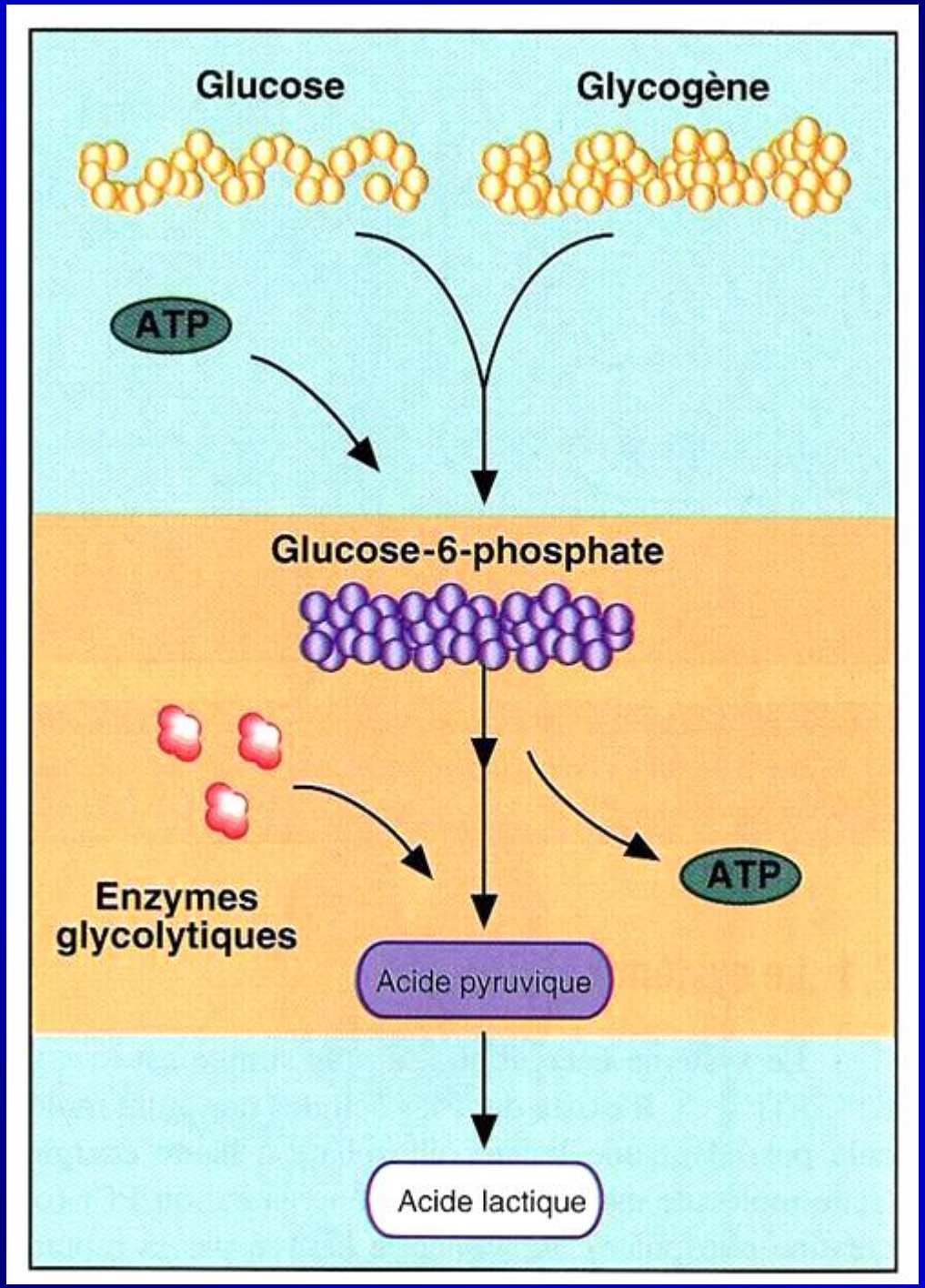
b – Système glycolytique : glycolyse anaérobie (lactique)

Un autre moyen de produire de l'ATP réside dans la libération d'énergie à partir du glucose. Ce système est appelé système glycolytique.
La dégradation :

- du glucose correspond à la glycolyse
- du glycogène correspond à la glycogénolyse.

Pour que le glucose ou le glycogène puissent fournir de l'énergie, 10 réactions enzymatiques sont nécessaires.
La première étape correspond à la transformation glucose ou du glycogène en glucose-6-phosphate (G6P). Cette première étape nécessite 1 ATP lorsque le substrat utilisé est le glucose.
A l'issue des 10 étapes, 3 ATP sont produits.

Glycolyse = 3-1 = 2 ATP
Glycogénolyse = 3 ATP


Glucose
Glycogène
ATP
Glucose-6-phosphate
Enzymes glycolytiques
ATP
Acide pyruvique
Acide lactique

A l'issue des 10 étapes 1 molécule de glucose ou de glycogène donne 2 molécules d'acide pyruvique ($C_3H_4O_3$).

b1 – Acide lactique :

La glycolyse ne nécessite pas la présence d'O_2, elle est donc anaérobie. Mais sans la présence d'O_2, l'hydrolyse du glucose va produire de l'hydrogène, qui en excès va engendrer la formation d'acide lactique ($C_3H_6O_3$) à partir de l'acide pyruvique.

A cours de l'exercice la demande en ATP peut être multipliée par 200, les systèmes ATP-PCr et glycolytique ne suffisent plus.

c – Système oxydatif

Système par lequel les cellules dégradent les substrats en présence d'O_2 = système aérobie.
Le débit énergétique de ce système est le plus important des 3.

c1 – Glycolyse aérobie :

En présence d'O_2 l'acide pyruvique est transformé en acétyl-Coenzyme A (acétyl-CoA).

Cycle de KREBS:

une fois formé l'acétyl-CoA entre dans la mitochondrie (centrale énergétique) et initie le cycle de Krebs (cycle de l'acide citrique).
Au cours du cycle de Krebs l'acétyl-CoA est totalement oxydé pour donner 2 ATP du carbone et de l'hydrogène.
Le carbone se combine avec l'O_2 pour donner du CO_2 transporté par le sang vers les poumons.

Chaîne de transporteur d'électrons:

le cycle de Krebs est couplé à une série de réactions "chaîne de transporteur d'électrons". Les ions hydrogènes se combinent à 2 coenzymes NAD et FAD et sont transportés vers la chaîne où ils sont divisés en protons (H+) et électrons (e-). A la fin de la chaîne, H+ se combine à l'oxygène pour former H2O, les e- vont fournir l'énergie nécessaire à la phosphorylation de l'ADP en ATP.

A l'issue de la chaîne 34 ATP ont été produits.

Au total : glycolyse (2) + Krebs (2) + chaîne (34) = 38 ATP
Pour le glycogène 39 ATP

c2 – Oxydation des lipides :

Les triglycérides sont dégradés en glycérol et AGL au cours de la lipolyse grâce à l'action d'enzymes, les lipases.
Les AGL sont dégradés dans les mitochondries en présence d'O_2, ce catabolisme est appelé la β-oxydation.
L'énergie nécessaire à ce processus est apportée par l'hydrolyse de 2 ATP, un AGL à 16 carbones va donner 129 ATP (1 triglycéride 387 ATP).

3 – Acide lactique

a – Production :

Quand l'activité physique est modérée, la quantité d'O_2 apportée aux cellules est suffisante pour transformer les H^+ produits par la glycolyse en eau.
Lorsque l'intensité d'exercice est importante, le métabolisme lié à la glycolyse devient prépondérant, le surplus d'hydrogène produit est alors accepté par l'acide pyruvique, ce qui entraîne l'accumulation d'acide lactique.
C'est l'accumulation des protons H^+ qui est seule responsable de l'augmentation de l'acidité du milieu (acidose) et de la diminution du pH (7.4 à 6.3).

a – Élimination :

Quand l'activité physique redevient plus modérée où lorsque le sujet retrouve une situation de repos (ou récupération active), la quantité d'O_2 augmente par rapport à la production d'H^+, permettant de transformer l'acide lactique en acide pyruvique.
L'acide lactique produit se retrouve également dans la circulation sanguine, il est alors transporté jusqu'au foie, cœur, reins et muscles, où il est transformé en glycogène.

L'acide lactique ne doit pas être considéré comme un déchet, mais comme un métabolite permettant de limiter l'accumulation d'H^+, et donc l'acidification du milieu.
De plus la **néoglycogenèse** permet de reconstituer les réserve de glycogène.

Ions H^+ :
les H^+ circulants en excès, vont être tamponnés par association avec des ions bicarbonates (régulation de l'équilibre acido-basique) :

$$H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$$

II – FILIERES ÉNERGETIQUES

En physiologie de l'exercice, on parle de filière énergétique pour expliquer l'intervention des 3 systèmes dans la production d'ATP en fonction de l'intensité et du type d'exercice.
les 3 filières fonctionnent dès le début de l'exercice mais n'ont pas les mêmes délais d'intervention (inertie).

Chaque filière a ses caractéristiques :
substrat utilisé, rendement, délai, puissance, capacité ,facteur limitant, produit terminal…

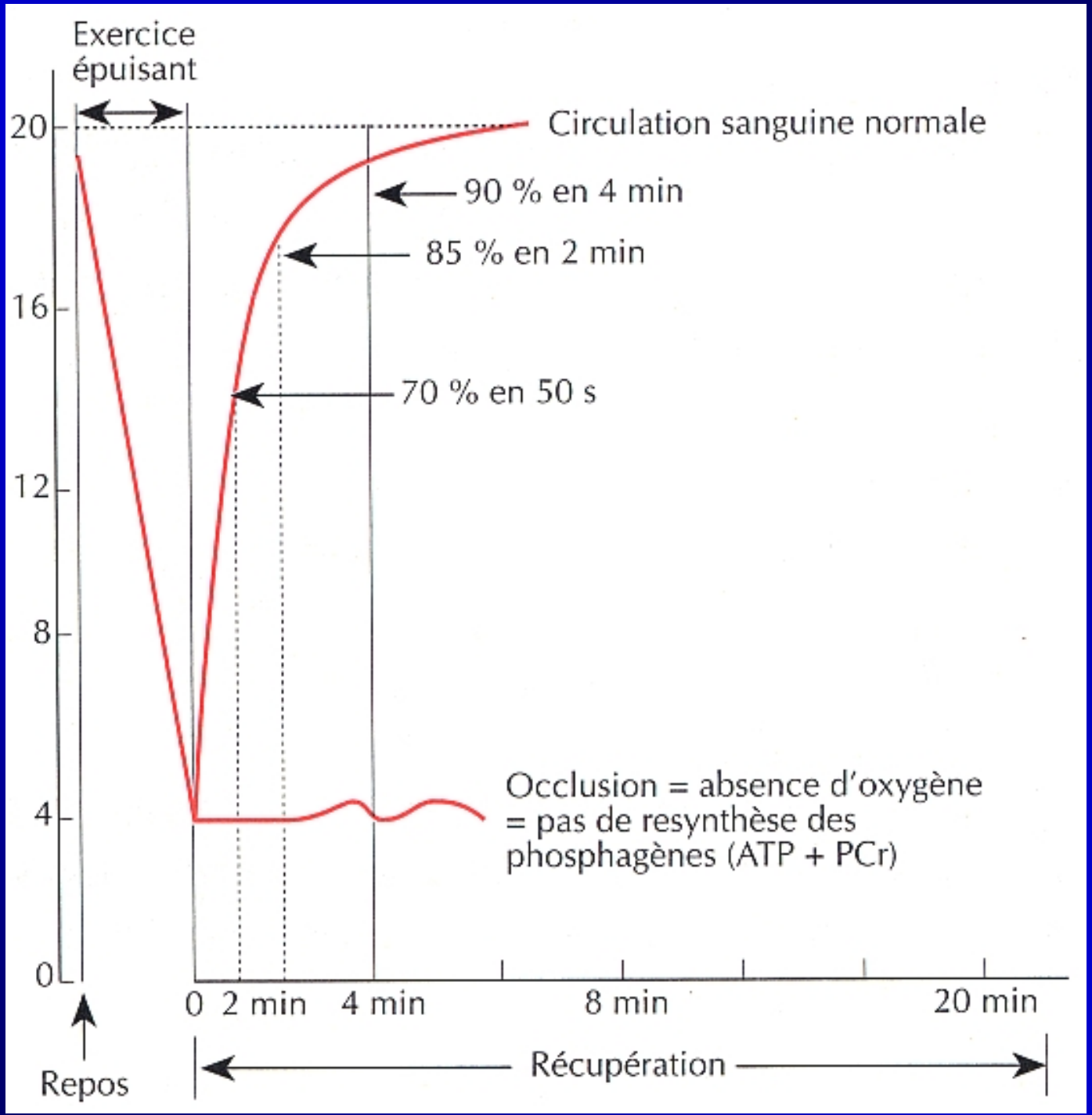
A – Puissance & capacité :

Puissance : (travail par unité de temps) en physiologie la puissance d'une filière correspond à la quantité d'énergie disponible par unité de temps (nombre de molécules d'ATP / seconde)

Capacité : quantité totale d'énergie disponible (quantité totale de molécules d'ATP)

B – FILIÈRE ANAÉROBIE ALACTIQUE :

Substrats utilisés	ATP + PCr
Délai d'intervention	Nul
Puissance	Très élevée
Capacité	Très faible
Délai d'épuisement	à Pmax = 6 à 8'' à P sous max = 15 à 30''
Facteurs limitants	directs : [PCr], enzymes (ATPase, CPK)
	indirects : % fibres rapides (P >) niveau d'entraînement
Récupération	exo max de 6 à 7'' ⇒ 70% en 30'' ⇒ 90% en 4'


Exercice épuisant
20
16
12
8
4
0
Circulation sanguine normale
90 % en 4 min
85 % en 2 min
70 % en 50 s
Occlusion = absence d'oxygène
= pas de resynthèse des
phosphagènes (ATP + PCr)
0
2 min
4 min
8 min
20 min
Repos
Récupération

C – FILIÈRE ANAÉROBIE LACTIQUE :

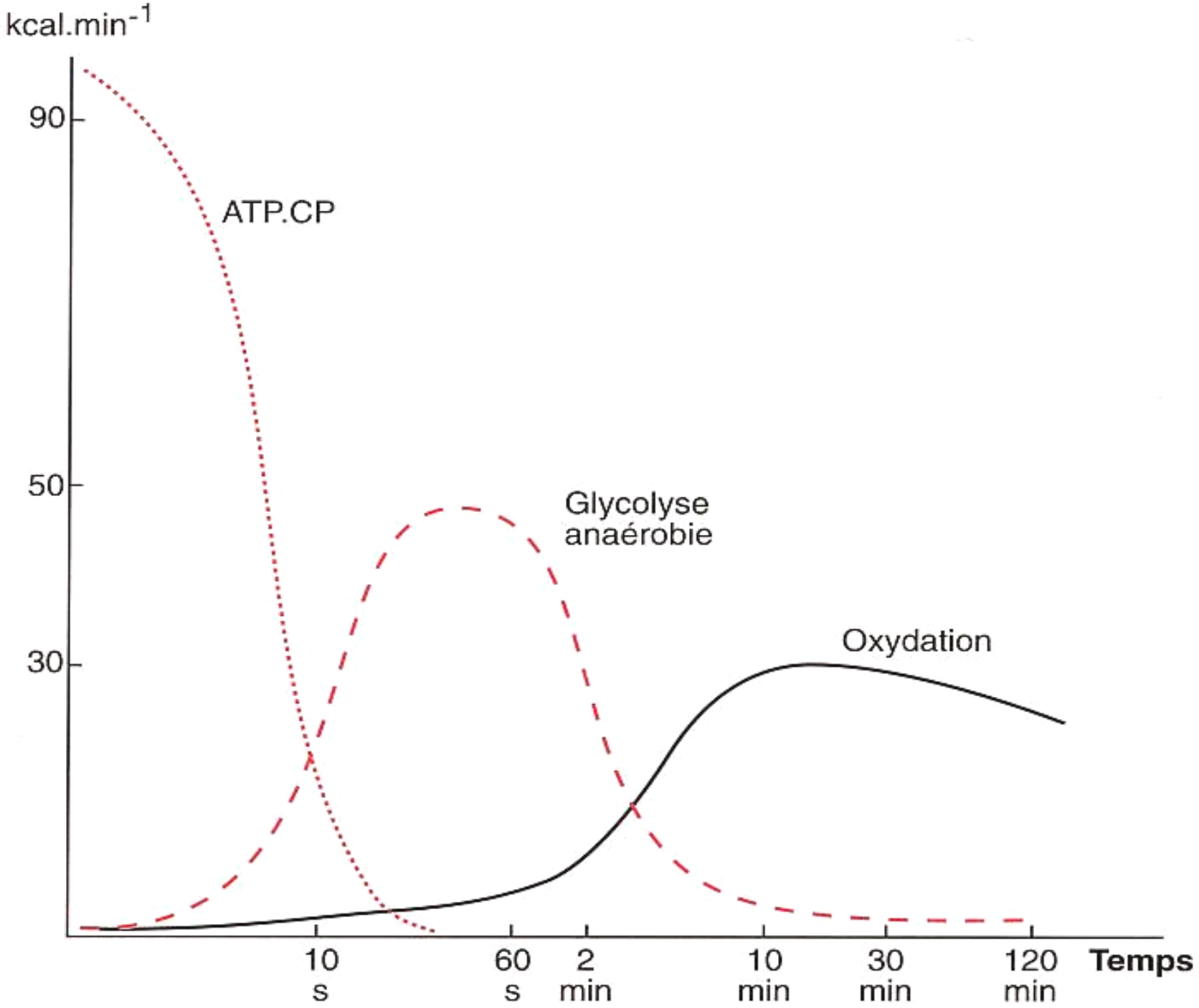
Substrats utilisés	glucose + glycogène
Délai d'intervention	15 à 30 secondes
Puissance	élevée
Capacité	faible
Délai d'épuisement	à Pmax = 15 à 45'' à P sous max = 1 à 2'
Facteurs limitants	directs : baisse du pH musculaire ⇒ enzymes (glycolyse anaérobie) ⇒ liaison calcium-troponine
	indirects : % fibres rapides (P >) niveau d'entraînement

Récupération	élimination lactate + équilibre acido-basique + resynthèse glyco
	exo max de 15 à 20'' $\Rightarrow$ 6' exo max de 45'' $\Rightarrow$ 20 à 30' séance lactique = 48h

Exo max de 1 à 2' $[La]_s$ ↘ :	
récup passive	50% en 25' 75% en 50' 100% en 1h30'
récup active (50 à 60% $\dot{V}O_2max$)	50% en 6' 75% en 12' 100% en 20'

D – FILIÈRE AÉROBIE :

Substrats utilisés	Glucides + lipides
Délai d'intervention	1 à 3'
Puissance	faible
Capacité	très élevée (illimitée en théorie)
Délai d'épuisement	à PMA = 5 à 6' à P sous max = dépend du % de $\dot{V}O_2$max utilisé
Facteurs limitants	directs : débit cardiaque, épuisement des réserves
	indirects : thermorégulation, typologie musculaire, niveau d'entraînement
Récupération	séance exhaustive = 72h resynthèse réserves glycogène


kcal.min-1
90
50
30
ATP.CP
Glycolyse
anaérobie
Oxydation
10
s
60
s
2
min
10
min
30
min
120
min
Temps