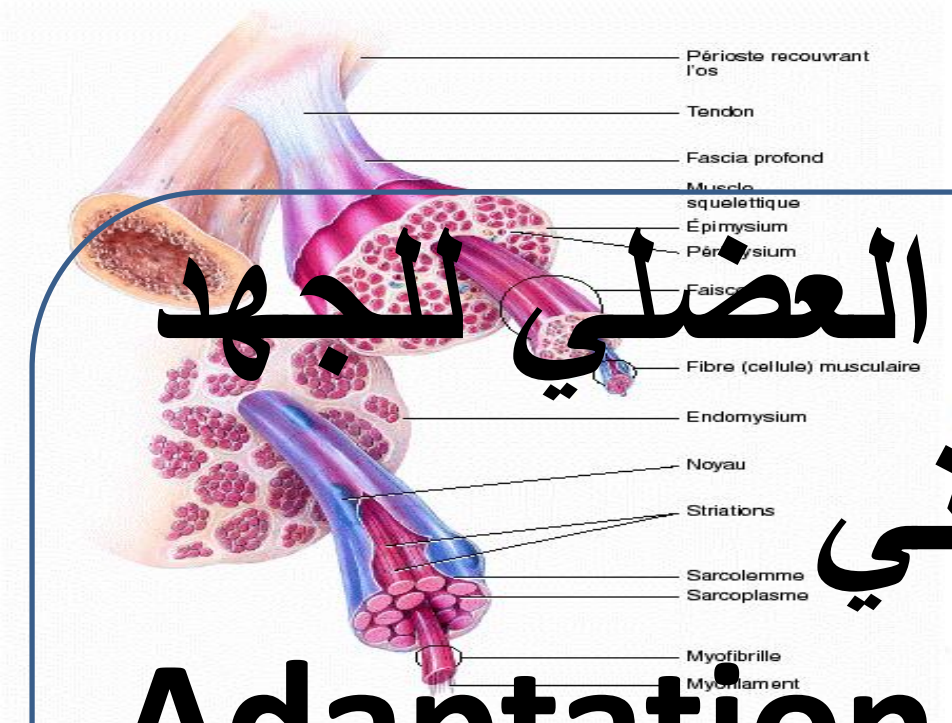
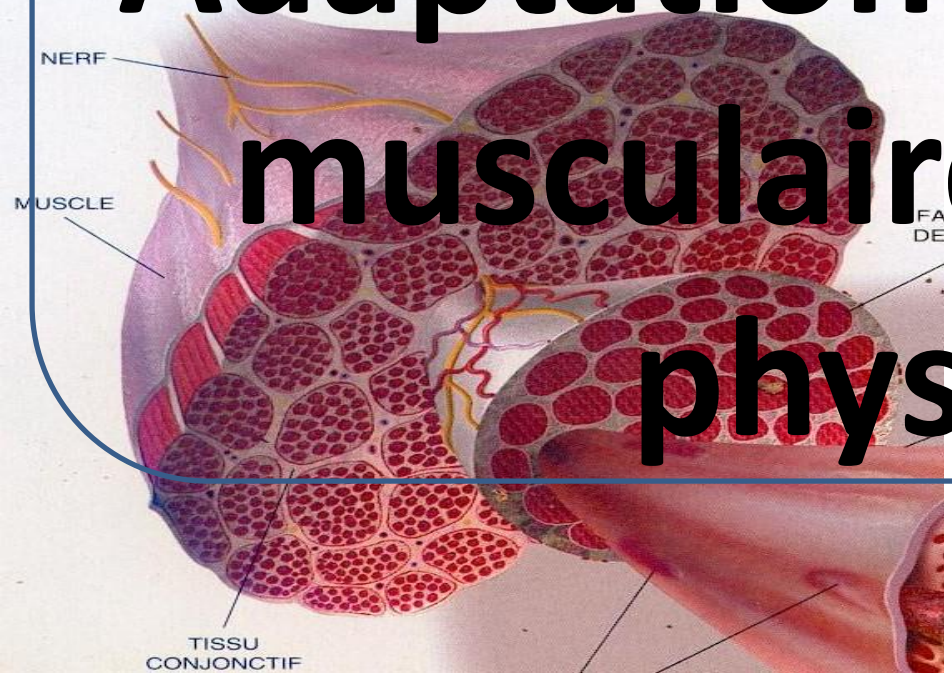
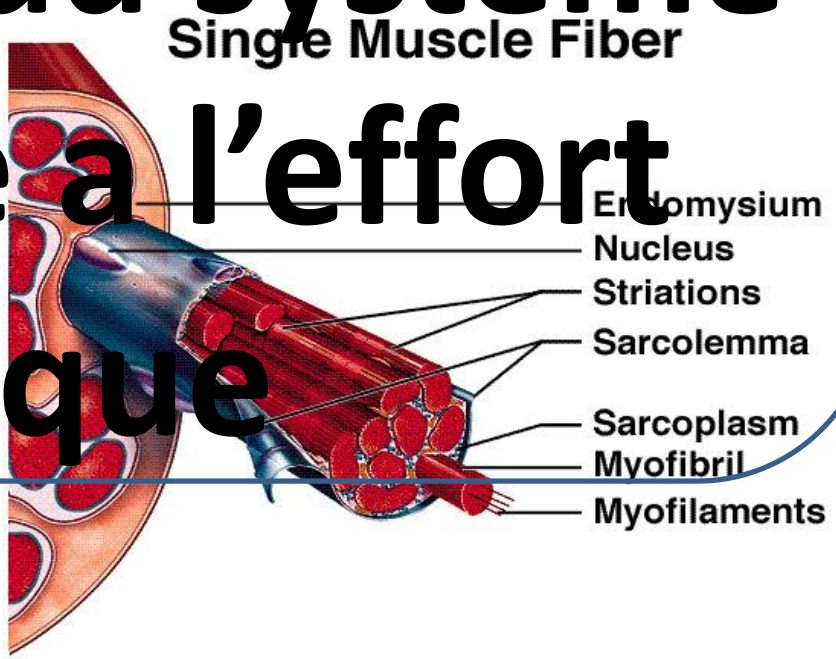


تكيفات الجهاز العضلي للجهد البدني

Adaptation du système musculaire a l’effort physique



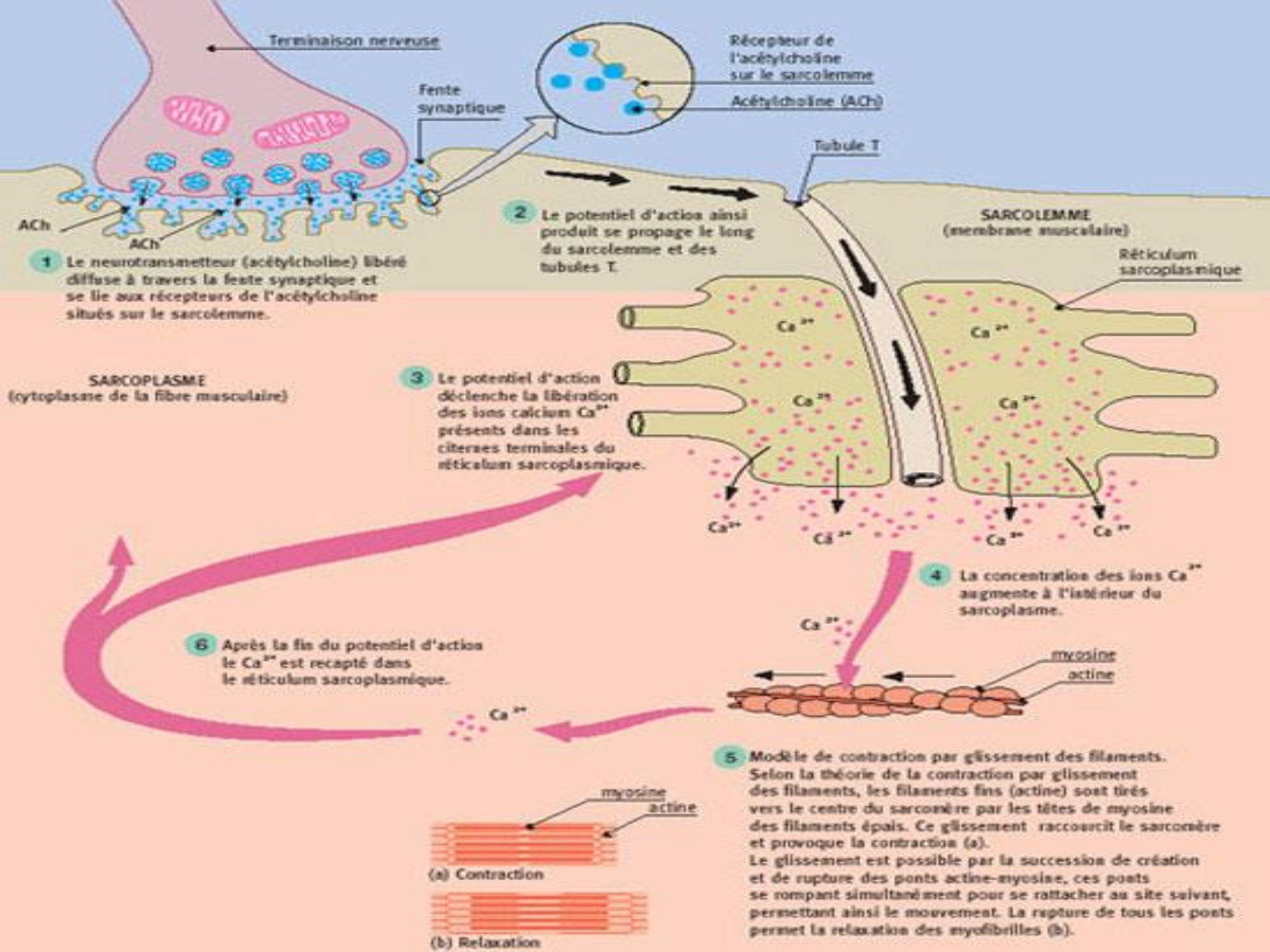


تكيفات الجهاز العضلي للجهد البدني
Adaptation du système musculaire a l’effort physique

يؤدي التدريب الرياضي إلى إحداث مجموعة من التكيفات على الجهاز العضلي ، حيث تظهر تغيرات خاصة بتدريب القوة والتحمل وهذا ما يجعلنا نتطرق في هذا الفصل إلى دراسة مختلف أنواع الألياف العضلية وصولا إلى أسباب التضخم والضمور العضلي .

العضلة الهيكلية والتمرين البدني

تختلف الألياف العضلية عن بعضها البعض ، بحيث تحتوي العضلات المخططة على نوعين من الألياف، (الألياف البطيئة ST slow-twitch) و (الألياف السريعةFT fast-twitche) ، كما يمكن تقسيم الألياف العضلية السريعة إلى مجموعة من الألياف الأخرى و هي Fta , FTb, FTc


Terminaison nerveuse
Fente synaptique
Récepteur de l'acétylcholine sur le sarcolemme
Acétylcholine (ACh)
Tubule T
ACh
ACh
1 Le neurotransmetteur (acétylcholine) libéré diffuse à travers la fente synaptique et se lie aux récepteurs de l'acétylcholine situés sur le sarcolemme.
2 Le potentiel d'action ainsi produit se propage le long du sarcolemme et des tubules T.
SARCOLEMME (membrane musculaire)
Réticulum sarcoplasmique
SARCOPLASME (cytoplasme de la fibre musculaire)
3 Le potentiel d'action déclenche la libération des ions calcium Ca^{2+} présents dans les citernes terminales du réticulum sarcoplasmique.
Ca^{2+}
4 La concentration des ions Ca^{2+} augmente à l'intérieur du sarcoplasme.
6 Après la fin du potentiel d'action le Ca^{2+} est recapté dans le réticulum sarcoplasmique.
myosine
actine
5 Modèle de contraction par glissement des filaments. Selon la théorie de la contraction par glissement des filaments, les filaments fins (actine) sont tirés vers le centre du sarcomère par les têtes de myosine des filaments épais. Ce glissement raccourcit le sarcomère et provoque la contraction (a).
Le glissement est possible par la succession de création et de rupture des ponts actine-myosine, ces ponts se rompant simultanément pour se rattacher au site suivant, permettant ainsi le mouvement. La rupture de tous les ponts permet la relaxation des myofibrilles (b).
(a) Contraction
(b) Relaxation

الألياف العضلية البطيئة تتميز بلون داكن أما الألياف العضلية من النوع FT_a ليس لها لون ، FT_b ذات لون رمادي ، الفرق الموجود بين الألياف العضلية السريعة الثلاثة ليس محدد بدقة ولكن تعتبر الألياف من النوع FT_a الأكثر استخداما ، ولكن تبقى الألياف البطيئة الأكثر استخداما من الألياف السريعة . أغلب العضلات تحتوي على 50 % من الألياف البطيئة ، 25 %من الألياف FT_a، 25 % من الألياف FT_c أما الألياف من النوع FT_c لا تمثل سوى 1 أو 3 %من العضلة

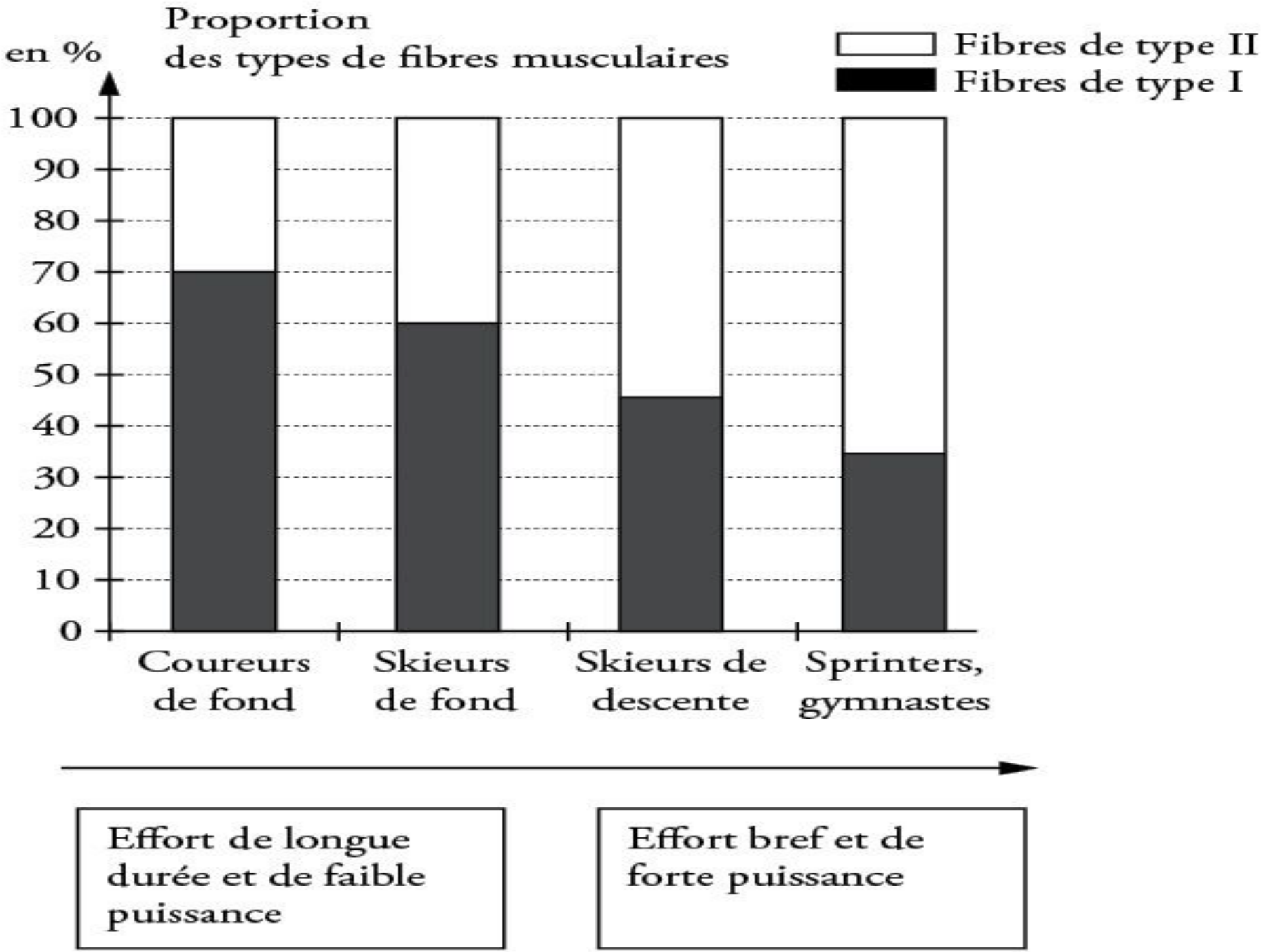
خصائص الألياف العضلية السريعة والبطيئة
FT et ST

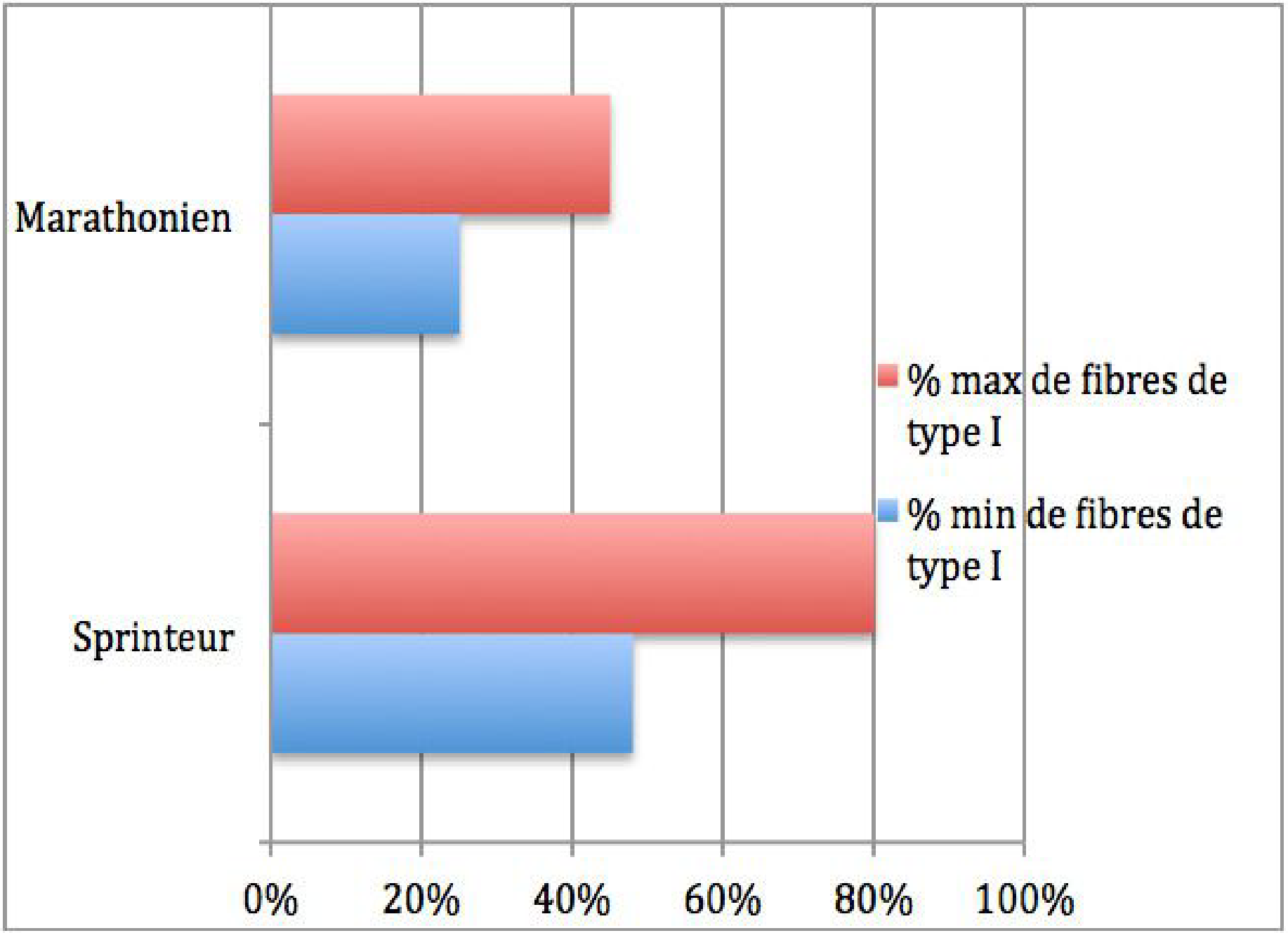
بما أنه يوجد أنواع مختلفة من الألياف العضلية لابد من البحث عن الدور والنشاط البدني لكل نوع ومن أجل الفهم يجب المقارنة بين هذه الأنواع.

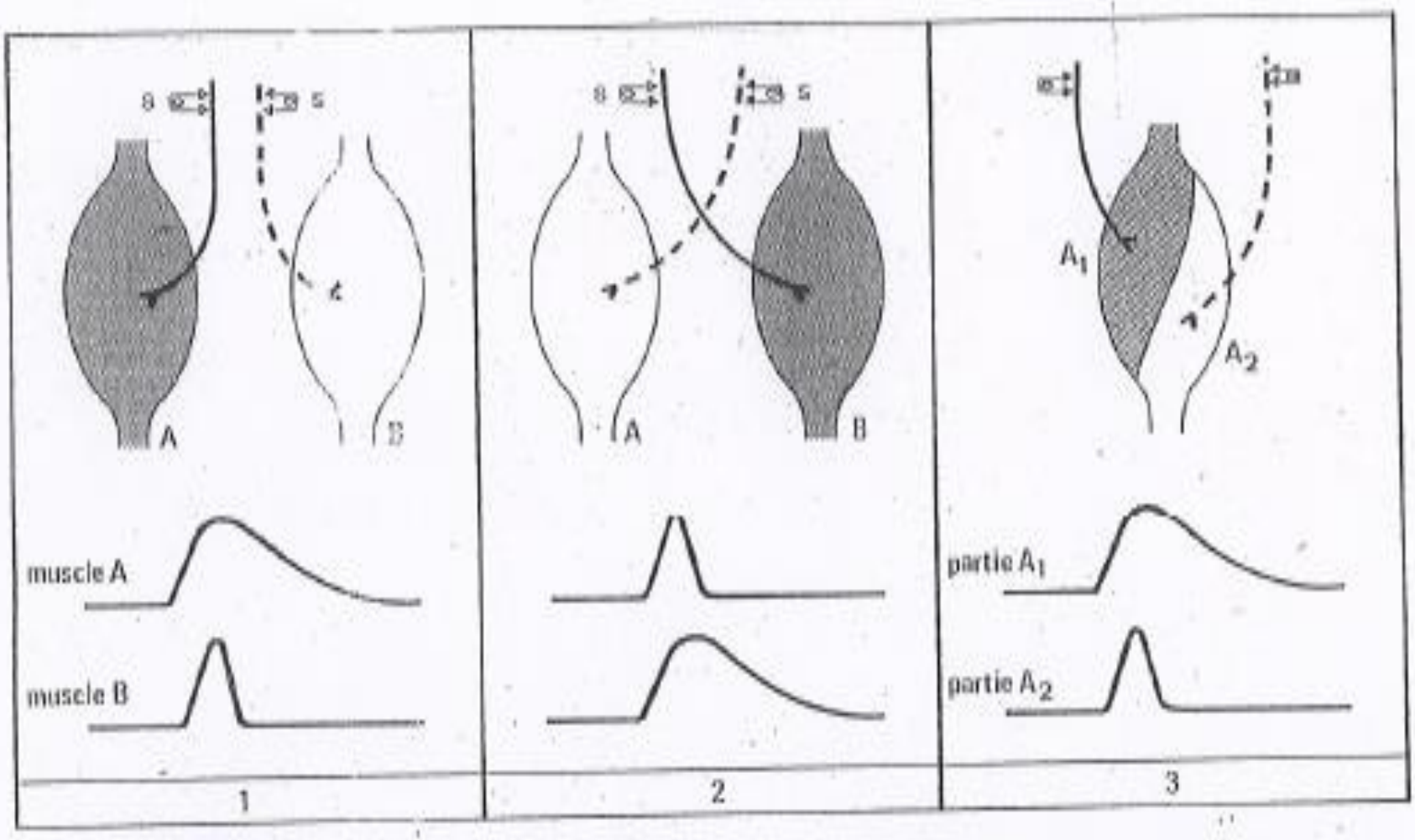
Etudes transversales : comparaison de sujets entraînés en endurance / sédentaires

- % prédominant de fibres de type I

Athlète	Sexe	Muscle	%ST	%FT	Surface de section (μm^2) ST	Surface de section (μm^2) FT
Sprinters	M	Jumeaux	24	76	5,878	6,034
	F	Jumeaux	27	73	3,752	3,930
Coureurs de fond	M	Jumeaux	79	21	8,342	6,485
	F	Jumeau	57	43	6,333	6,116
	F	Vaste externe	51	49	5,487	5,216
Nageurs	M	Deltoïde postérieur	67	33	—	—
Haltérophiles	M	Jumeaux	44	56	5,060	8,910
	M	Deltoïde	53	47	5,010	8,450
Triathlètes	M	Deltoïde postérieur	60	40	—	—
	M	Vaste externe	63	37	—	—
	M	Jumeaux	59	41	—	—
Canoéistes	M	Deltoïde postérieur	71	29	4,920	7,040
Lanceur de poids	M	Jumeaux	38	62	6,367	6,441
Non entraînés	M	Vaste externe	47	53	4,722	4,709
	F	Jumeaux	52	48	3501	3141

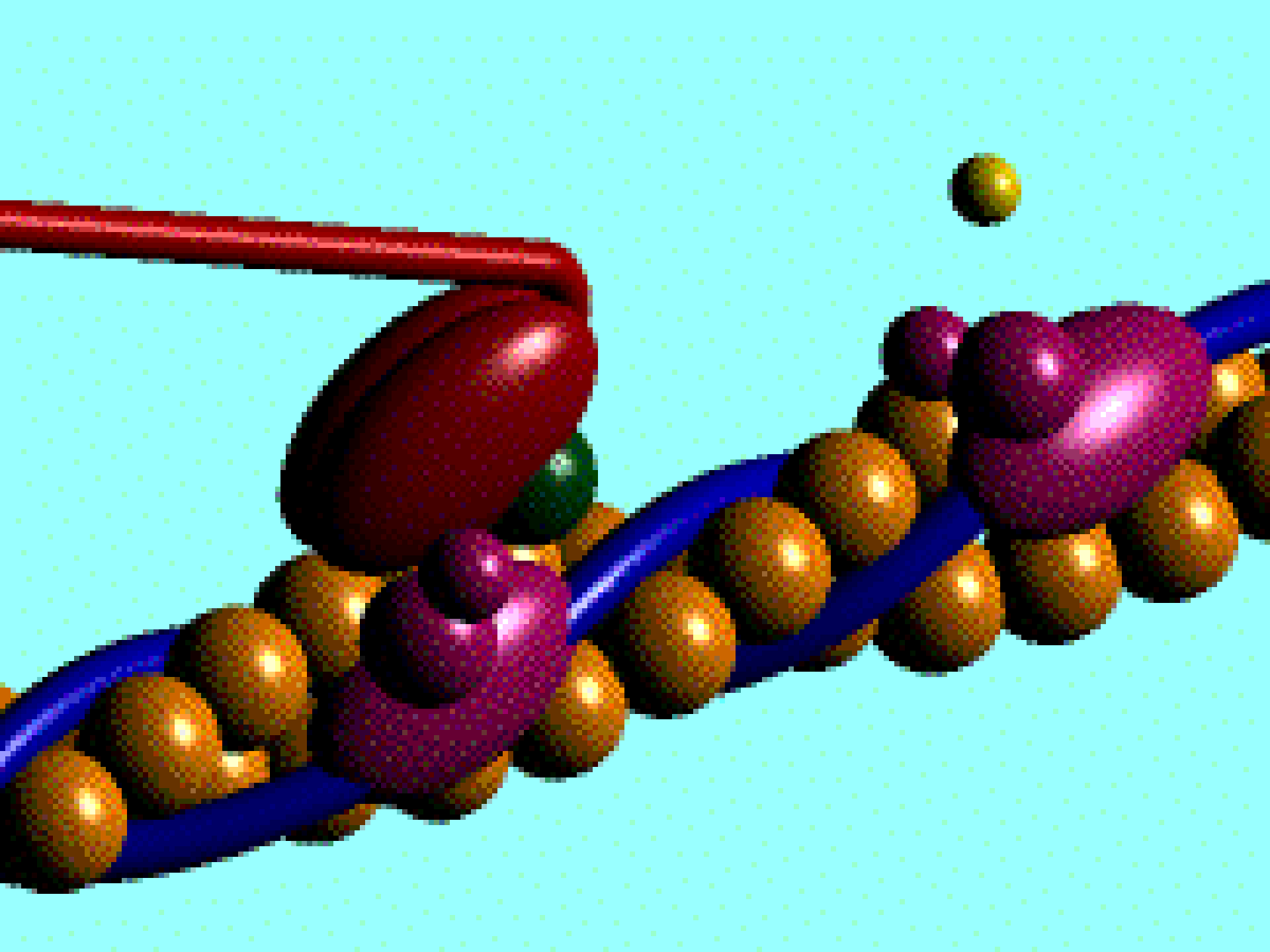

Proportion
des types de fibres musculaires
en %
Fibres de type II
Fibres de type I
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Coureurs de fond
Skieurs de fond
Skieurs de descente
Sprinters, gymnastes
Effort de longue durée et de faible puissance
Effort bref et de forte puissance


Marathonien
Sprinteur
% max de fibres de type I
% min de fibres de type I
0%
20%
40%
60%
80%
100%



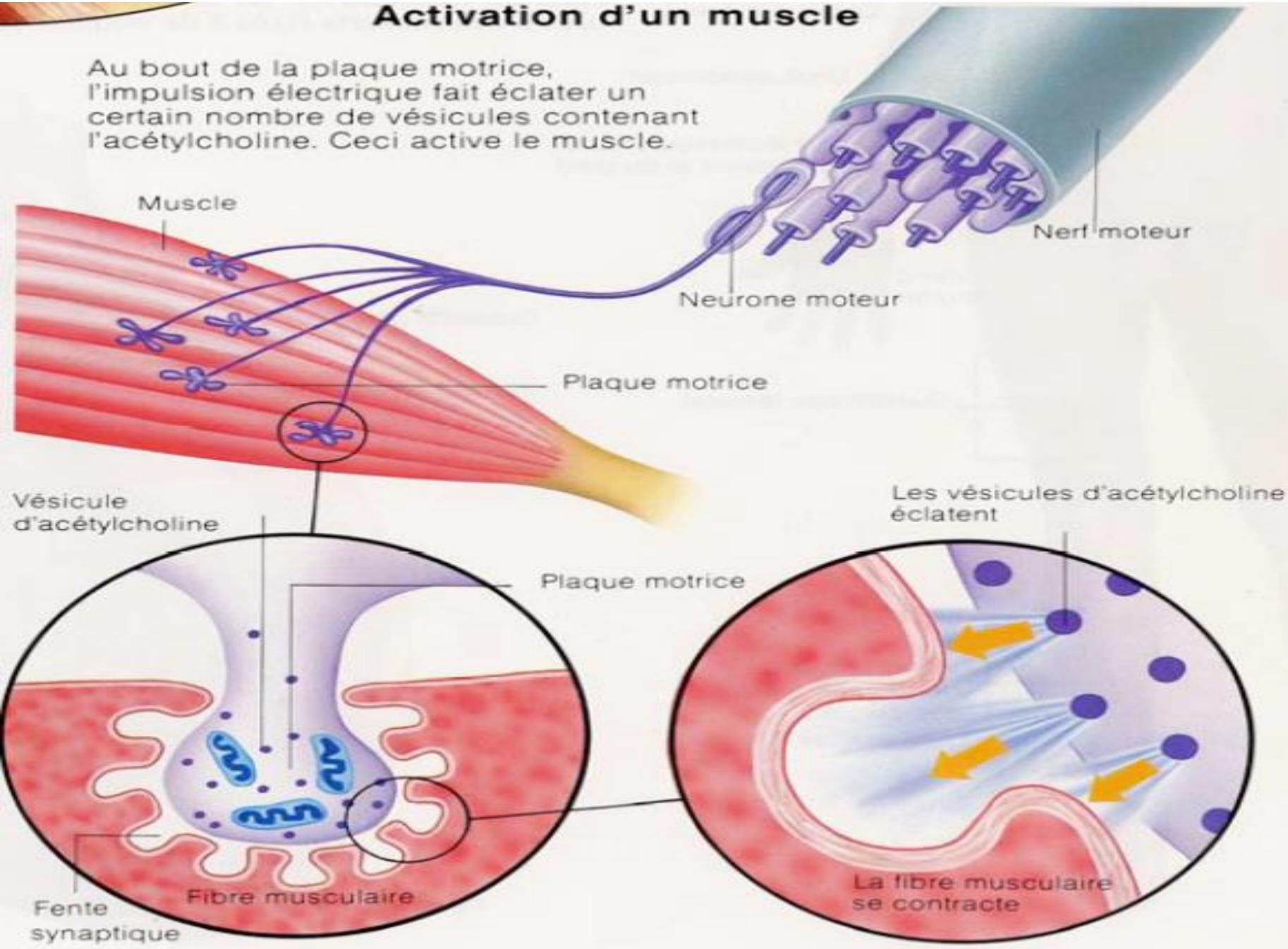
[redacted] – *Influence de l'innervation sur les propriétés du muscle.*

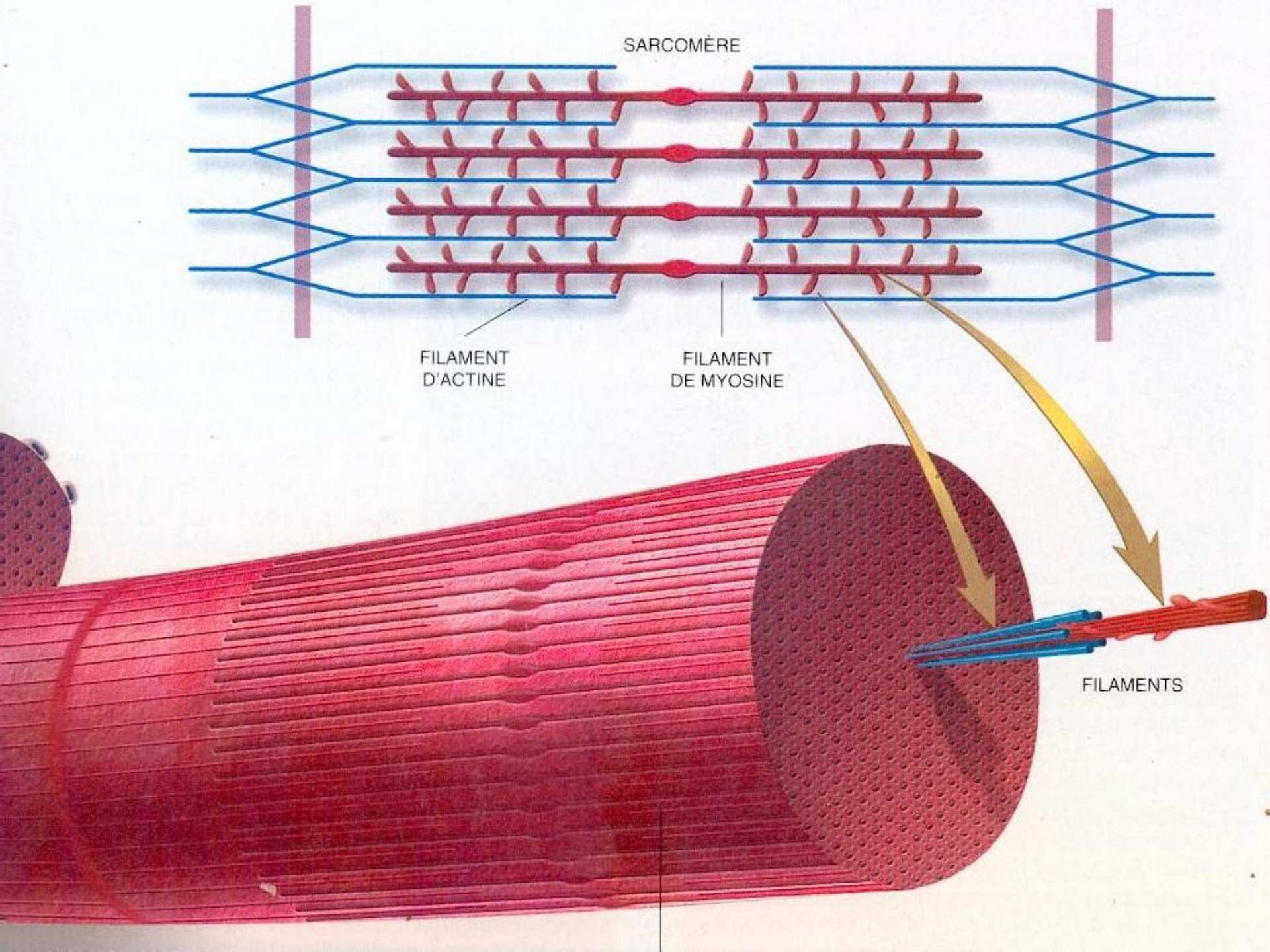
1. innervation normale, 2. innervation croisée, 3. muscle doublement réinnervé. Le muscle A est initialement un muscle rouge, alors que le muscle B est un muscle blanc (adapté de Buller, *Sci. Basis Med.*, 1965, 186-201).

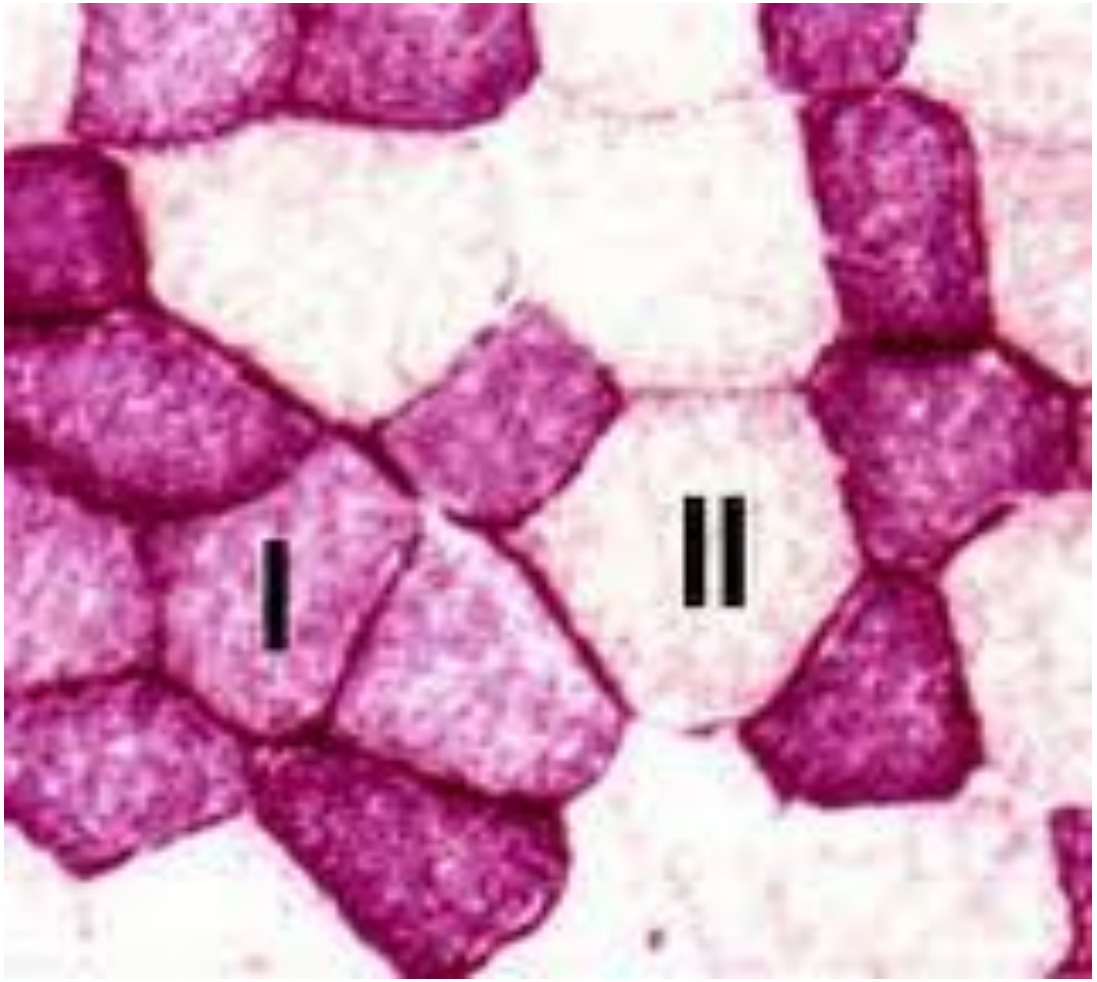


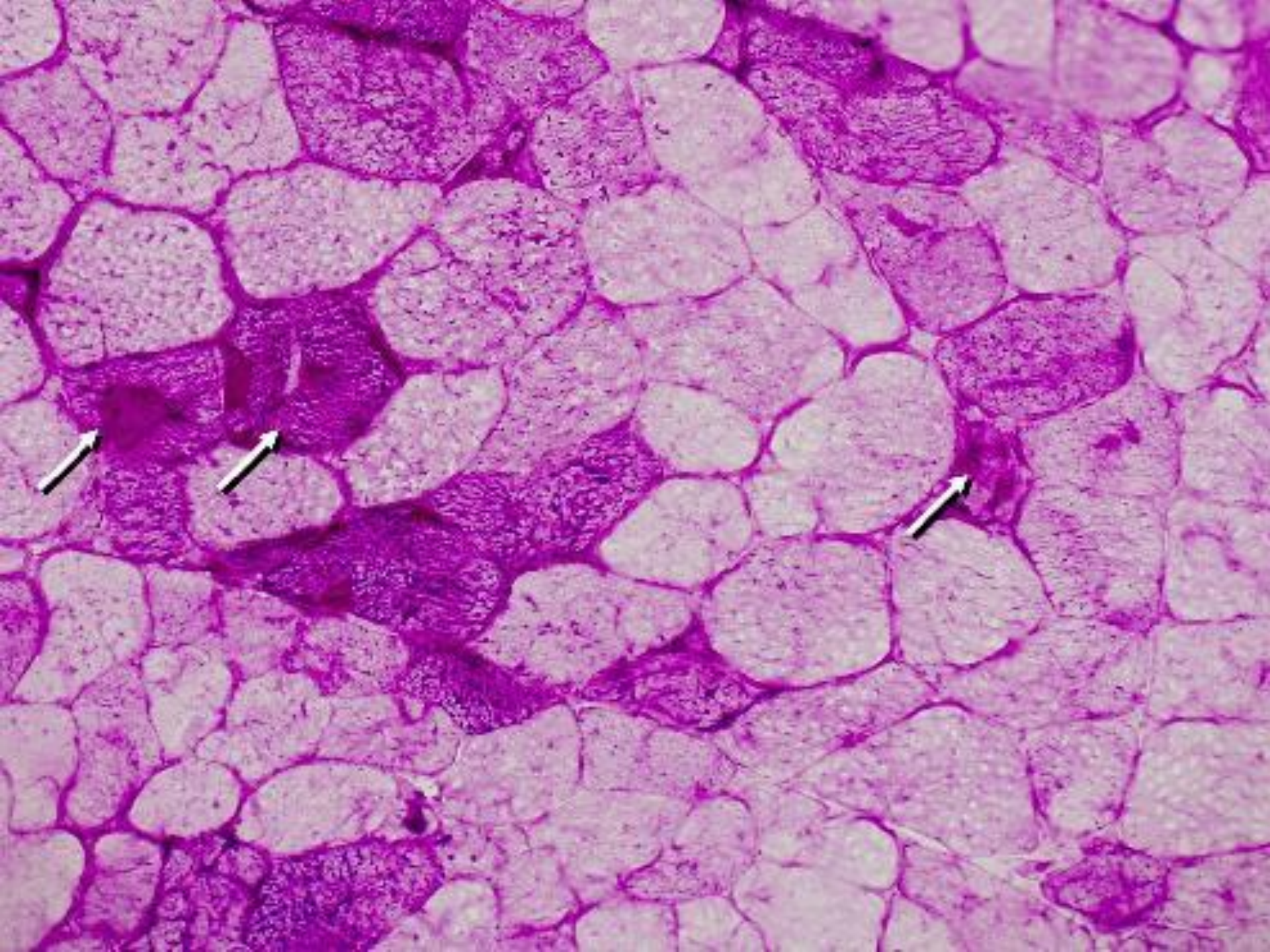
Activation d'un muscle

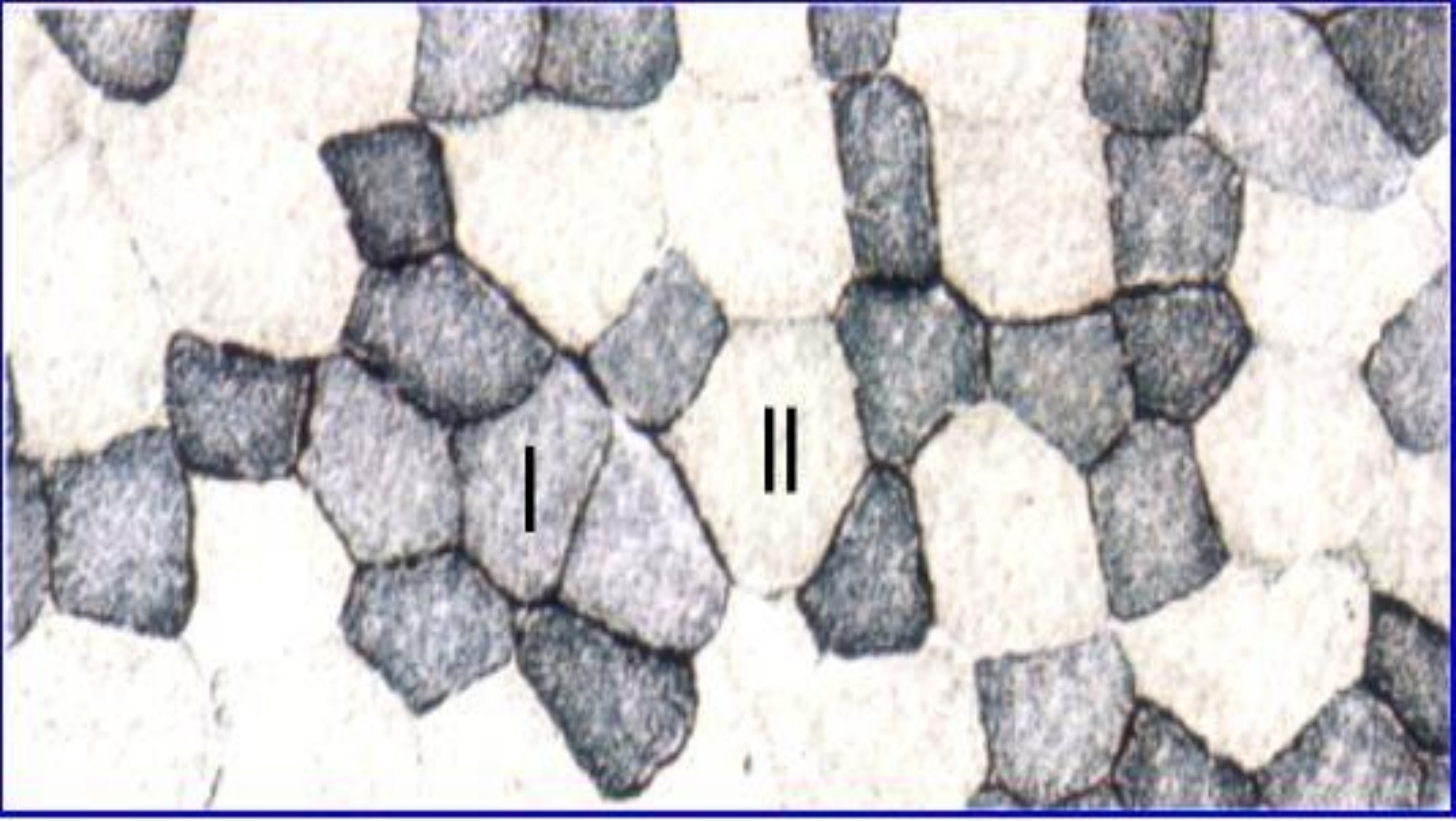
Au bout de la plaque motrice, l'impulsion électrique fait éclater un certain nombre de vésicules contenant l'acétylcholine. Ceci active le muscle.



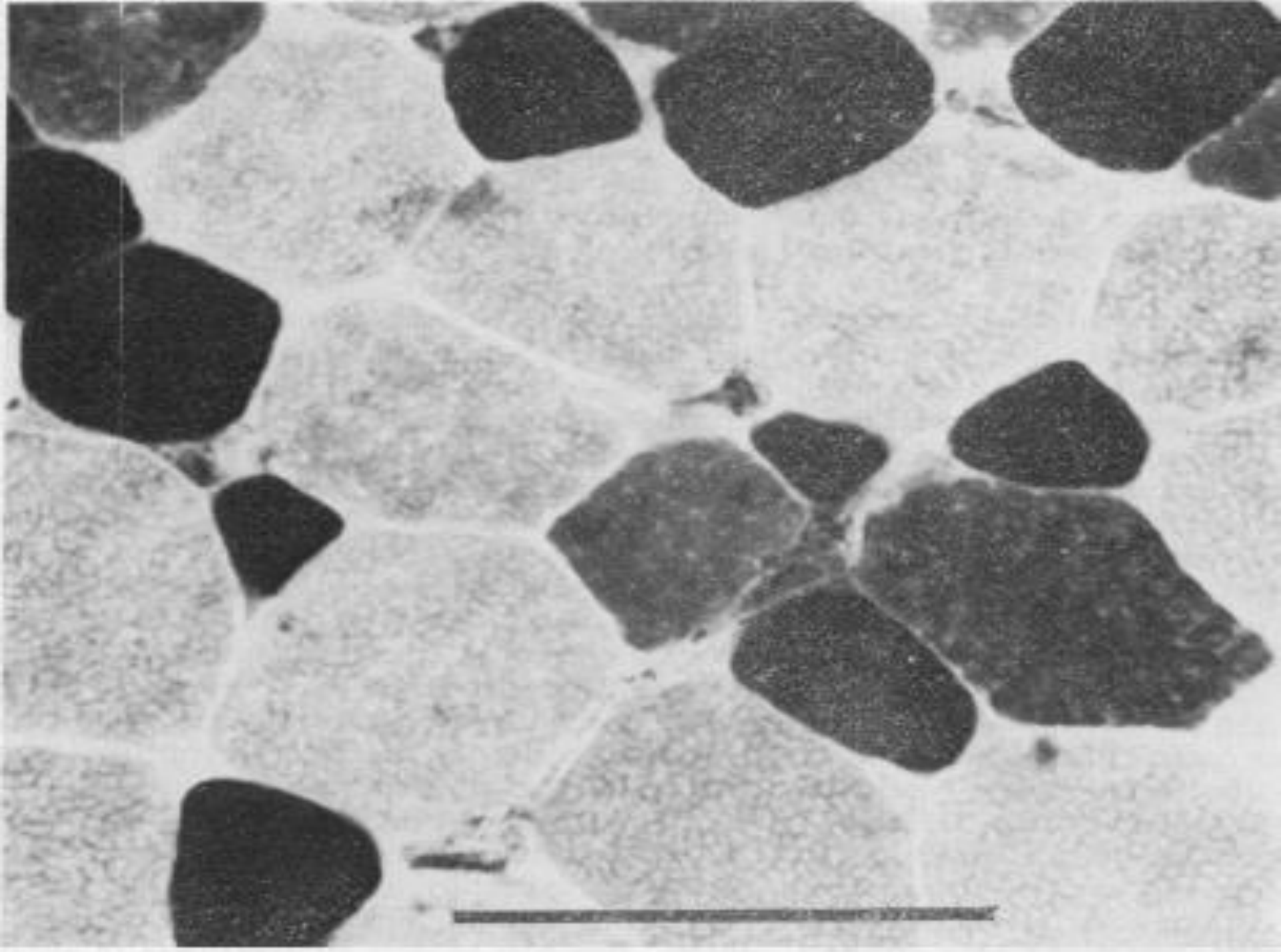

SARCOMÈRE
FILAMENT D'ACTINE
FILAMENT DE MYOSINE
FILAMENTS

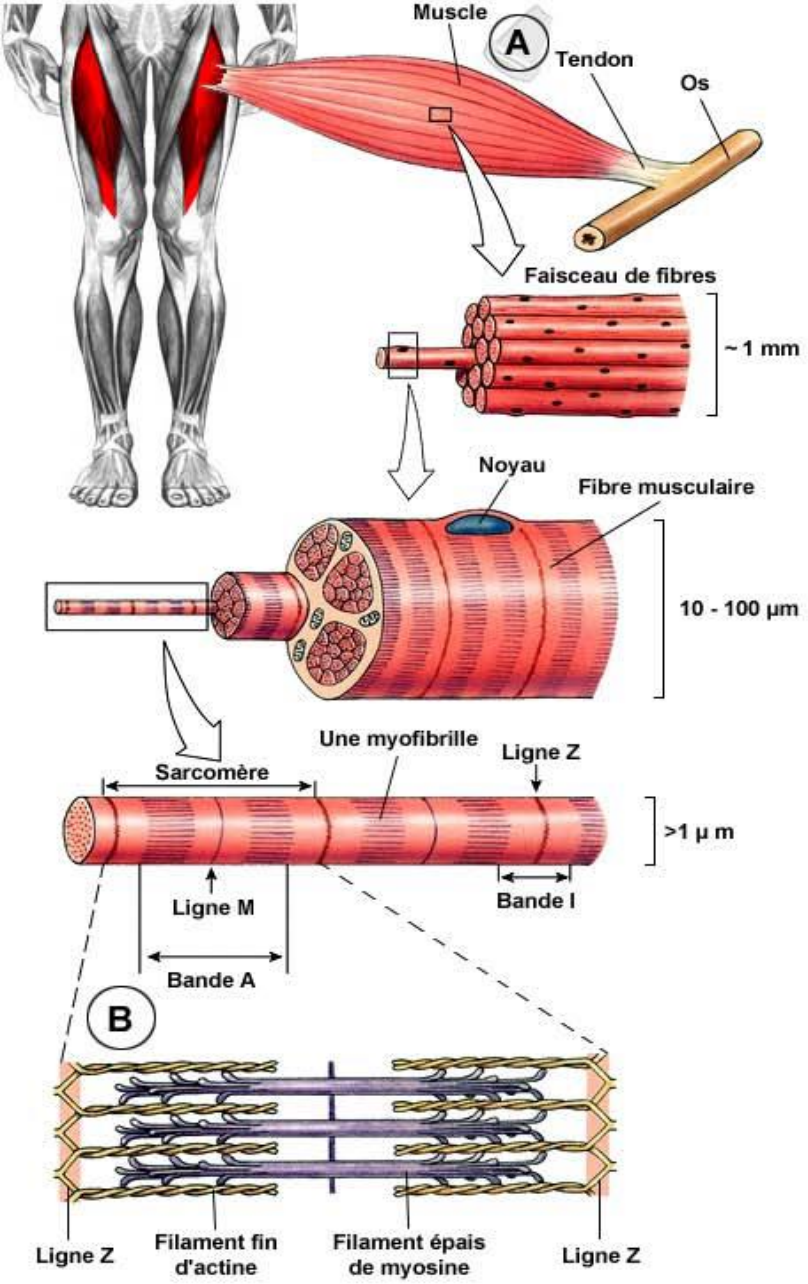

I
II

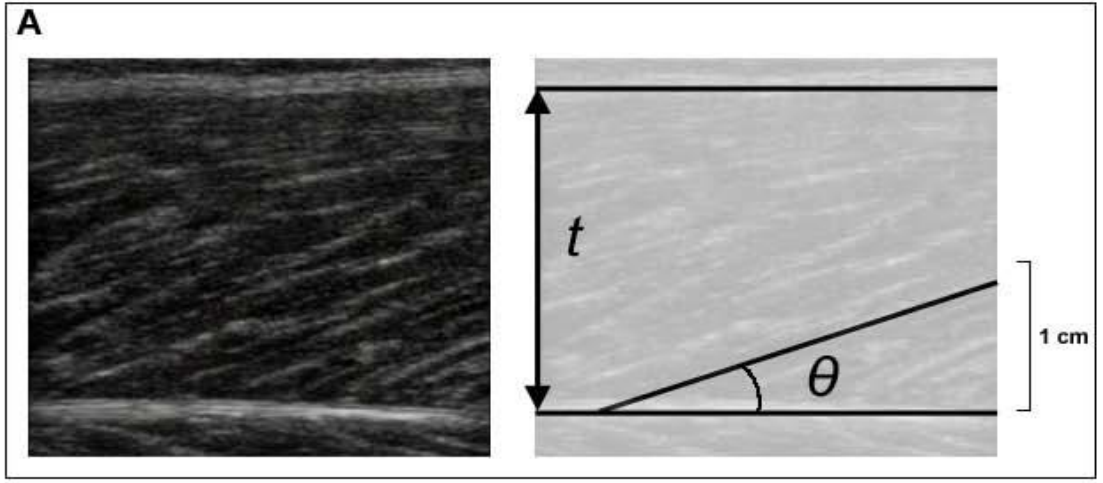


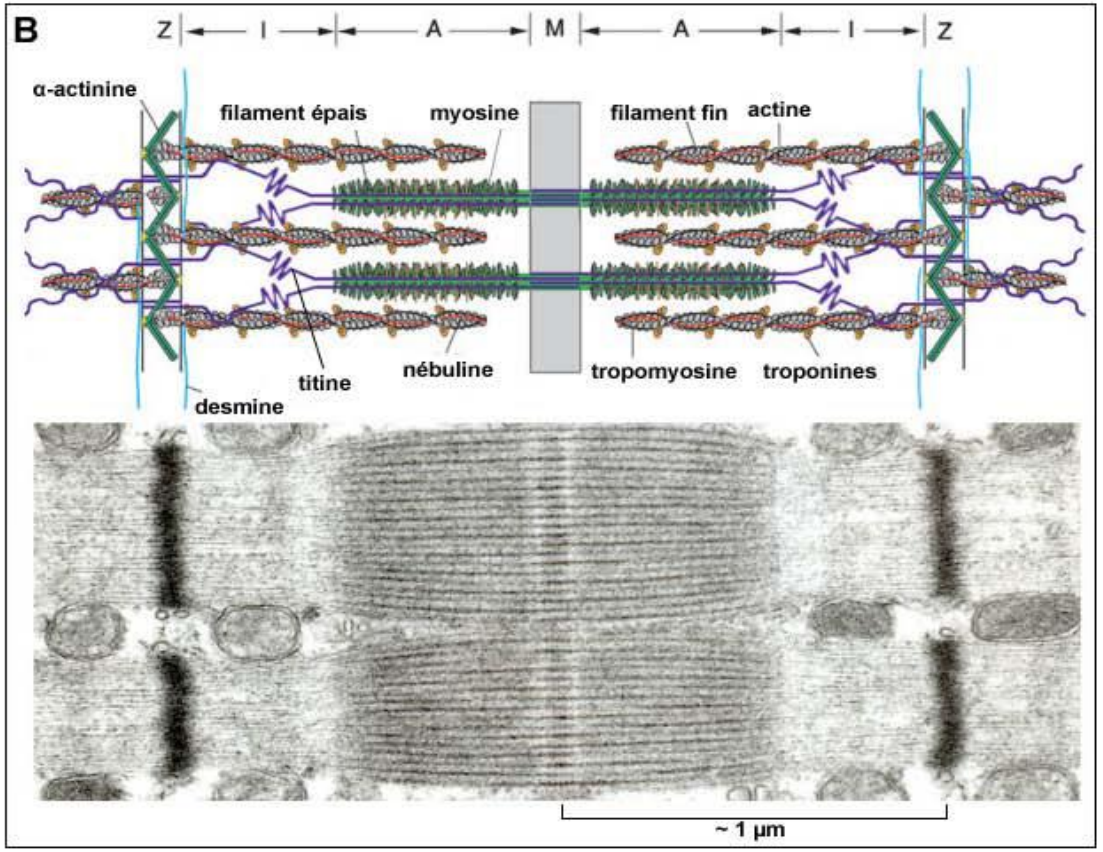


Caractérisation histoenzymologique des fibres de type I et II : les fibres de type I sont positives et colorées avec les réactions caractéristiques de la phosphorylation oxydative et/ou du cycle de Krebs ; les mitochondries étant très abondantes dans les fibres oxydatives.

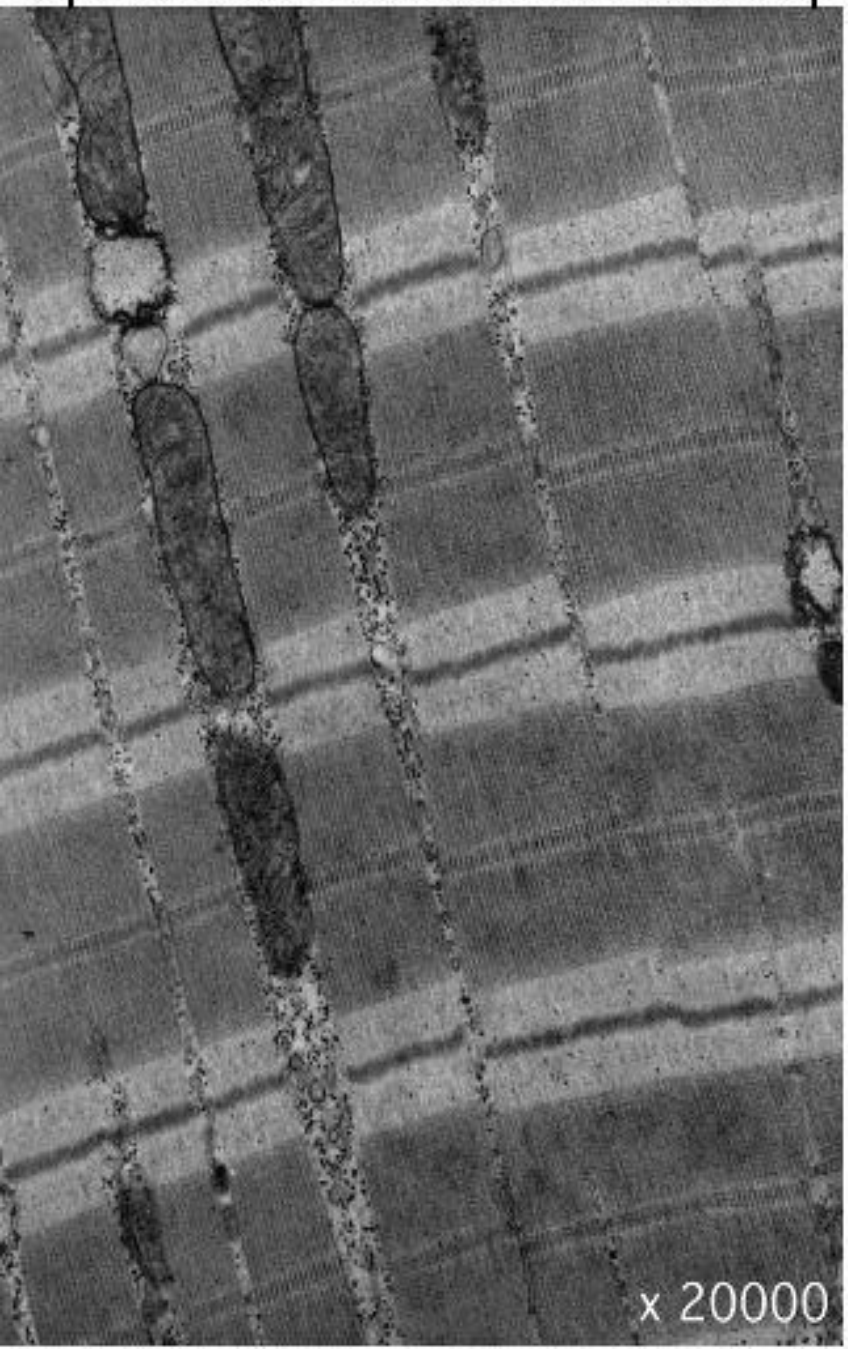


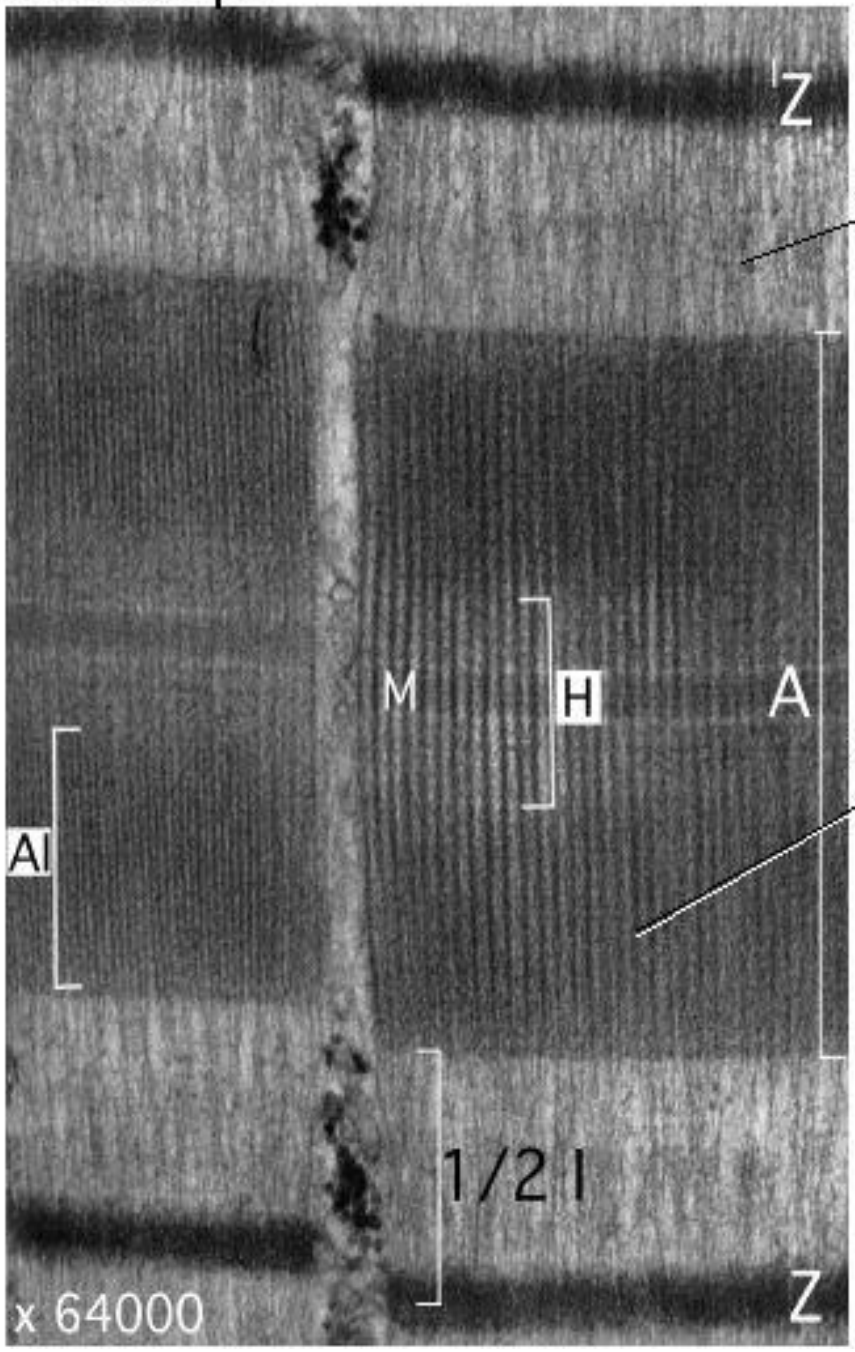

Muscle
A
Tendon
Os
Faisceau de fibres
~ 1 mm
Noyau
Fibre musculaire
10 - 100 µm
Une myofibrille
Ligne Z
Sarcomère
>1 µ m
Ligne M
Bande I
Bande A
B
Ligne Z
Filament fin d'actine
Filament épais de myosine
Ligne Z


A
t
θ
1 cm


B
Z
I
A
M
A
I
Z
α-actinine
filament épais
myosine
filament fin
actine
titine
nébuline
tropomyosine
troponines
desmine
~ 1 µm

Aspect des sarcomères en microscopie électronique





ATP ase-1

سرعة التقلص هي التي تفرق بين الألياف البطيئة والسريعة بحيث يحتوي كل نوع على شكل مختلف لأنزيم ATP ase و هو المسئول عن تحفيز هدم الـ ATP الذي يسمح بتوفير الطاقة اللازمة للتقلص العضلي أو الاسترخاء ، تحتوي الألياف البطيئة على شكل بطيء لأنزيم ATP ase أما الألياف السريعة تحتوي على شكل سريع لهذا الأنزيم . و استجابة للتنبيه العصبي يهدم الـ ATP بسرعة في الألياف السريعة على الألياف البطيئة .

Classification des types de fibres musculaires

Dans le texte nous avons utilisé le système 1 de classification des fibres musculaires , d'autre système sont souvent utilisés le système 2 classe les fibres lentes ST en type I et les fibres rapides FT en type IIa et IIb. Le système 3 classe les fibres musculaires selon leur vitesse de contraction et leur mode principale de production d'énergie. Les fibres lentes deviennent alors les fibres SO (slow ou lentes et oxydatives) , les fibres FTa sont appelée FOG (faste ou rapides , oxydatives et glycolytiques) , enfin les fibres FTa sont classées en FG (faste ou rapides et glycolytiques)

Classification des fibres			
Système 1	ST	FTa	FTb
Système 2	Type I	Type IIa	Type IIb
Système 3	SO	FOG	FG
Caractéristiques			
Capacité oxydative	Élevée	modérée	Faible
Capacité glycolytique	faible	élevée	Très élevée
Vitesse de contraction	lente	rapide	Rapide
Résistance a la fatigue	élevée	modérée	Faible
Force développée par unité motrice	faible	élevée	élevée

Le réticulum sarcoplasmique
الشبكة الاندوبلازمية

تحتوي الألياف العضلية من النوع FT على شبكة أند وبلازمية أكثر تطورا من تلك الموجودة في الألياف العضلية ST، كما تعتبر الألياف FT أحسن تكيف من أجل تحرير كالسيوم الشبكة الاندوبلازمية أثناء تنبيه العضلة هذا ما يسمح بتقلص سريع للألياف من النوع FT و بالنسبة للإنسان تتميز هذه الألياف بسرعة تقلص 5 إلى 6 مرات على الألياف ST، و بالنسبة للقوة المطبقة من طرف الألياف العضلية FT أكثر أهمية من 3 إلى 4 مرات من تلك المطبقة في الألياف ST، و هذا ما يفسر للأشخاص الذين يملكون ألياف عضلية من النوع FT في الجزء السفلي بكثرة نجدهم يتميزون بسرعة أكبر من الذين يتمتعون بألياف من النوع ST.

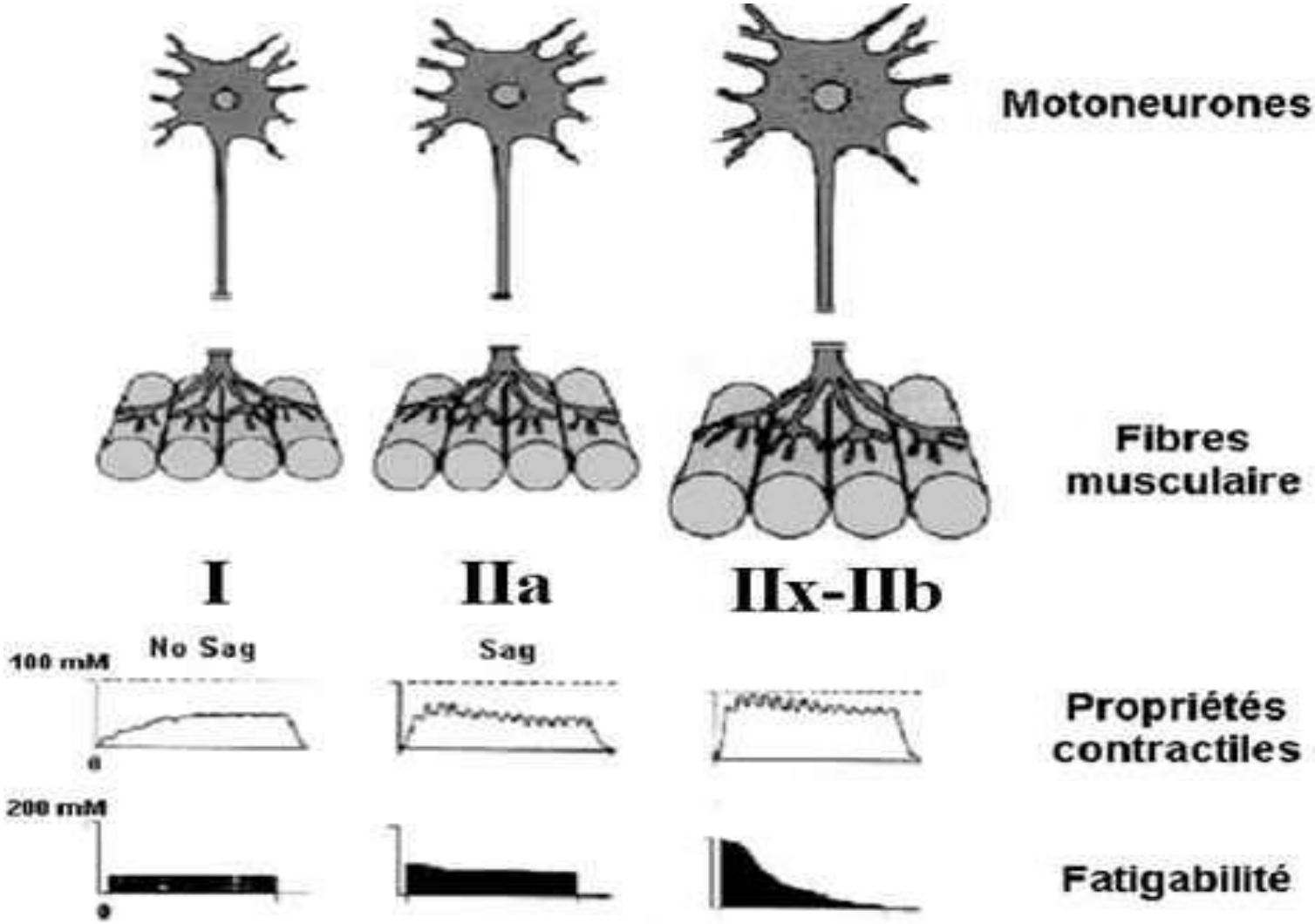
الوحدات الحركية
Les unité motrice

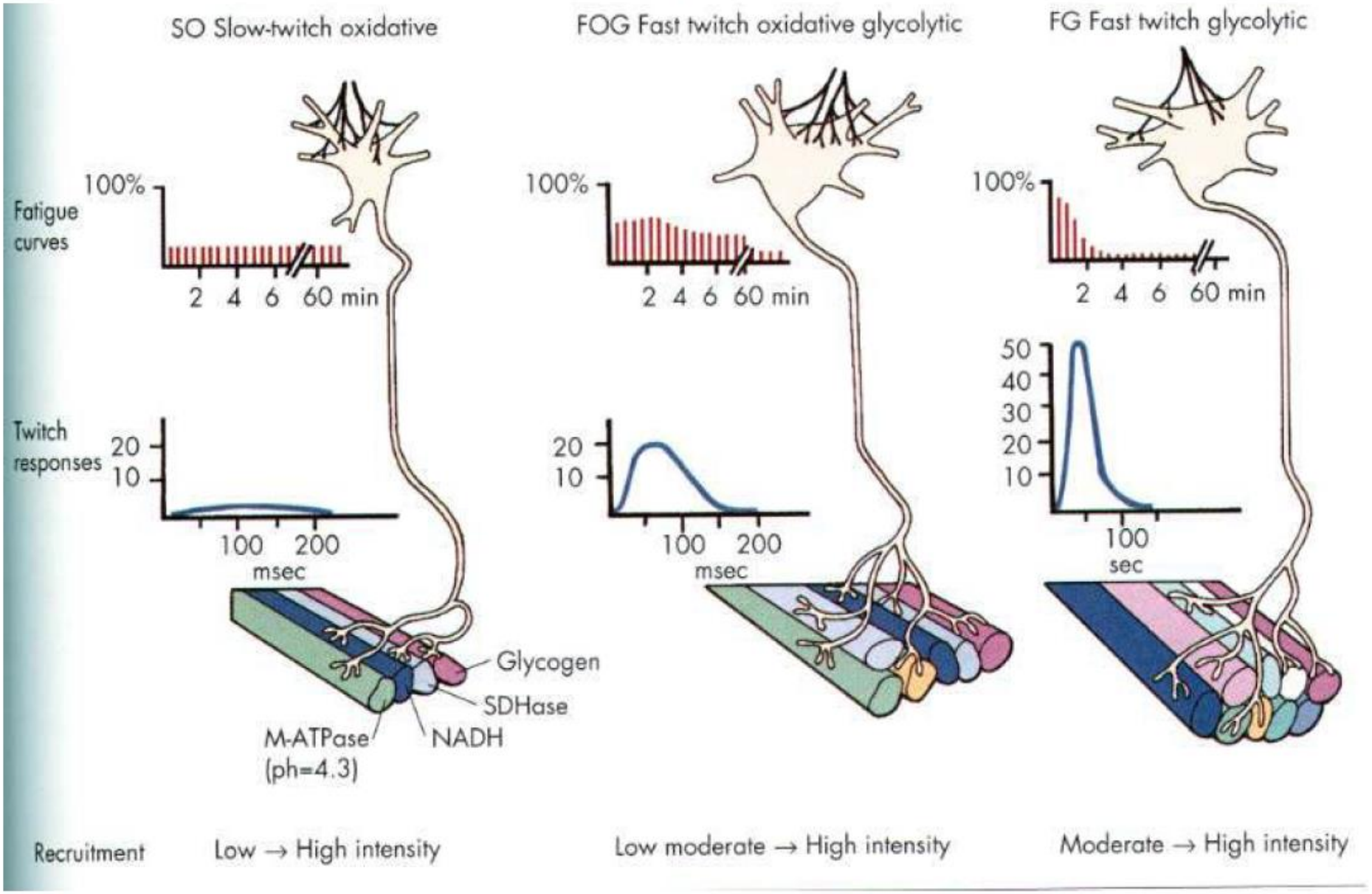
نذكر بأن الوحدة الحركية تتكون من عصبون حركي وألياف عضلية، في الألياف العضلية البطيئة ST يكون حجم الجسم الخلوي في العصبون الحركي صغير حيث ينبه حوالي مجموعة من الألياف تصل من 10 إلى 180 ليف والعكس بالنسبة للألياف السريعة FT في الوحدة الحركية للعصبون الحركي يكون الجسم الخلوي أكبر حجما مع محور أكثر عرضا بحيث يحرض حوالي 300 إلى 800 ليف عضلي

الألياف العضلية من النوع (I) slow (twitch, ST)	الألياف العضلية من النوع (II) السريعة (Fast twitch , FT)
تقلص بطيء	تحتوي على عدد كبير من الليفات.
لون أحمر.	الشبكة الاندوبلازمية أكثر تطورا و الساركوبلازم أقل حجما .
تحتوي على عدد كبير من الساركولام.	تحتوي تقريبا على حجم مماثل للجليكوجين مثل ما هو عليه في الألياف من النوع (I) و تفتقر إلى ثلاثي الغليسريد.
محتوى الليفات العضلية يكون ضعيف	التطور الجيد للشبكة الاندوبلازمية يسمح بتحرير كميات كبيرة من الكالسيوم
الشبكة الاندوبلازمية أقل تطورا.	تكوين و تشكيل سريع و قوي للمعقد أكتين ميوزين
نشاط أنزيم ATPase ضعيف	تتميز بصغر حجم الميتوكوندري
قدرة ضعيفة في نقل الكالسيوم.	عمليات التمثيل الهوائي تكون ضعيفة

الألياف العضلية من النوع (I) slow (twitch, ST)	الألياف العضلية من النوع (II) السريعة (Fast twitch , FT)
تحتوي الساركوبلازم على عدد كبير و ضخم من الميتوكوندري	لا تقاوم التعب مثل ما هو عليه الحال في الألياف البطيئة (ST).
تكون غنية بالجليكوجين العضلي و الثلاثي غليسريد	تحتوي على نوع سريع لأنزيم (ATP ase).
لديها إمكانيات كبيرة في عمليات الفسفرة التأكسدية.	الجسم الخلوي للوحدات الحركية يتميز بكبر الحجم بحيث يحفز حوالي 800 ليف عضلي
تحتوي على كميات كبيرة من الميوقلوبين.	تتميز هذه الألياف بتروبونين سريع العمل.
تكون هذه الألياف غنية بشبكة كبيرة من الشعيرات الدموية.	
تحتوي على نوع بطيء لأنزيم ATP ase.	
تحتوي الوحدات الحركية على جسم خلوي صغير الحجم .	
يحرض الجسم الخلوي من 10 إلى 180 ليف عضلي.	

الألياف العضلية من النوع (IIa)	الألياف العضلية من النوع (IIb)
عدد كبير من الميتوكوندري.	عدد محدد للميتوكوندري.
الساركوبلازم غني بالجليكوجين و تحتوى على كميات من الميوقلوبين	تفتقر الساركوبلازم للميوقلوبين و لكنها غنية بالجليكوجين.
عمليات الهدم و البناء فيها تأكسدية و لكن أقل مما هو عليه في الألياف البطيئة (ST).	العمليات الايضية للجليكوليز اللاهوائي هي الآلية الرئيسية لتوفير الطاقة.
تقوم بعمل مهم و كبير في الآلية اللاهوائية اللبنية (الجلكزة اللاهوائية).	النشاط الهوائي ضعيف جدا.
لها خاصية بيوكيميائية و إمكانية مقاومة التعب.	
تعمل عمل الألياف العضلية السريعة و البطيئة (مختلطة العمل).	


Motoneurones
Fibres musculaire
I
IIa
IIx-IIb
No Sag
Sag
100 mM
0
200 mM
0
Propriétés contractiles
Fatigabilité



S : Slow

FR : Fast fatigue Resistant

FF : Fast Fatiguable

En moyenne, les muscles contiennent :

- 50 % de fibres de type I
- 25 % de fibres IIa
- 25 % de fibres IIb

Le % de fibres varie considérablement en fonction des muscles

- Exemple : muscle vaste externe de l'homme
- 53 % de fibres I
- 33 % de fibres IIa
- 14 % de fibres IIb

- ces 3 types de fibres forment la plupart des muscles squelettiques mais proportion liée à leur fonction usuelle :
- Muscles posturaux (cou, dos, jambe) : proportion ++ de fibres I
- Muscles actifs (bras, épaule) : proportion ++ fibres glycolytiques
- Certains groupes musculaires sont composés en majeur partie par un seul type de fibre (soléaire : fibres lentes)

La proportion de fibres dans muscle est variable et détermine sa fonction:

frontalis/orbicularis oculi (15% fibres lentes)

» triceps (60% fibres rapides)

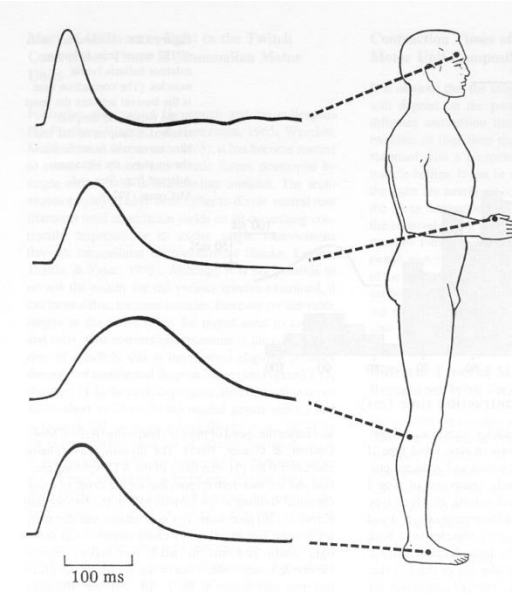
soleus (» 80% fibres lentes)

extensor digitorum brevis (60% fibres lentes)

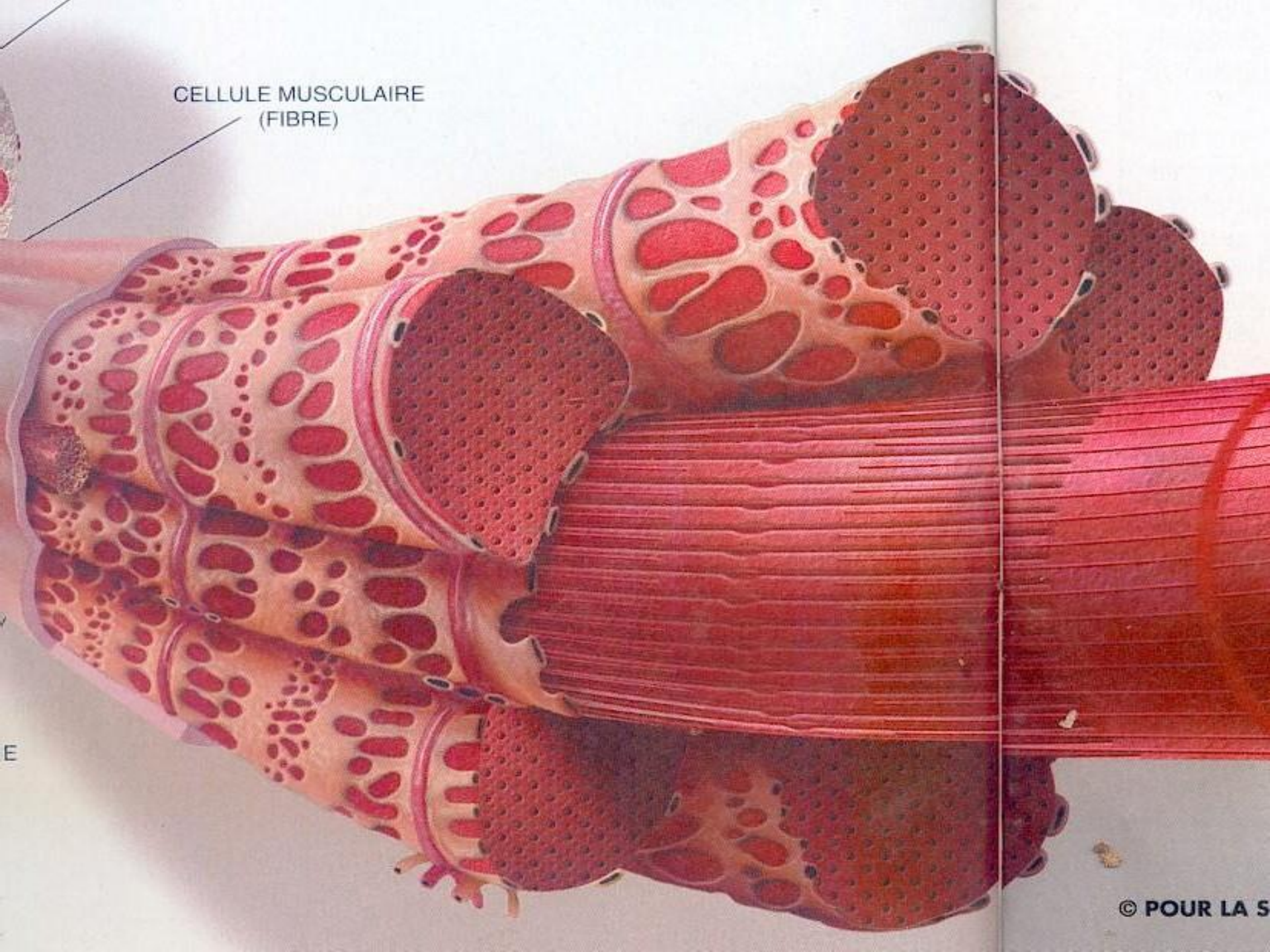
3- Répartition des fibres au sein du muscle

- Muscles posturaux: fibres lentes +++

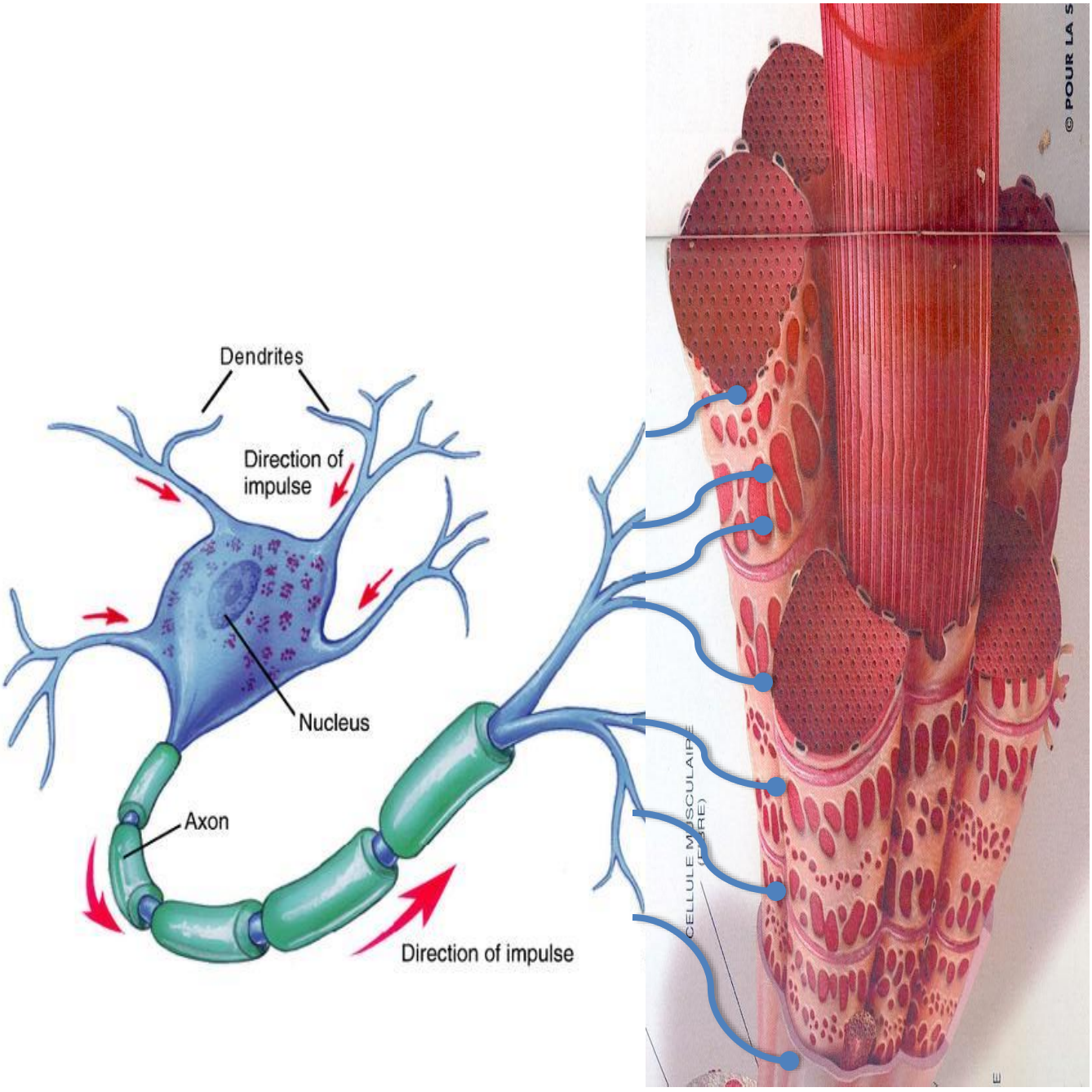
- Muscle impliqués dans la motricité (notamment les muscles fléchisseurs et extenseurs): fibres rapides +++



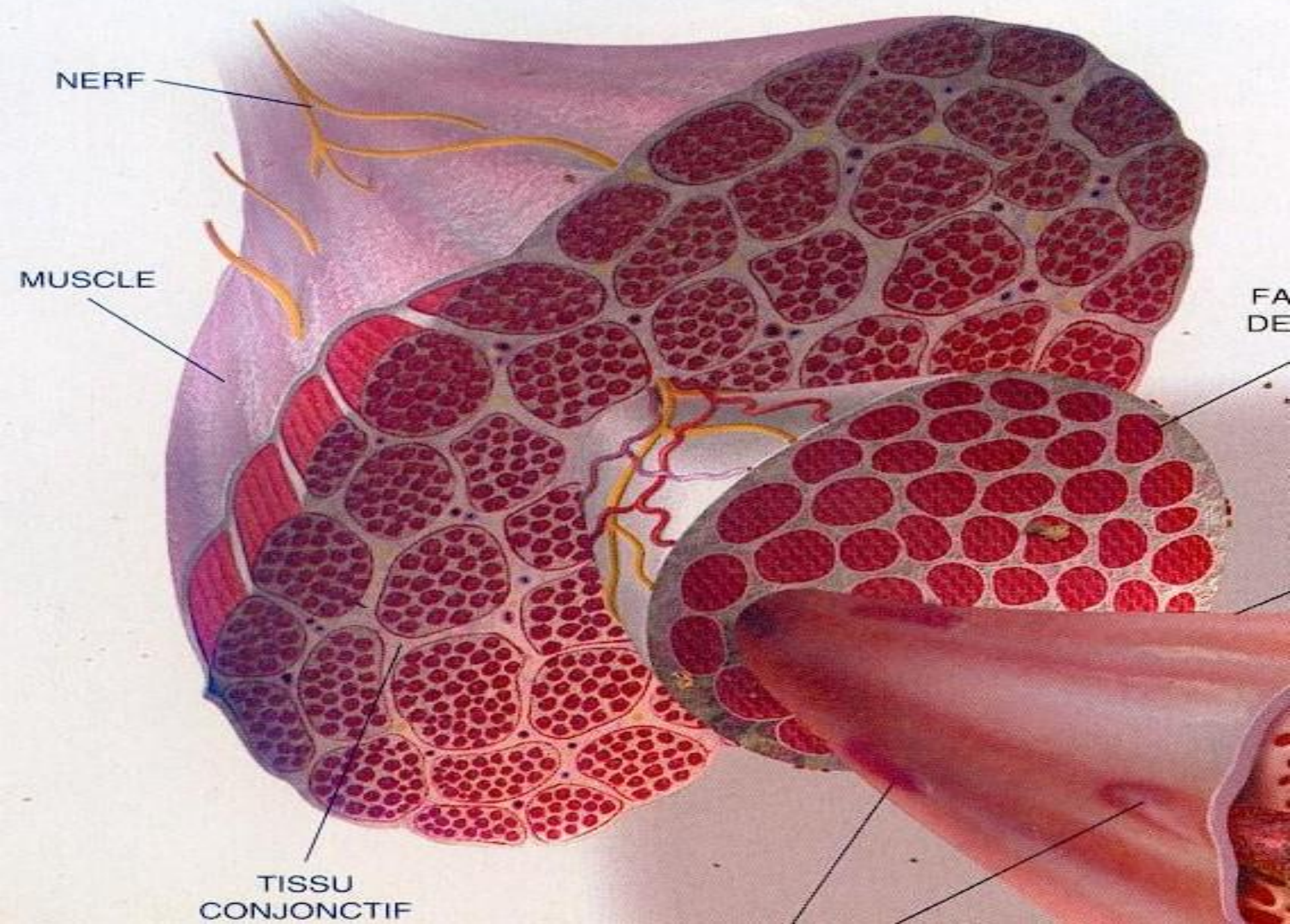
- triceps (60% fibres rapides)
- soleus (» 80% fibres lentes)
- extensor digitorum brevis (60%

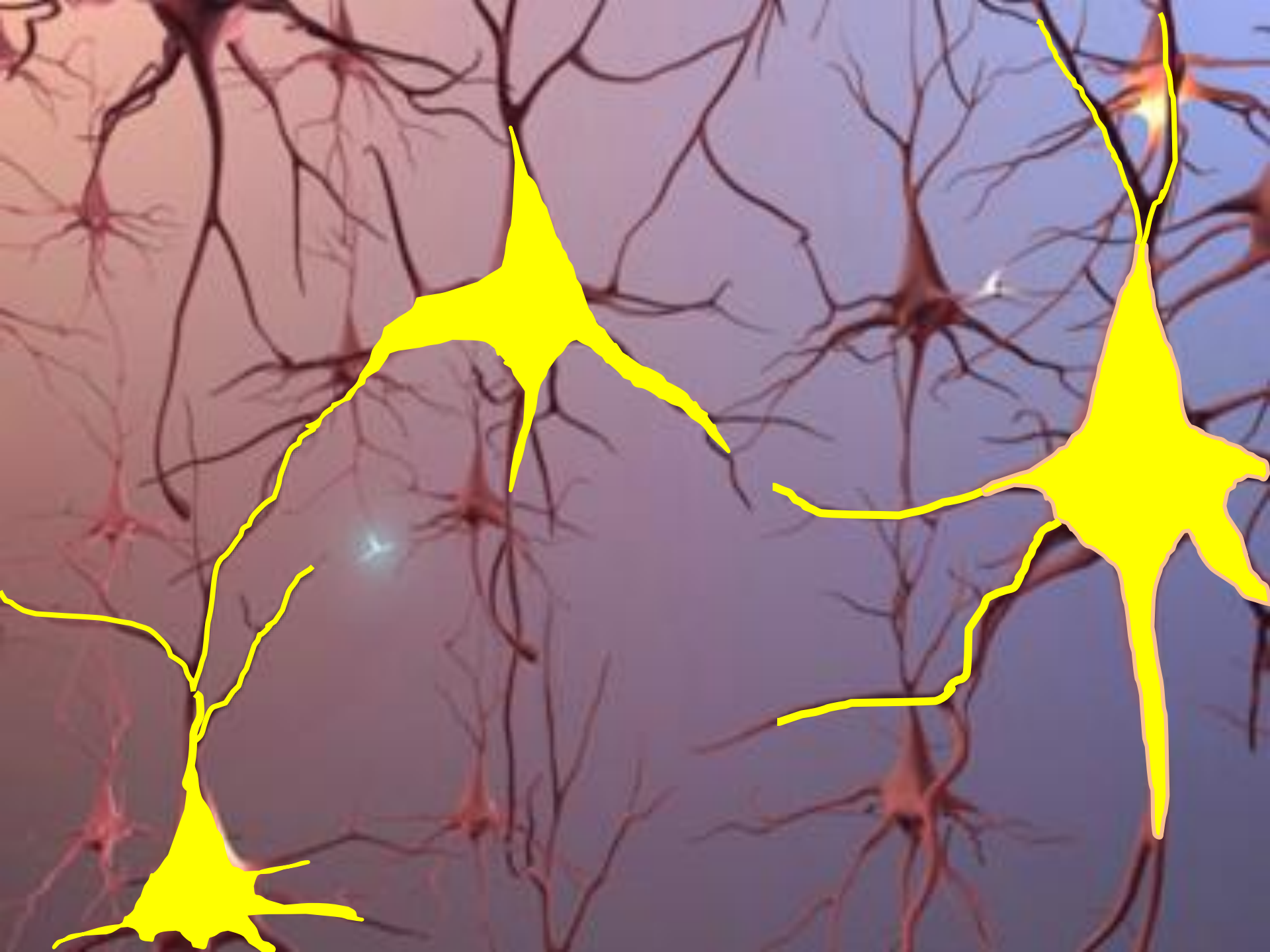


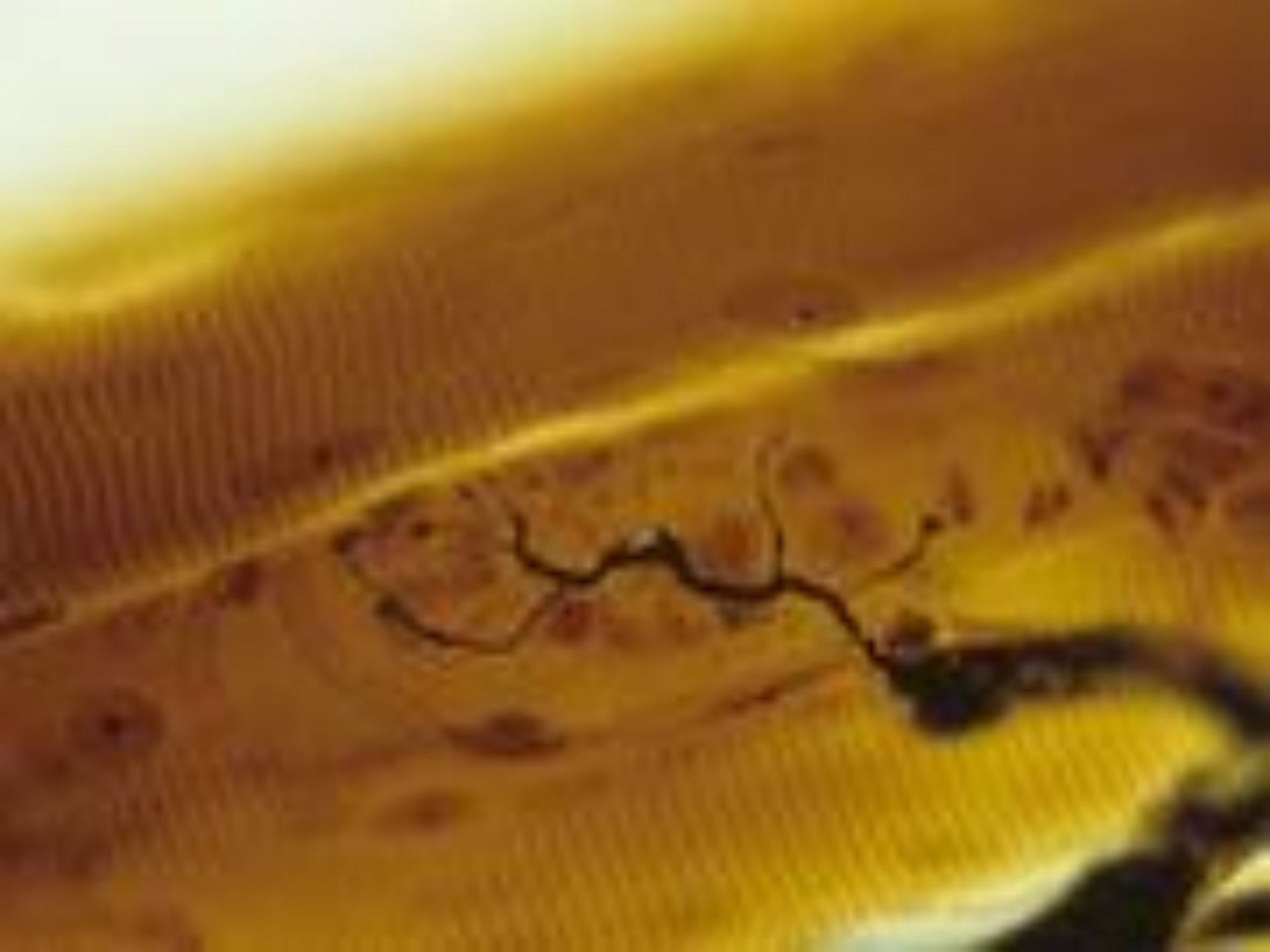
© POUR LA S

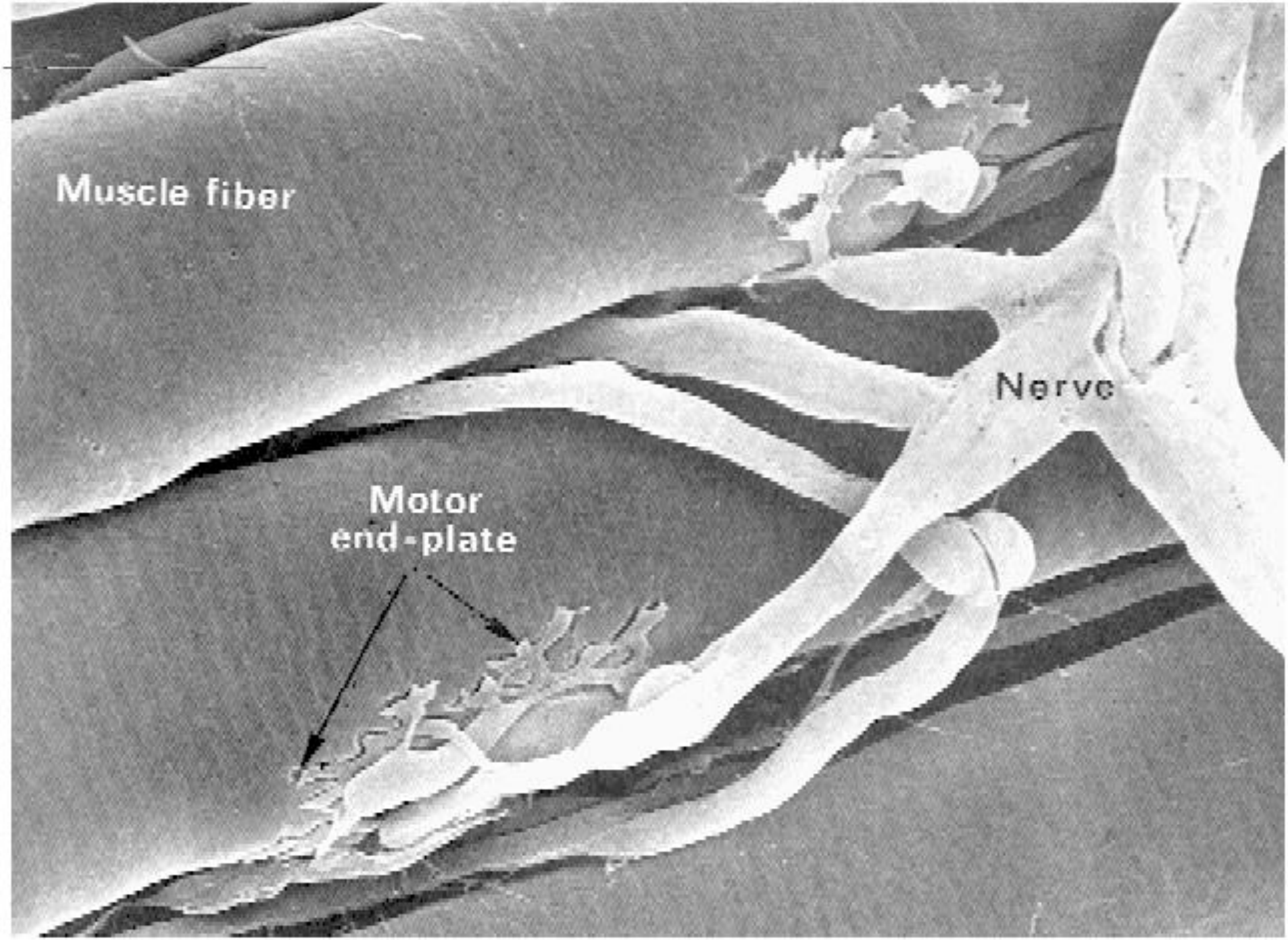

Dendrites
Direction of impulse
Nucleus
Axon
Direction of impulse
© POUR LA S
CELLULE MUSCULAIRE (FIBRE)

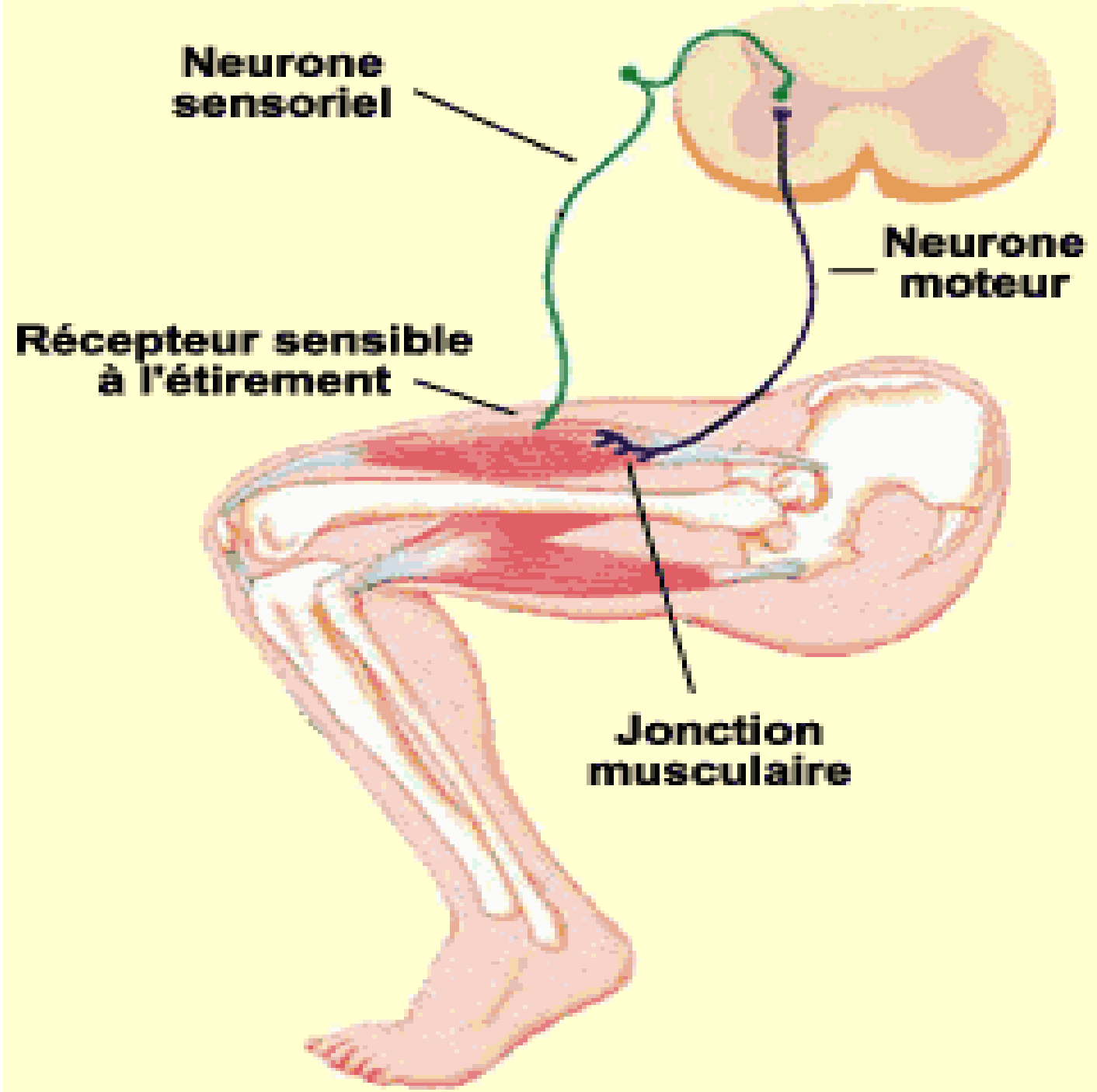
à peu près autant de fibres lentes que [illegible] est assez sensib



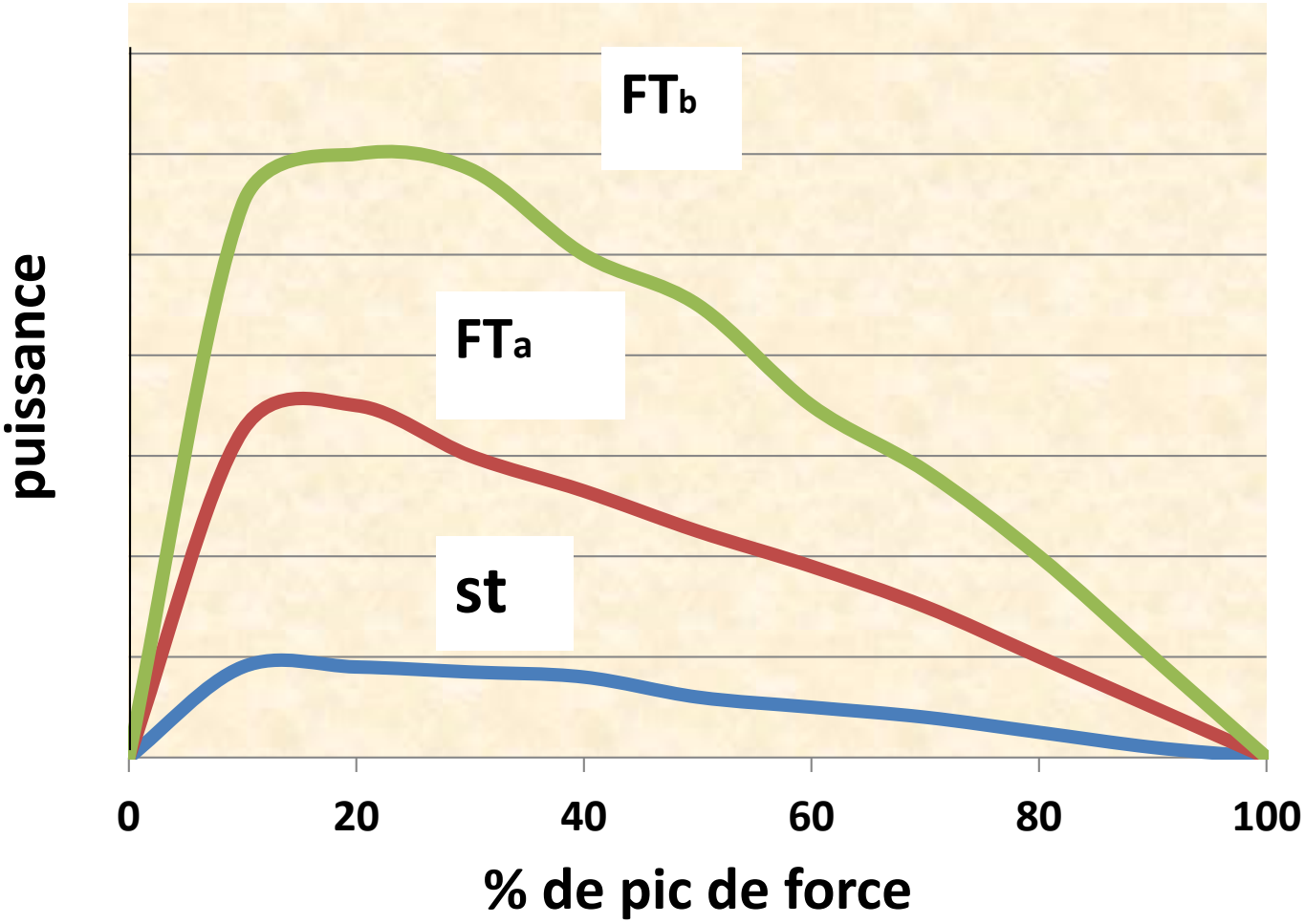





Muscle fiber
Nerve
Motor
end-plate


Neurone sensoriel
Neurone moteur
Récepteur sensible à l'étirement
Jonction musculaire

Les puissances pic générées par chaque type de fibres musculaire à différents pourcentages de la force maximale



Caractéristique structurales et fonctionnelles des différentes type de fibres musculaires ; d'après close (1967).

Type de fibre			
Caractéristiques	**ST**	**FTa**	**FTb**
Nombre de fibres par motoneurone	10-180	300-800	300-800
Taille du motoneurone	petite	important	Important
Vitesse de contraction nerveuse	lente	rapide	Rapide
Vitesse de contraction (ms)	110	50	50
Type de myosine ATP ase	lente	rapide	Rapide
Dimension du réticulum sarcoplasmique	Petites	importantes	Importantes
Force de l'unité motrice	faible	important	important

تحفيز الألياف العضلية
Recrutement des fibres musculaire

عندما يحفز العصبون الحركي ليف عضلي بشدة صغيرة للتنبيه تسمى هذه الحالة عتبة التنبيه وهو مهم من أجل تحريض الاستجابة وإذا كانت شدة التنبيه ضعيفة أي أقل من العتبة لا توجد عملية تقلص عضلي وعلى العكس من أجل كل تحريض أو تنبيه يفوق أو يساوي العتبة تحدث عملية تقلص قصوى على مستوى الليف العضلي وهذا ما يفسر بقانون الكل أو لا شيء ، ومثل كل الألياف العضلية لنفس الوحدة الحركية تستقبل نفس التنبيه العصبي بحيث تتقلص كل الألياف إذا كان التنبيه في مستوى العتبة وبالتالي تخضع الوحدة الحركية لقانون الكل أو لاشيء

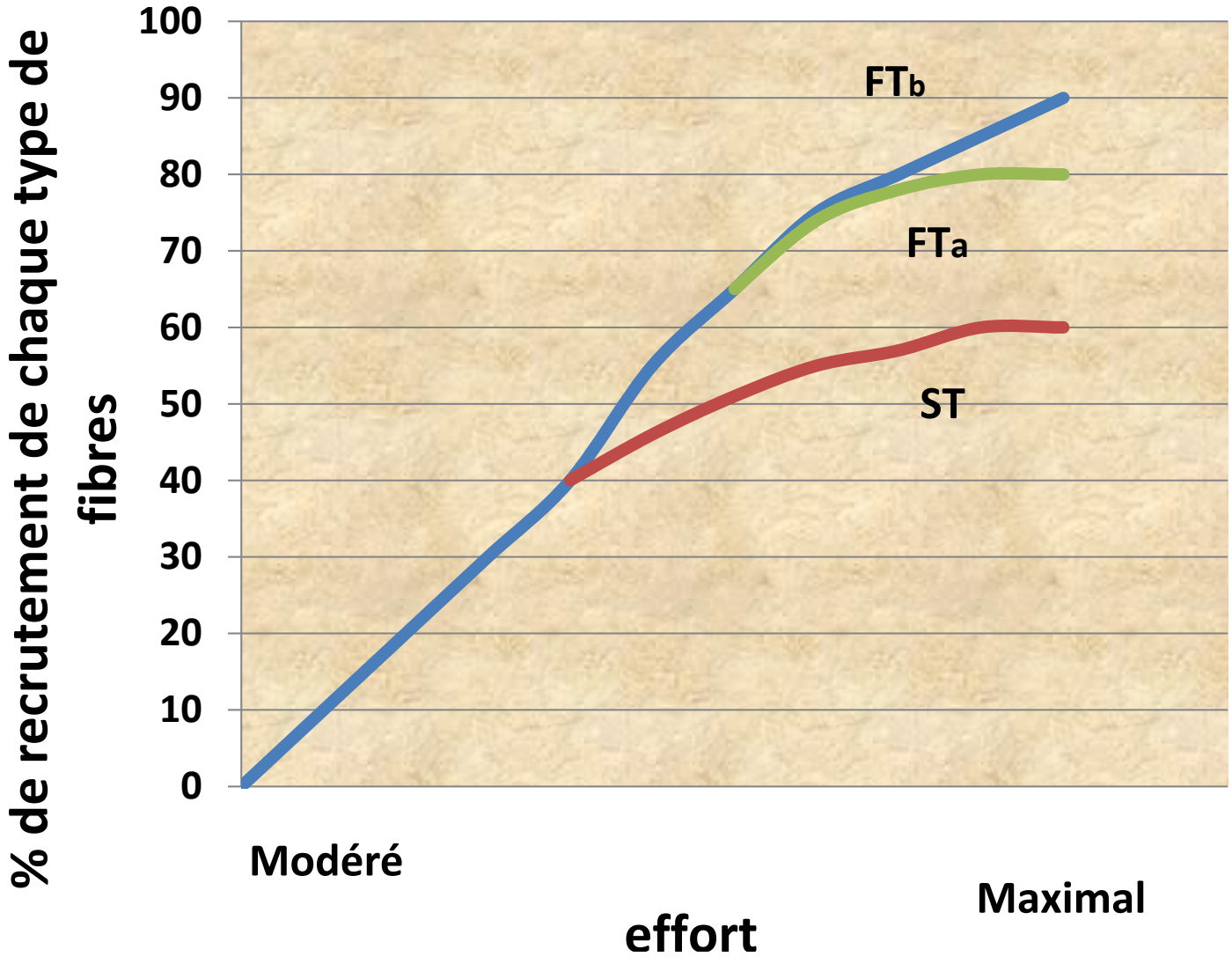
نظام ونسق تحفيز الألياف العضلية ومبادئ الحجم
Ordre de recrutement des fibres musculaires et principe de taille

تحفز الألياف العضلية ذات عصبون حركي صغير أولا ، وهذا ما يلاحظ عند أداء جهد بدني بشدة متصاعدة ، الوحدات الحركية للألياف من النوع ST تحفز أولا وهذا راجع لتوضع لعصبونات حركية ذات حجم صغير ، وإذا تطلبت القوة زيادة عدد الوحدات الحركية تستخدم الألياف من النوع FT .

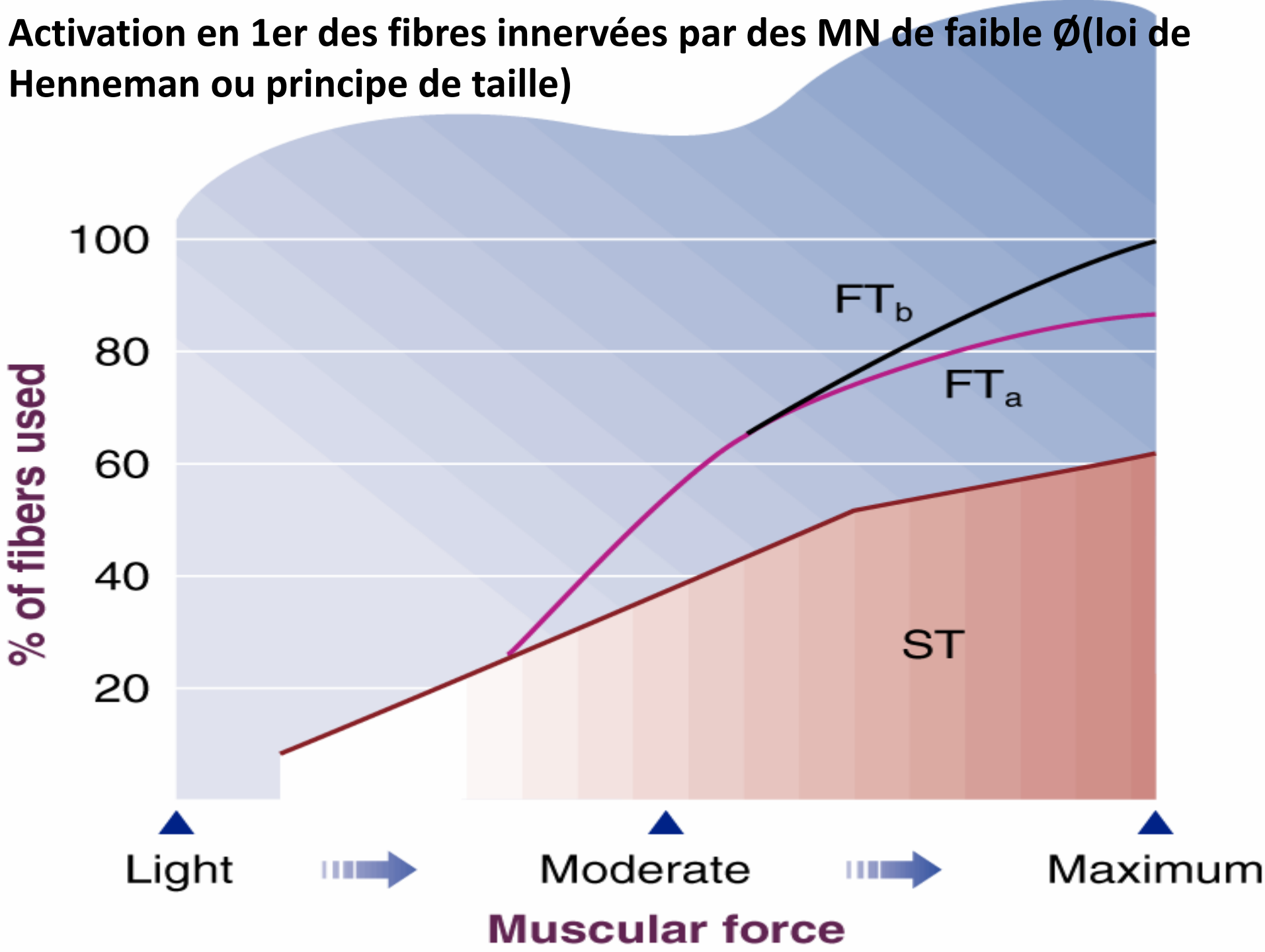
و عند أداء جهد بدني بشدة ضعيفة مثل المشي عن تطبق عملية التقلص عن طريق الألياف البطيئة ST و عند تطلب زيادة الجهد والشدة العضلية تتدخل الألياف العضلية من النوع FTa ، وإذا ما ارتفعت شدة الجهد البدني مثل السرعة القصوى تتدخل الألياف العضلية السريعة FTb.

حتى عند الوصول إلى الجهد البدني الأقصى لا يحفز الجهاز العصبي100 % كل الألياف المتاحة حتى إذا تطلب ذلك زيادة في إنتاج أكثر قوة، مجموعة فقط من الألياف هي التي تنبه، مما يسمح بحماية العضلة من التمزقات و الالتهابات الوترية، وإذا حدث ما إن تقلصت كل الألياف العضلية تؤدي هذه القوة إلى تمزق العضلة والأوتار

Le recrutement progressif des fibres musculaires lentes et rapide d'après Wilmore et Costill, 1998



Activation en 1er des fibres innervées par des MN de faible Ø(loi de Henneman ou principe de taille)



التضخم العضلي
L’hypertrophie musculaire

هناك نوعان من التضخم العضلي التي يمكن أن نلاحظها وهي :

1- تضخم وقتي أو انتقالي
Hyper trophie transitoire

تتمثل عملية التضخم هذه في زيادة حجم العضلة عند أداء تمرين فردي ، حيث يحدث رئيسيا دخول السوائل أو الماء في الوسط البين خلوي للعضلة هذا السائل يأتي من الوسط البلازمي ، وهذا ما يطلق عليه بعملية التضخم الانتقالية بحيث تبقى لمدة قصيرة ، هذا السائل يدخل إلى الأوعية الدموية بعد ساعات من التدريب .

1- تضخم مستمر و مزمن
Hyper trophie chronique

و يتمثل هذا التضخم في زيادة حجم العضلة بعد مدة من التدريب المستمر والطويل بحيث يلاحظ تحولات بنيوية في العضلة ، عن طريق زيادة عدد الألياف العضلية أو زيادة حجم هذه الألياف

تضخم الألياف العضلية
Hypertrophie des fibres musculaire

يفسر تضخم العضلة رئيسيا إلى العوامل التالية :

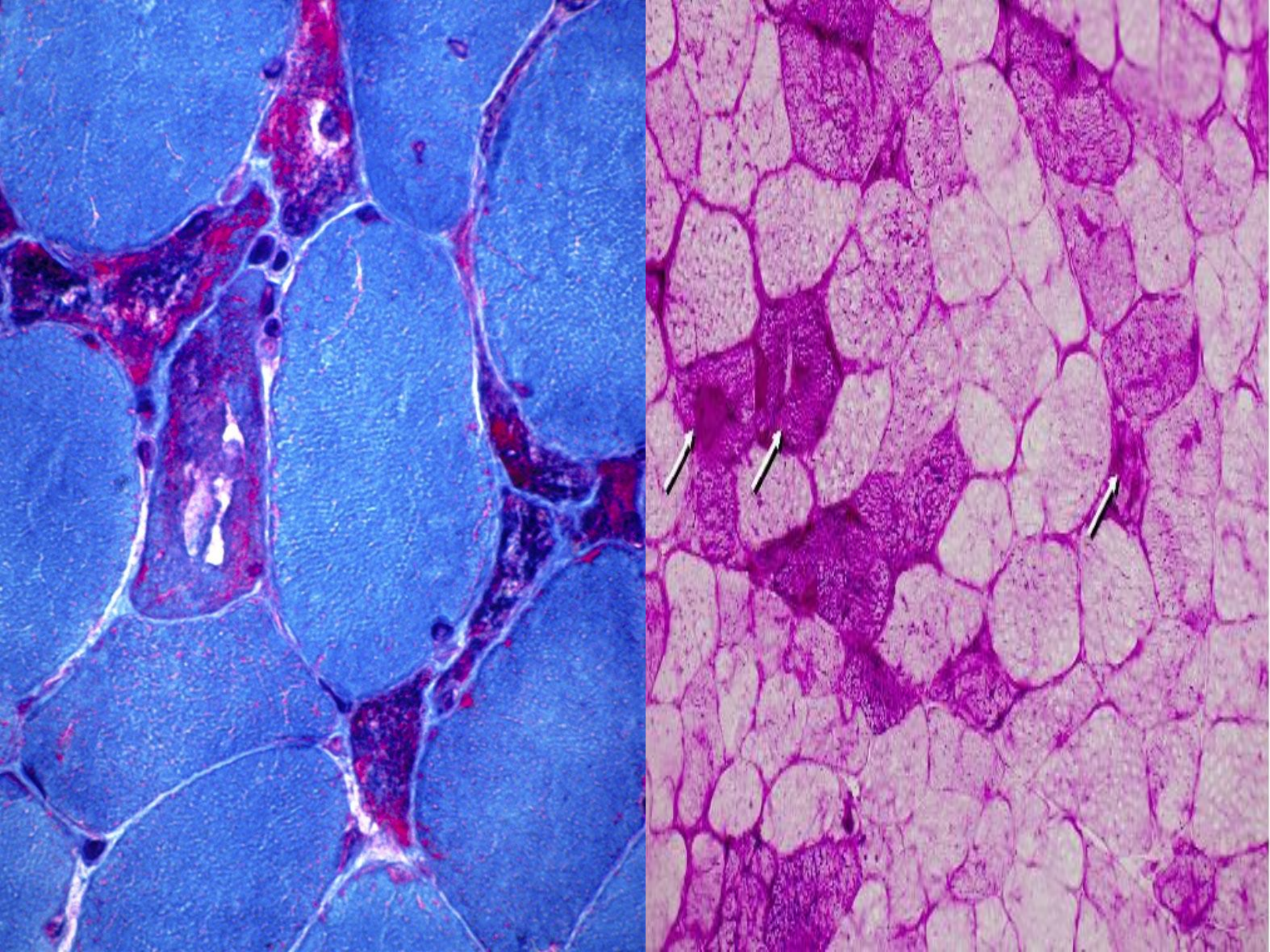
1- زيادة عدد الليفات العضلية

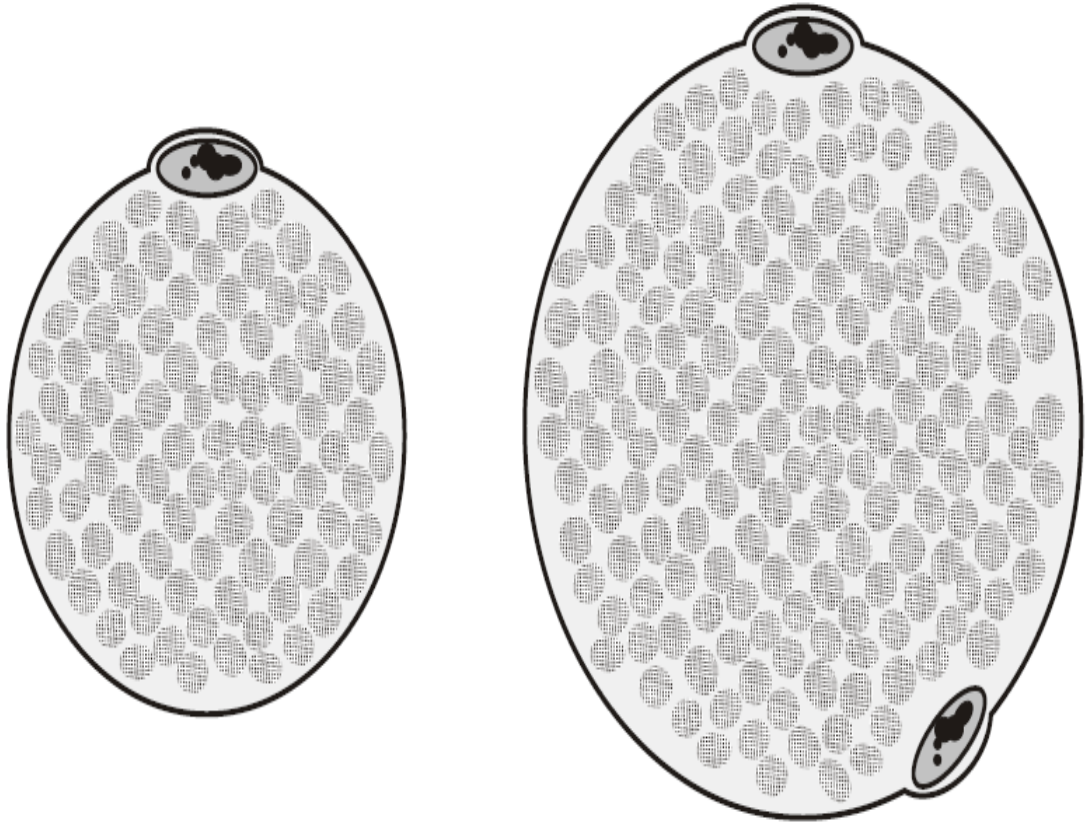
2- زيادة عدد خيوط الاكتين و الميوزين

3- زيادة الحجم الساركوبلازمي

4- زيادة في النسيج الضام

5- تدخل عوامل أخرى مختلفة





إن التدريب الرياضي المرتفع الشدة للقوة يمكن أن يرفع بطريقة واضحة مساحة وعرض الألياف العضلية بحيث يحدث هذا التضخم بزيادة عدد الألياف العضلية وعدد خيوط الأكتين والميوزين و هذا ما يزيد من إمكانية تشكيل المعقد أكتين ميوزين و بالتالي الرفع من قوة التقلص القصوى .

ينتج التضخم العضلي من تدريب القوة وهذا بزيادة تصنيع و تركيب البروتين في العضلة، و عند أداء التمرينات آليات تصنيع البروتين تنخفض و على العكس آليات الهدم ترتفع، تنعكس هذه العملية في فترات الراحة حيث يزداد تصنيع البروتينات

A -يحدث تضخم الألياف العضلية في شكلين متزامنين :

1- زيادة كثافة الألياف العضلية :

أ- يظهر من خلال زيادة عدد خيوط الأكتين و الميوزين بتصنيع متزايد للبروتينات التقلصية

ب- تتراكم الخيوط الجديدة في محيط الليفات العضلية الموجودة

ج- زيادة عدد الليفات في الليف العضلي وهذا ما يرفع من حجمه.

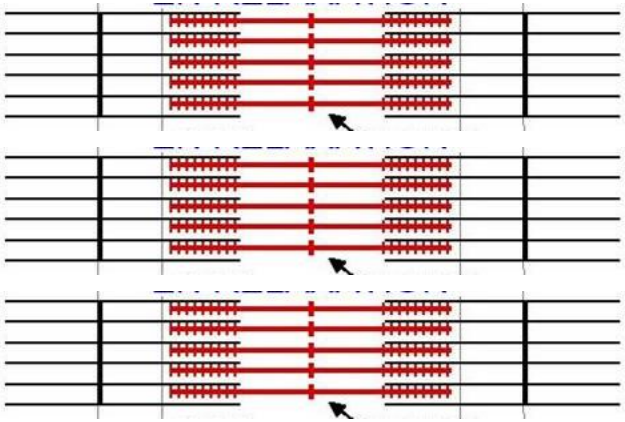
2- زيادة المساحة المربعة للعضلة بعد 6إلى 12 أسبوع ، الألياف العضلية تتسع مساحتها وبذلك تتضخم العضلة .

عدد الوحدات التقلصية (sarcomère) في الليفات العضلية يرتفع في شكل سلسلة أو بطريقة متوازية على حسب الوحدة التقلصية الموجودة ، غير أن زيادة عدد الوحدات التقلصية بالتوازي يعتبر العامل الوحيد الذي يرفع من القوة القصوى، حيث أن تركيز الليفات يرتفع مما يطور القدرة على تطبيق قوة أكبر وأكثر، أما بالنسبة لزيادة عدد الوحدات في شكل سلسلة يؤدي إلى تطوير السرعة .

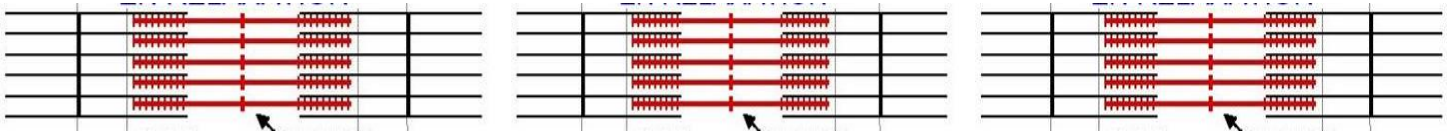
B-زيادة تضخم الساركوبلازم

تحاط الألياف العضلية المخططة بغشاء رقيق مطاطي الذي يحتوي على الساركوبلازم الغنية بالماء بحيث تكون بشكل أحمر نظرا لوجود الميوقلوبين ، الذي يرتفع حجمه مع متطلبات التدريب في وجود الميتوكوندري ، يعمل التدريب الهوائي على تطوير الألياف العضلية الحمراء هذا يعمل على زيادة تركيز الميوقلوبين و تطور حجم الميتوكوندري، يأخذ هذا التطور في الحجم الساركوبلازم و هنا ما يجعلنا نتحدث عن تضخم الساركوبلازم .

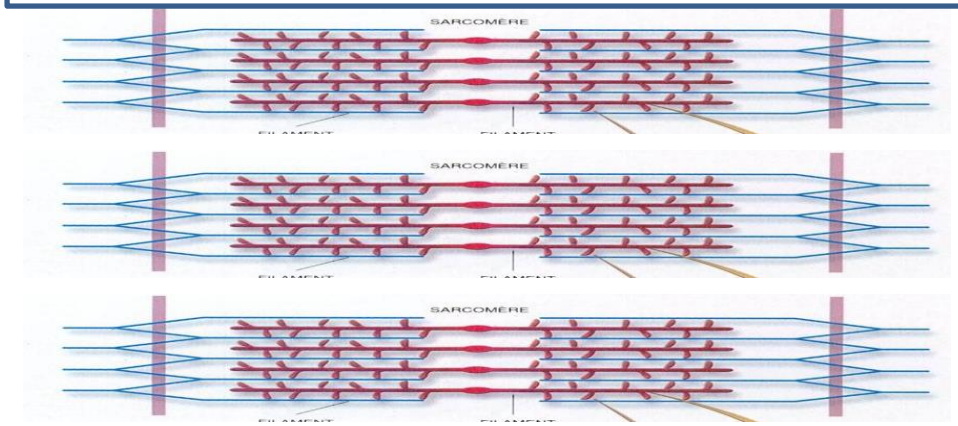
Sarcomères en parallèle



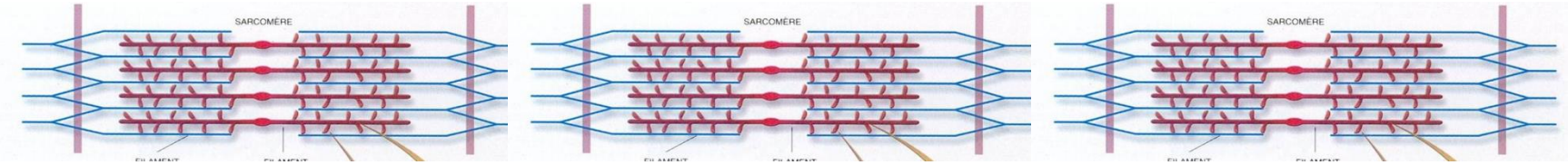
Sarcomères en série

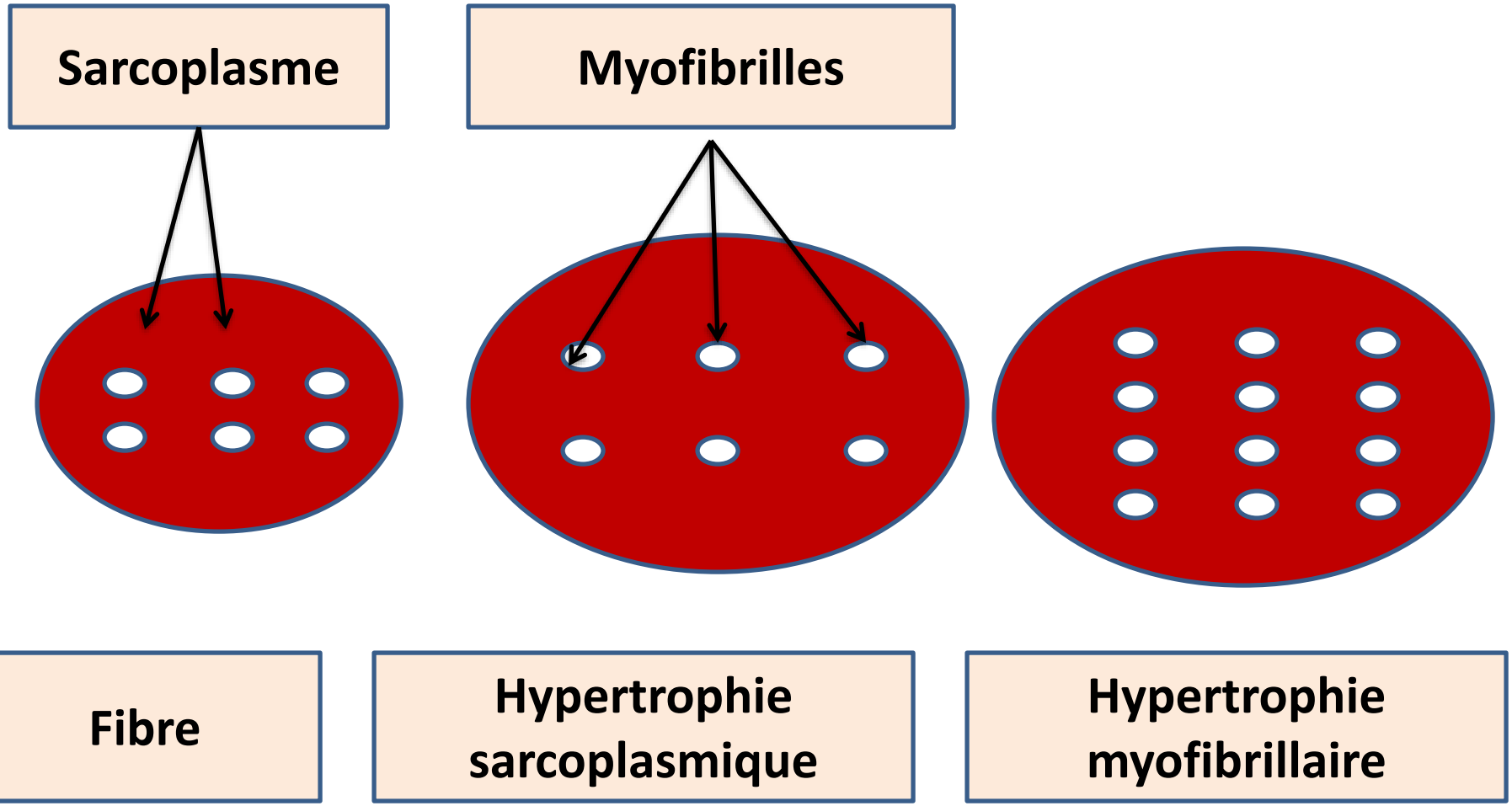


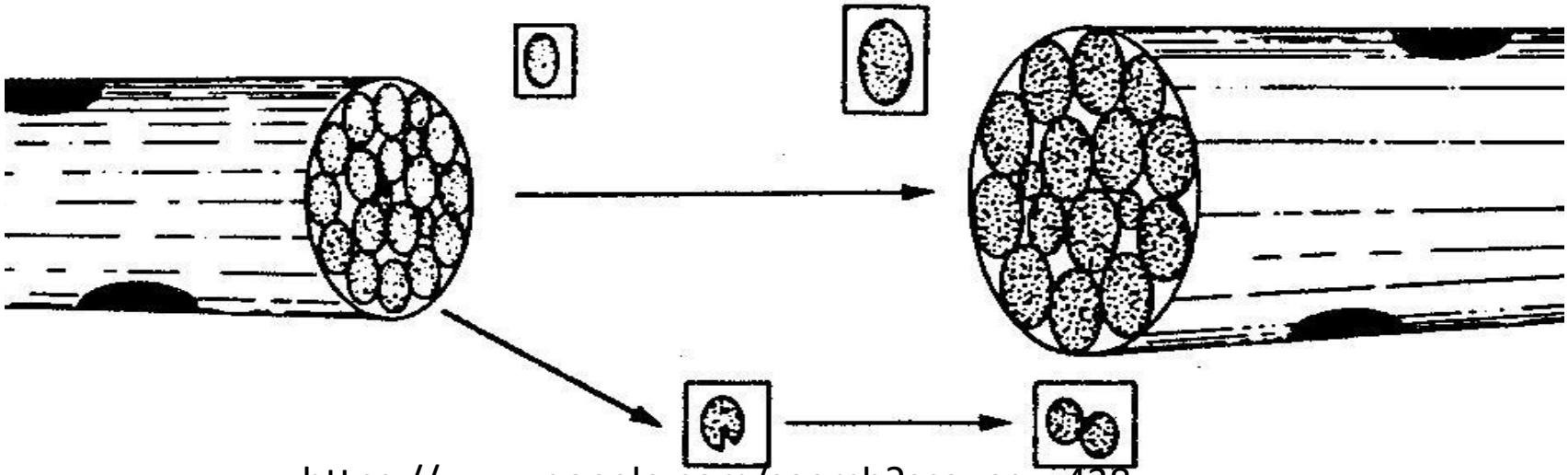
Sarcomères en parallèle



Sarcomères en série




Sarcoplasme
Myofibrilles
Fibre
Hypertrophie sarcoplasmique
Hypertrophie myofibrillaire



https://www.google.com/search?sca_esv=438508f66d5a0254&q=les+cellule+satellite+d%C3%A9finition&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5f1cnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwlRhdNfno-ClRh0PKqyvFYyTkfIfJOoyi6rL2ScSJ67dNoiLlMWEa4QTgvKiwWpVPHfvfFkWWk049Ipu0iss4frONeIkSjwpY8NzHfYB88tAqU4P6hqmfDV21w2w0jACb3j-fIPayu3xtlCf7IlfEX9juA9f9v9Z9&sa=X&ved=2ahUKEwjb6tzH8NuLAxWQLPsDHVSpHwoQtKgLeg

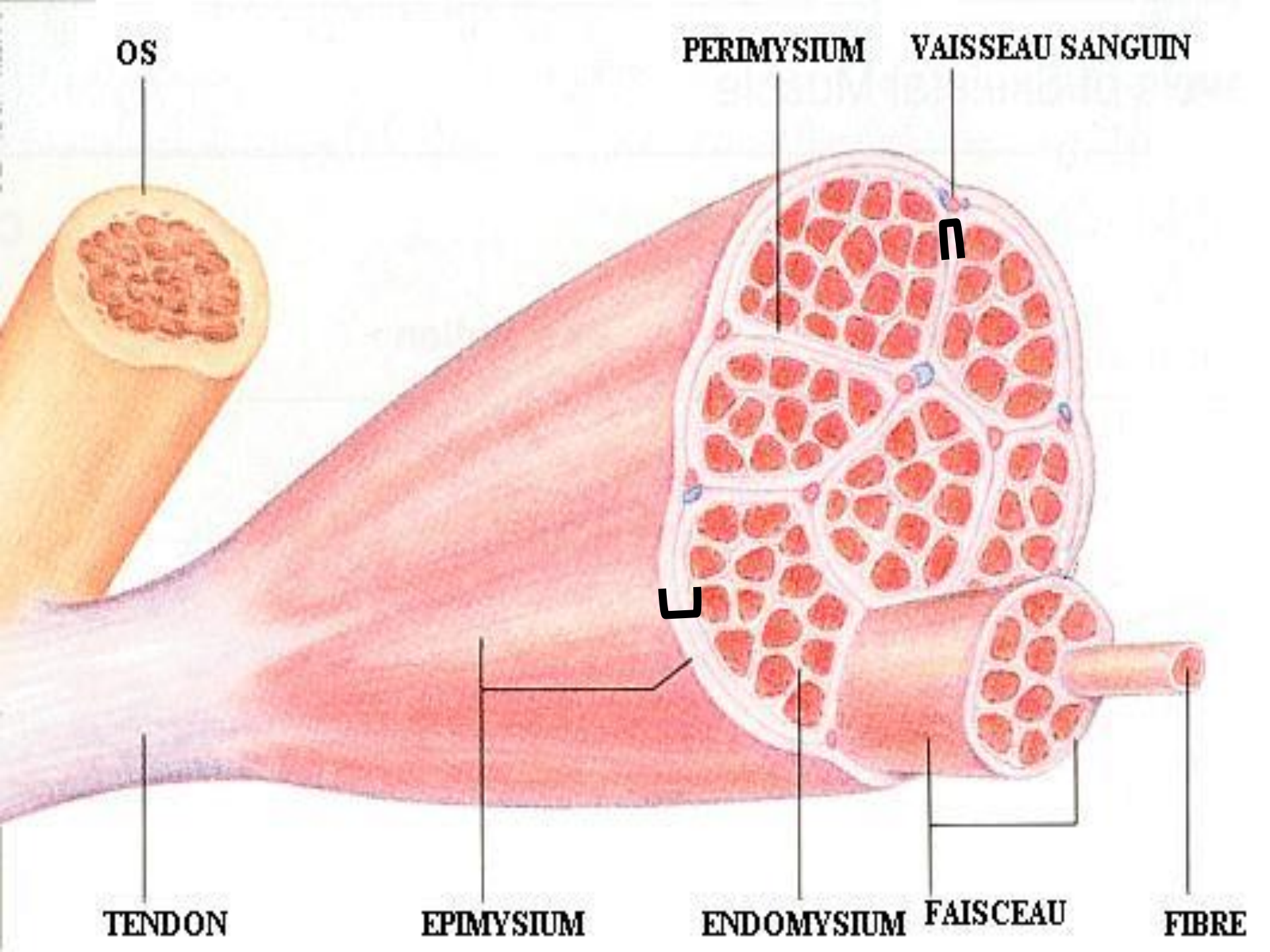
C- تضخم النسيج البيني للألياف العضلية
Une hypertrophie du tissu conjonctif

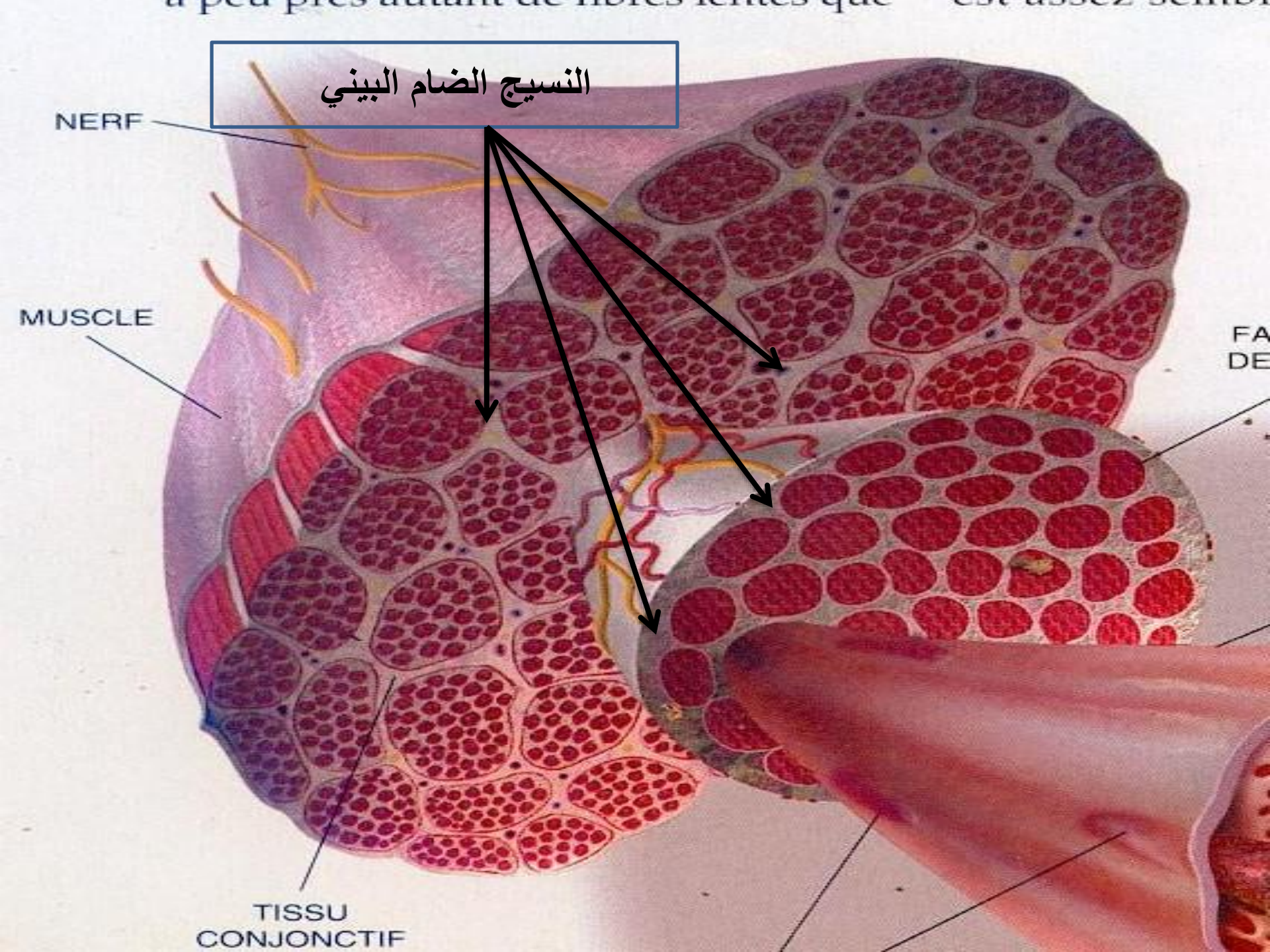
يزداد عرض ومساحة النسيج البيني في العضلة والذي يعتبر نوع من أنواع النسيج الضام (الفجوي أو الخلالي) كما يساهم في الكمال البنيوي والوظيفي للأوتار والأربطة هذا التكيف يسمح بحماية العضلة، وعند التركيز على تدريب المقاومة نلاحظ التطور الحاصل في زيادة سمك النسيج الضام. حيث يمثل النسيج البيني 13% من الحجم العضلي الكلي وهذا بوجود كل من (endomysiume, périmysium, épimysium)

D-انقسام الألياف العضلية
Hyperplasie des fibres musculaires

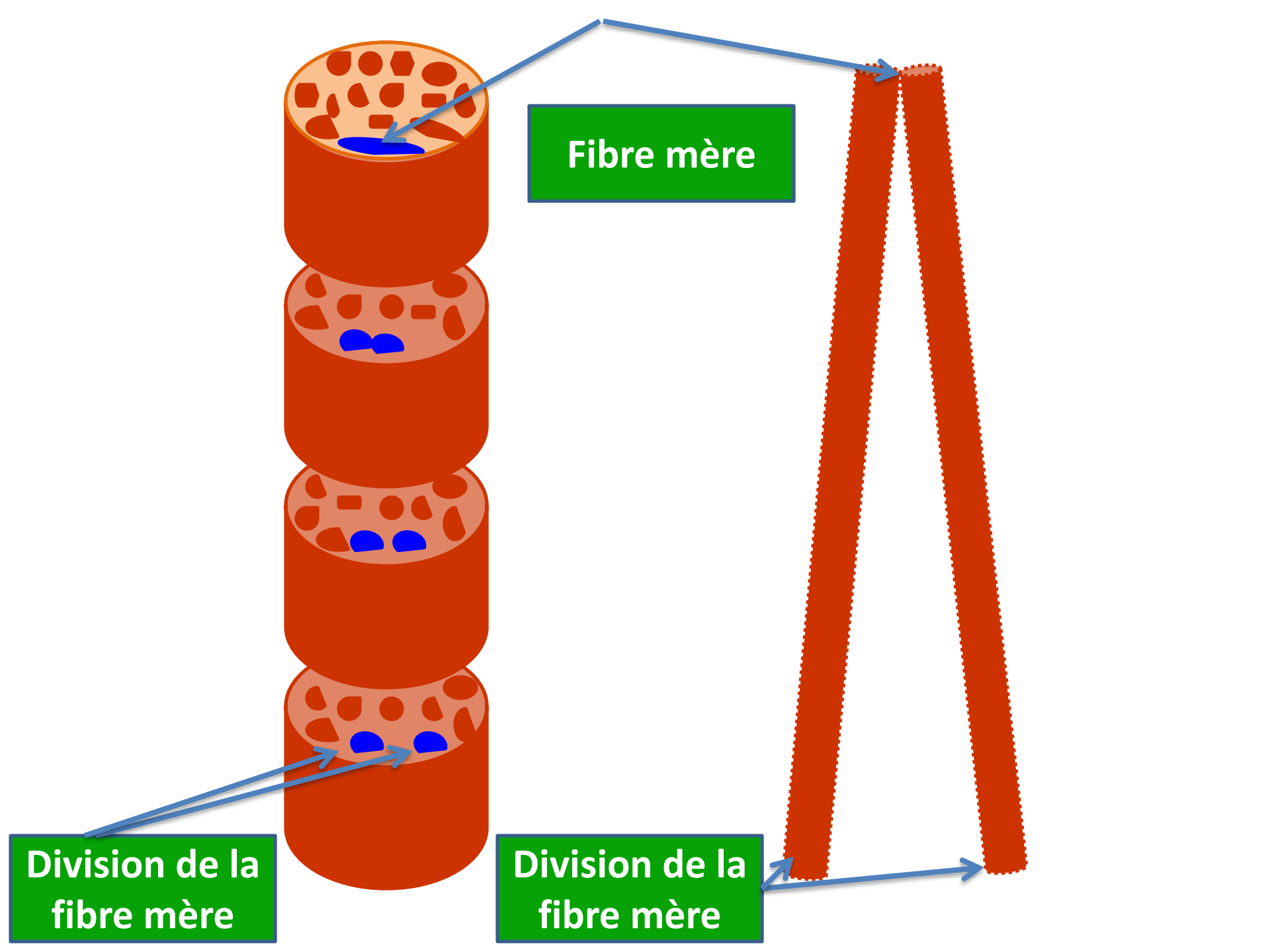
دلت بعض الدراسات لدى الحيوانات على حدوث عملية انقسام الألياف العضلية مما يؤدي إلى تضخم الحجم العضلي وهذا ما لوحظ في تجربة أجريت على القط بعد مدة من التدريب بشدة عالية حيث يعمل هذا القص على تحريك حمولة ثقيلة هذا ما سمح بتطوير ملاحظ للقوة مع انقسام بعض الألياف العضلية.

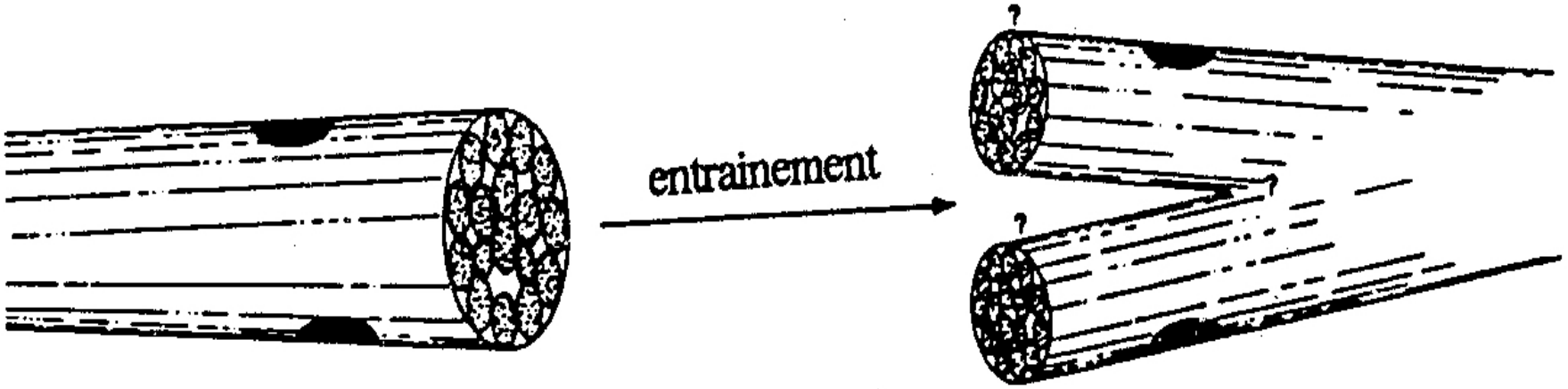
و في دراسة أخرى كشفت عملية الانقسام لدى الإنسان بعد مدة من التدريب الشاق للقوة والمرتفع الشدة، تم أخذ 12 شخص مع تدريب لمدة 12 أسبوع،

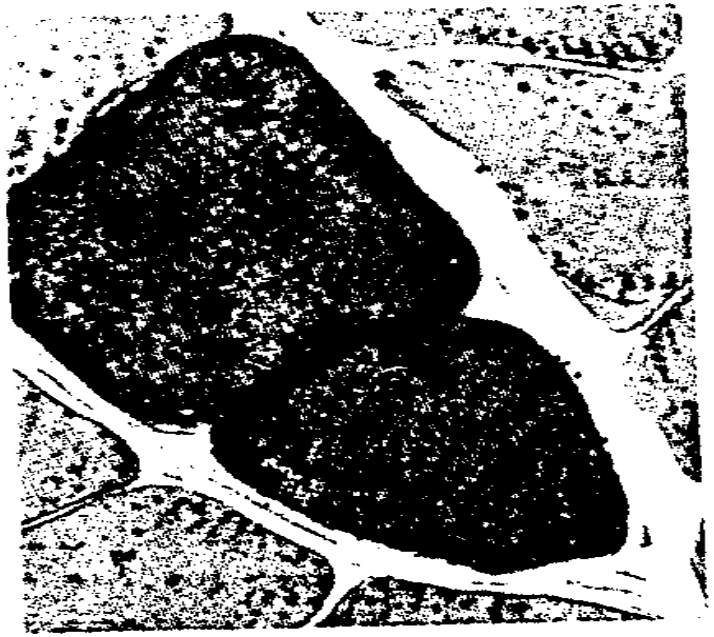

OS
PERIMYSIUM
VAISSEAU SANGUIN
TENDON
EPIMYSIUM
ENDOMYSIUM
FAISCEAU
FIBRE

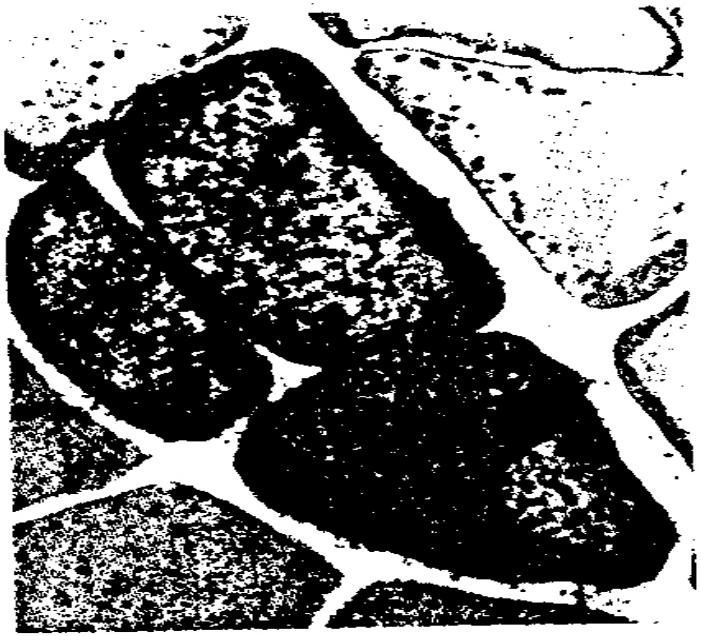

النسيج الضام البيني
NERF
MUSCLE
TISSU
CONJONCTIF

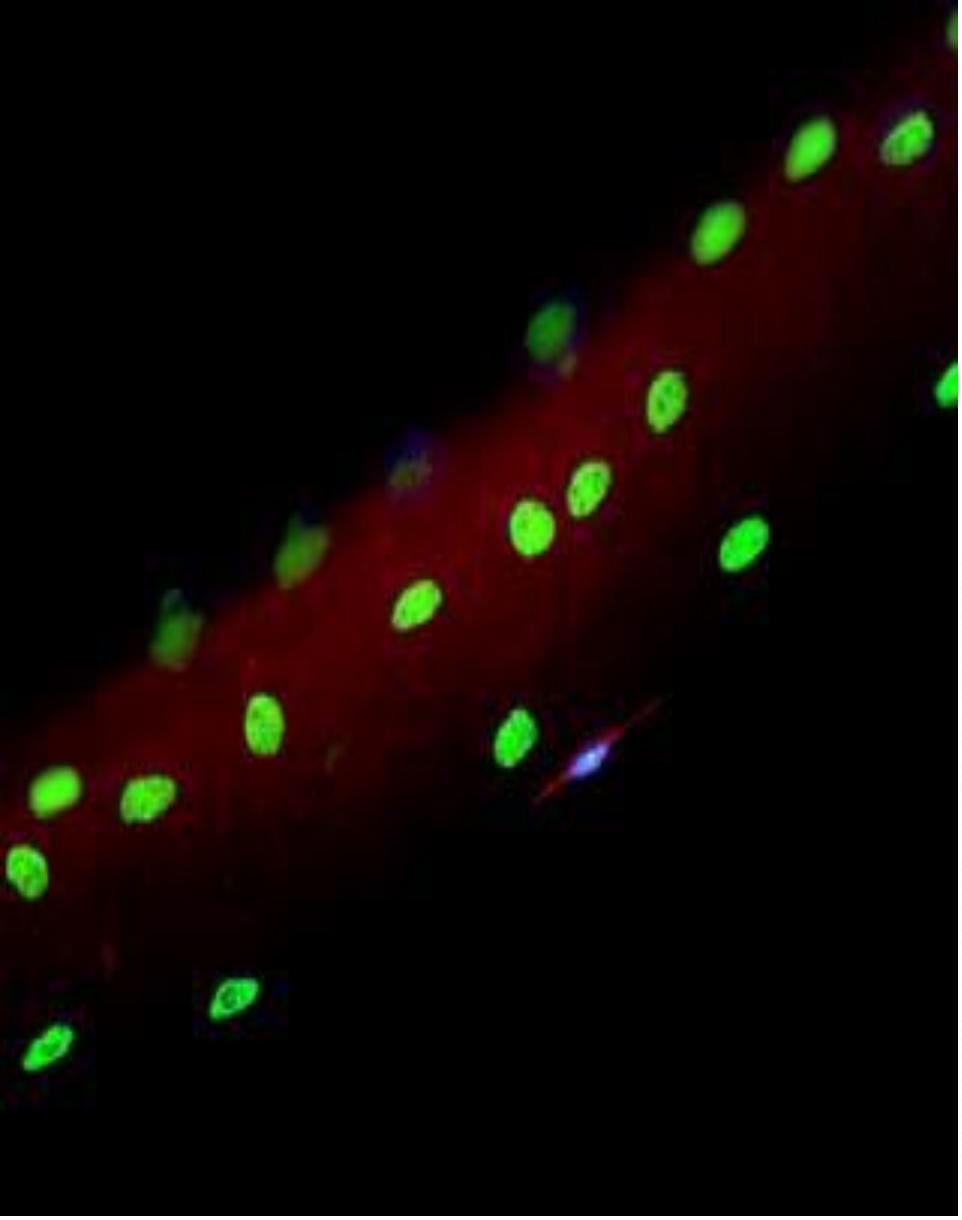
أدى هذا التدريب إلى زيادة ملاحظة في عدد الألياف العضلية في اليد (biceps brachial) ، هذا يدل على حدوث عملية الانقسام ولكن لبعض الأشخاص فقط وفي ظروف تدريبية خاصة، حيث تعمل الخلايا المستكشفة والمتحركة على المشاركة في توليد ونسخ ألياف عضلية جديدة هذه الخلايا تنشط أثناء حدوث تمزقات عضلية متسلسلة، التي تنشط وتحفز بحيث تتكاثر وتهاجر نحو الأماكن المتضررة ، بعد ذلك إما أن تنقسم مع الليفات العضلية الموجودة أو تتحول إلى ليفات عضلية جديدة .

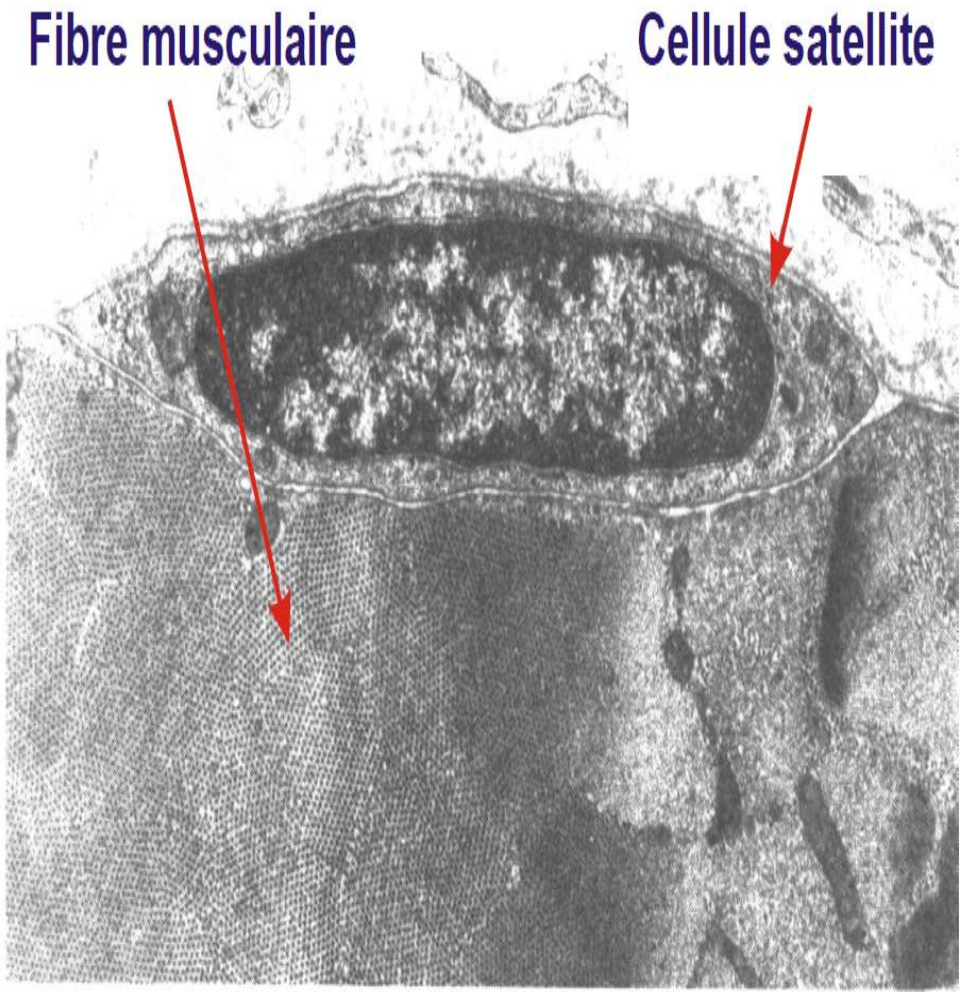

Fibre mère
Division de la fibre mère
Division de la fibre mère

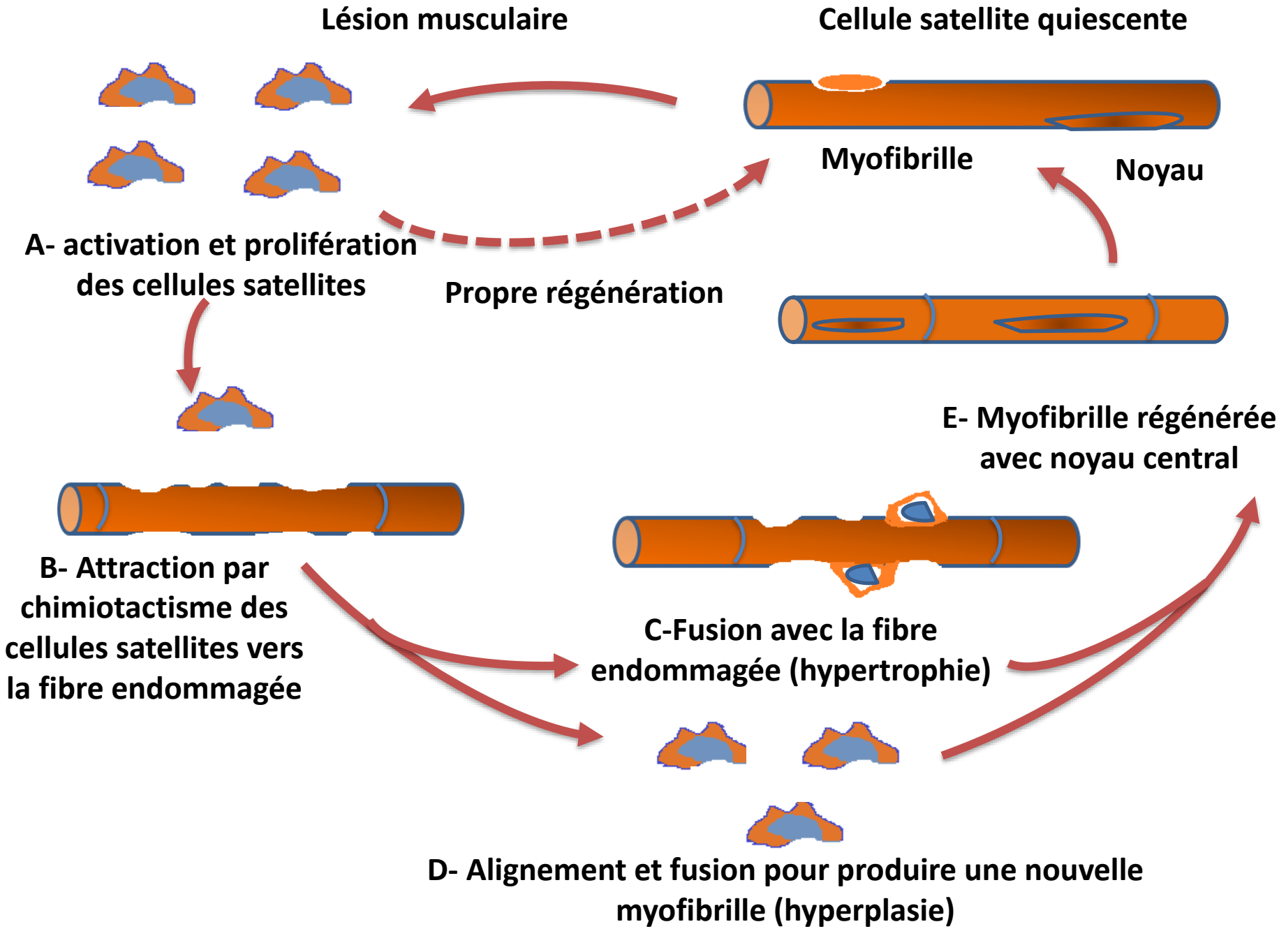

entrainement
?
?

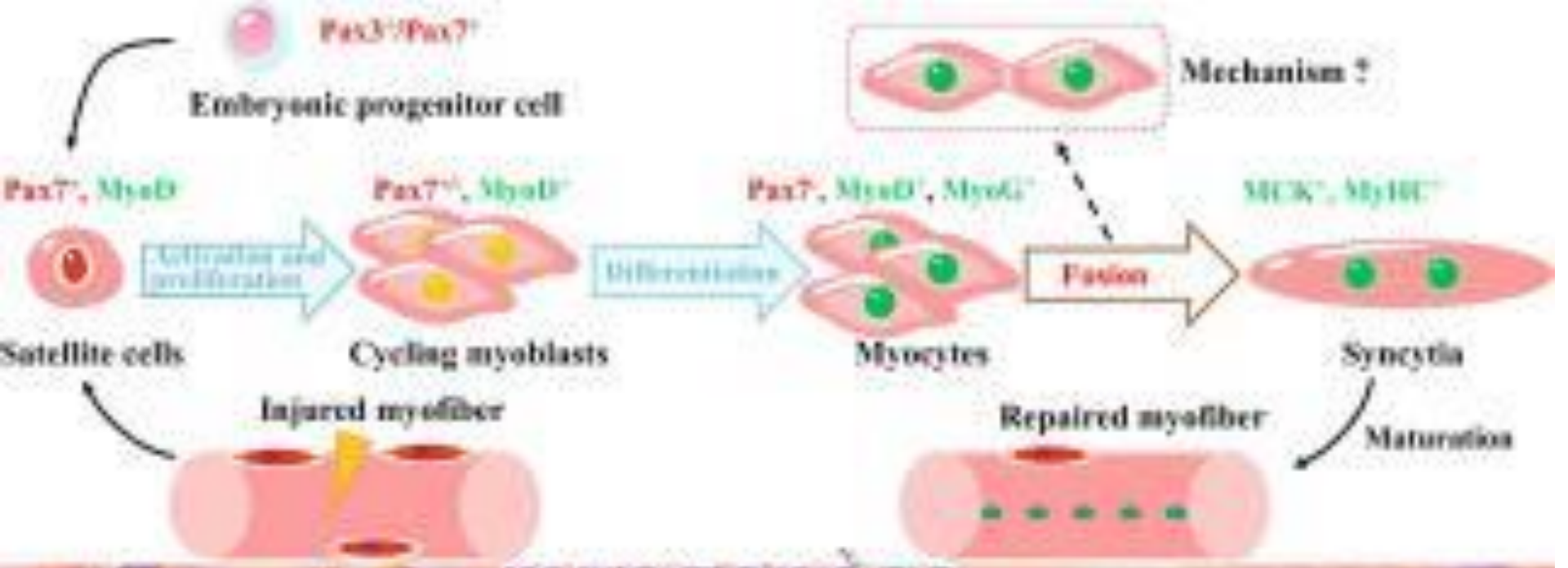




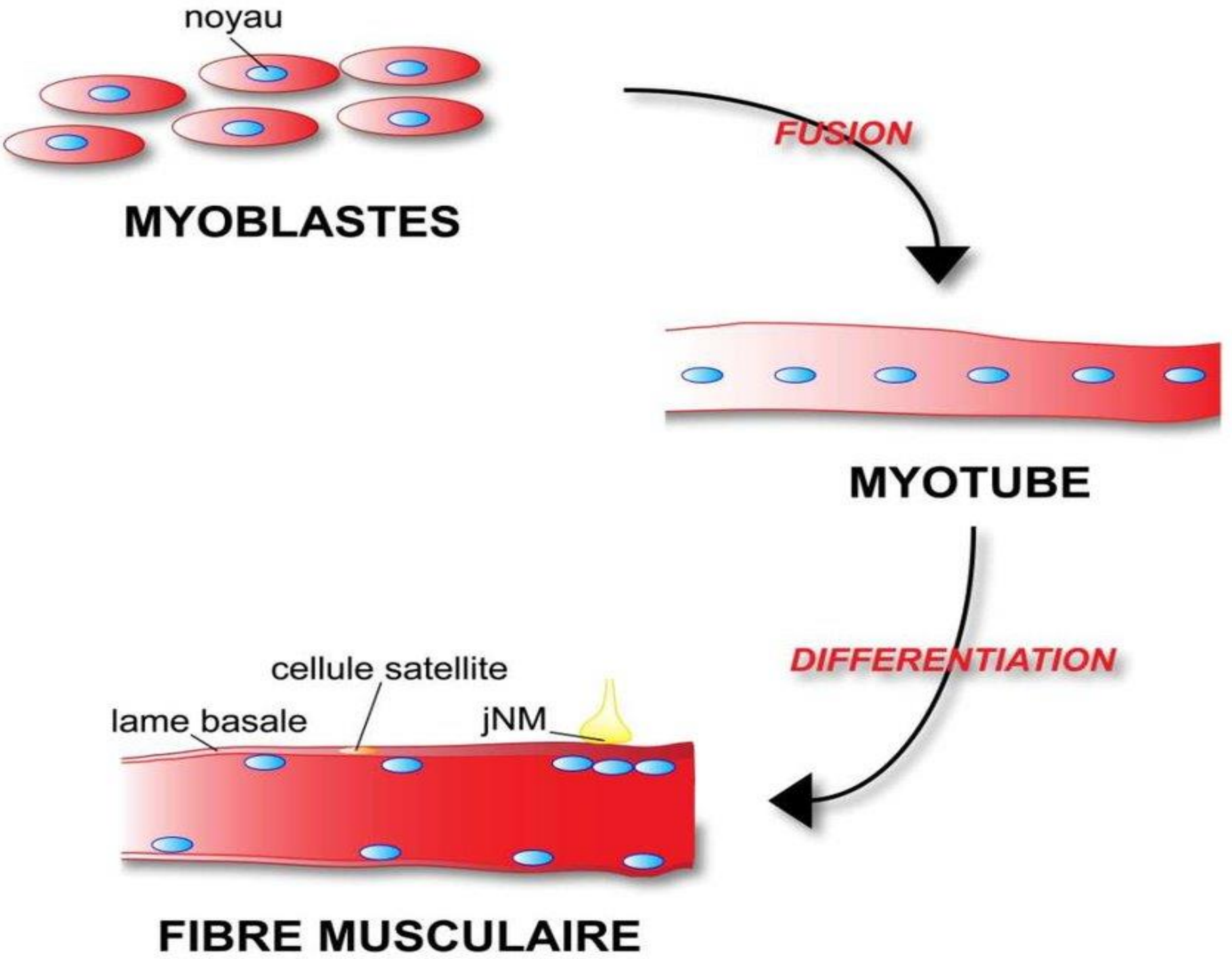



Fibre musculaire
Cellule satellite

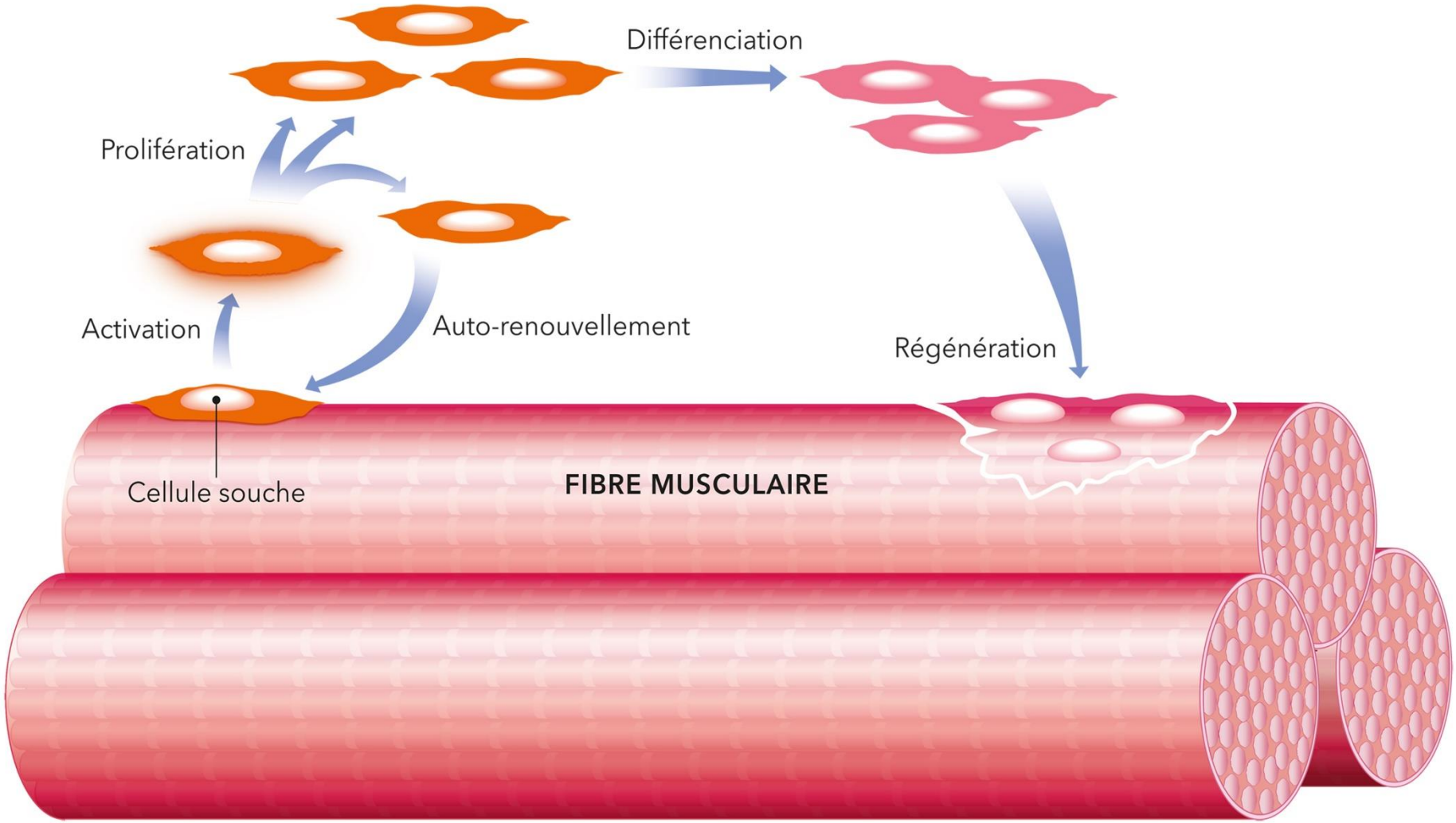

Lésion musculaire
Cellule satellite quiescente
Myofibrille
Noyau
A- activation et prolifération des cellules satellites
Propre régénération
E- Myofibrille régénérée avec noyau central
B- Attraction par chimiotactisme des cellules satellites vers la fibre endommagée
C-Fusion avec la fibre endommagée (hypertrophie)
D- Alignement et fusion pour produire une nouvelle myofibrille (hyperplasie)


Pax3+/Pax7+
Embryonic progenitor cell
Mechanism ?
Pax7+, MyoD-
Pax7+/-, MyoD+
Pax7-, MyoD+, MyoG+
MCK+, MyHC+
Activation and proliferation
Differentiation
Fusion
Satellite cells
Cycling myoblasts
Myocytes
Syncytia
Injured myofiber
Repaired myofiber
Maturation

myogenèse


noyau
MYOBLASTES
FUSION
MYOTUBE
DIFFERENTIATION
cellule satellite
lame basale
jNM
FIBRE MUSCULAIRE

RÉGÉNÉRATION MUSCULAIRE



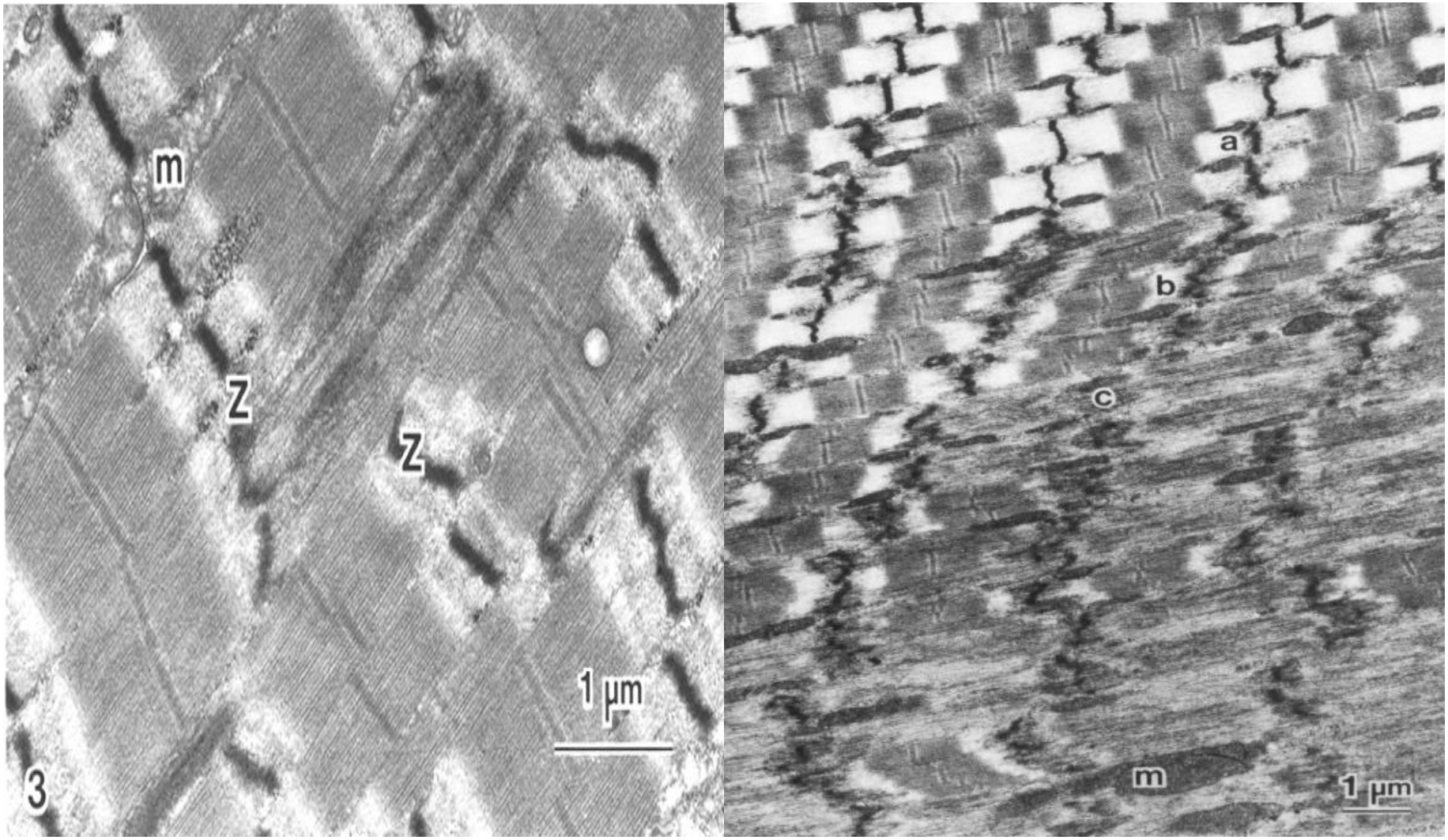
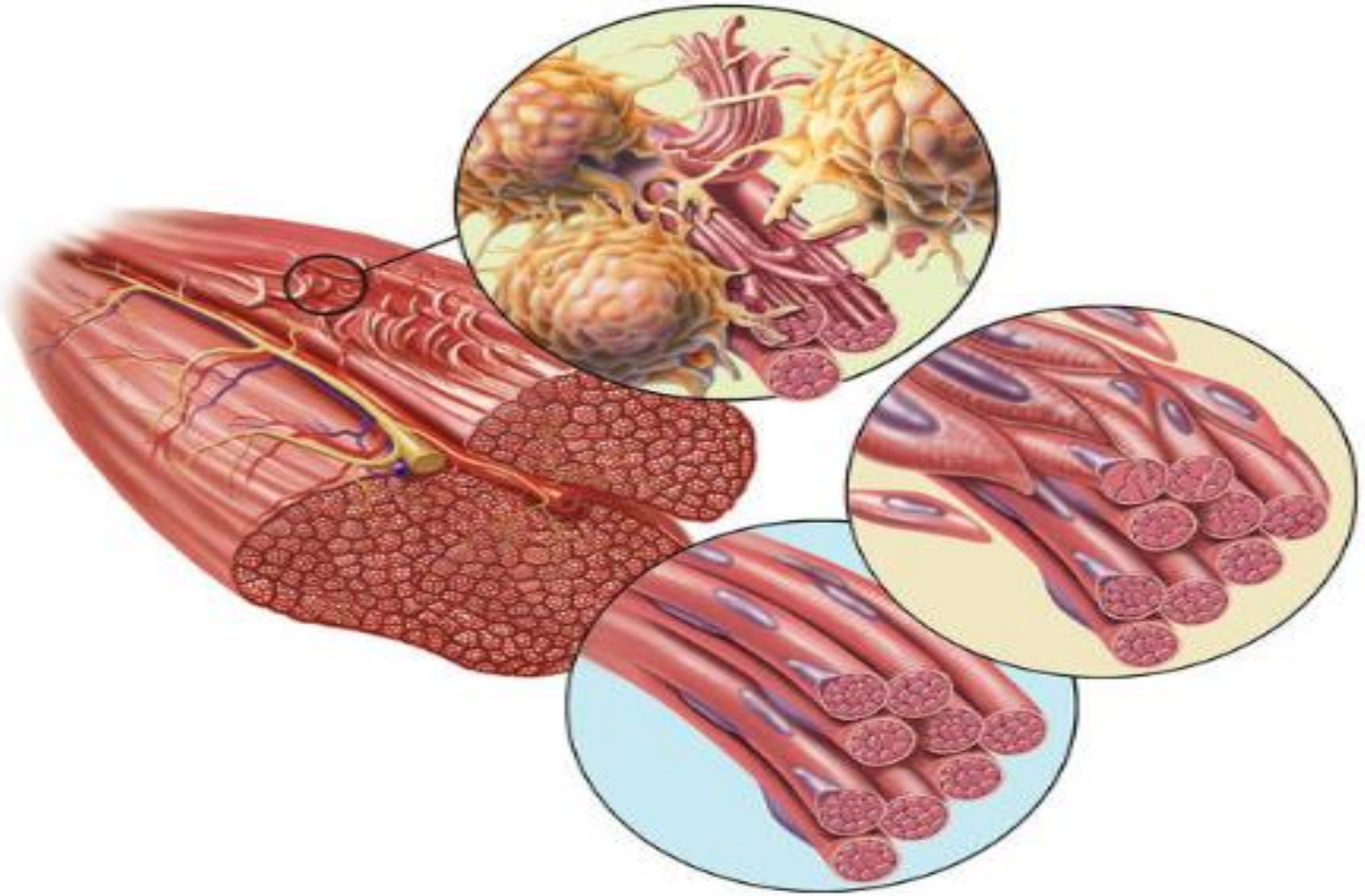


Figure I.6 Photographie en microscopie électronique d'une fibre musculaire illustrant les *perturbations de l'alignement de la ligne Z (Z) après exercice excentrique. m : mitochondrie. D'après*
Friden et al. (1984).



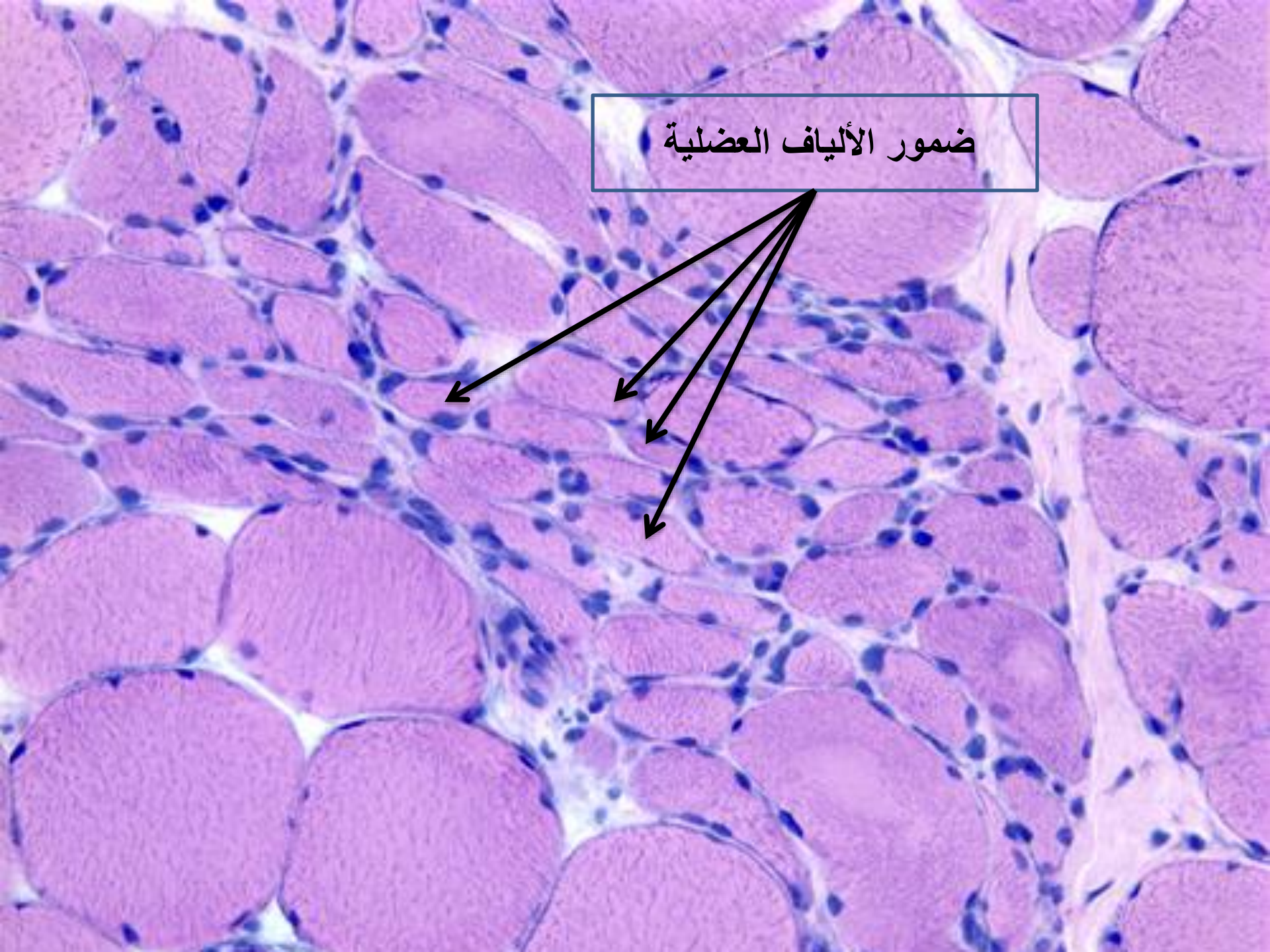
الألياف العضلية المتمزقة مع المرحلة المحيطة بالشفاء : 1 الخلايا البلعمية تقوم بعملية التنظيف، 2 خلايا جديدة تهاجر من أجل التجديد،

الضمور وتوقف النمو العضلي
L’atrophie musculaire

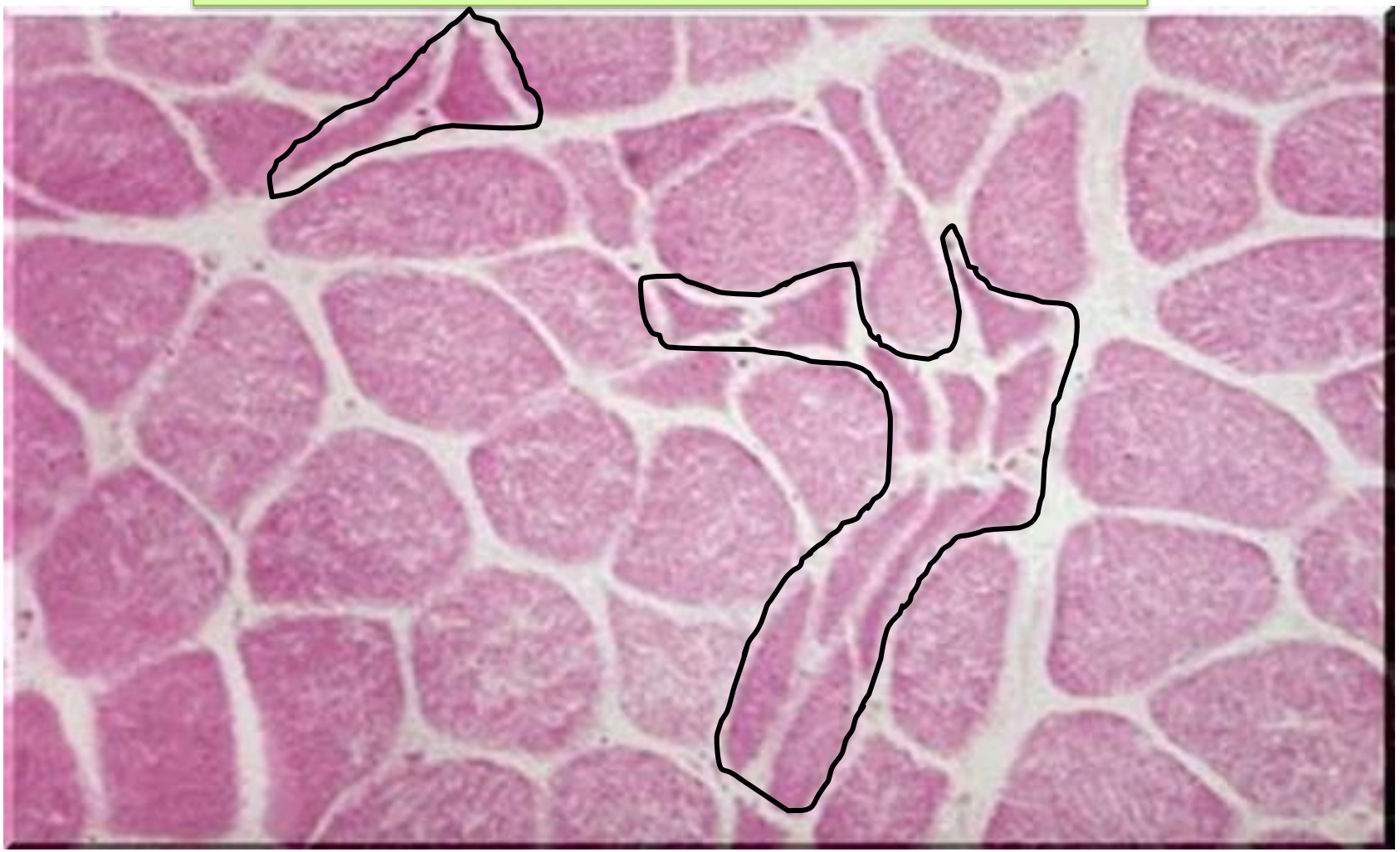
ينخفض المستوى البدني للشخص الذي يتمتع بلياقة جيدة وكثير التدريب وهذا بعد التوقف من التدريب، حيث تحدث مجموعة من التحولات البنيوية على المستوى الوظيفي للعضلة، وهذا ما اكتشف عن طريق نتائج دراستين مختلفتين :

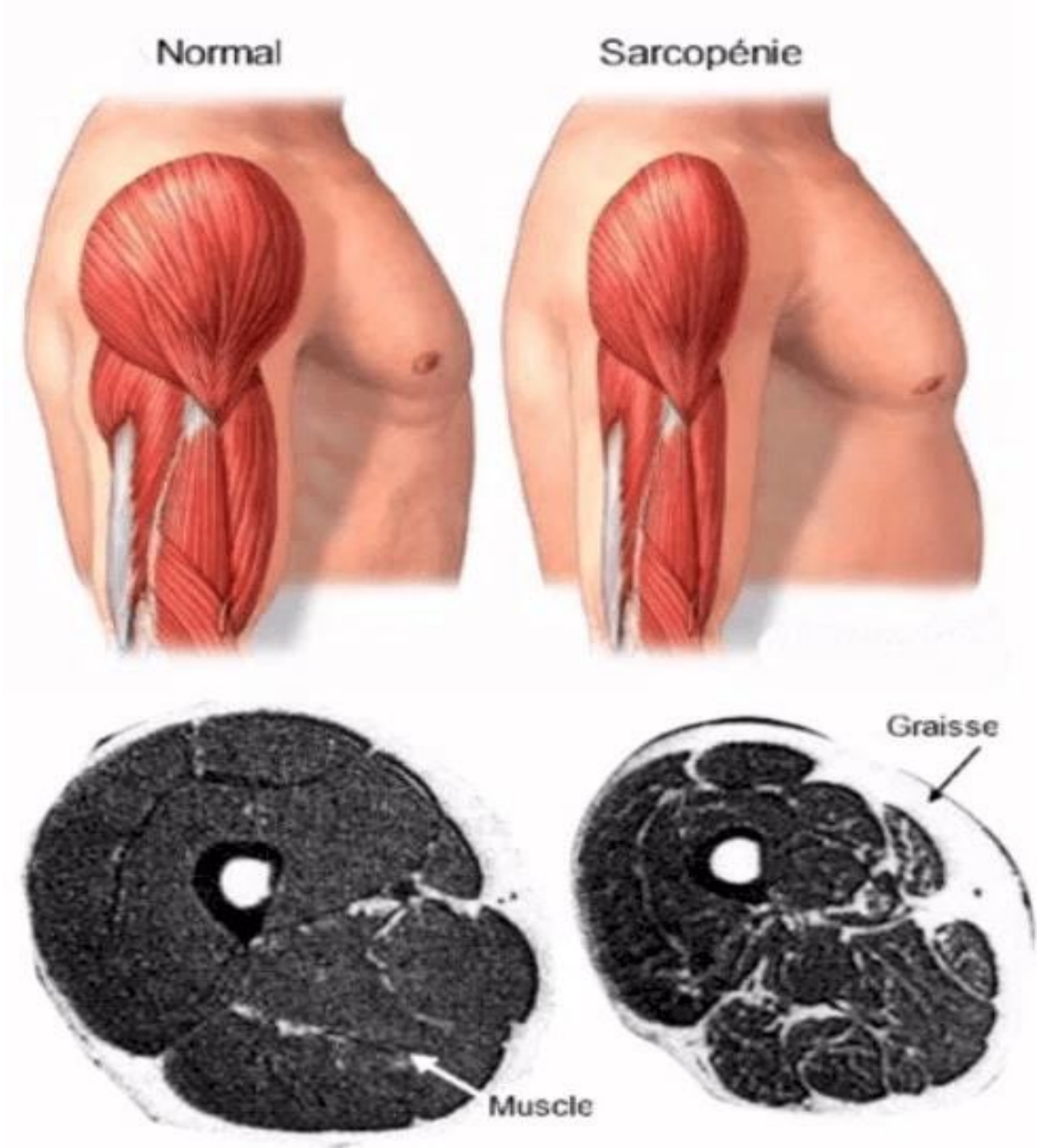
1- التوقف وعدم أداء النشاط
L’immobilisation

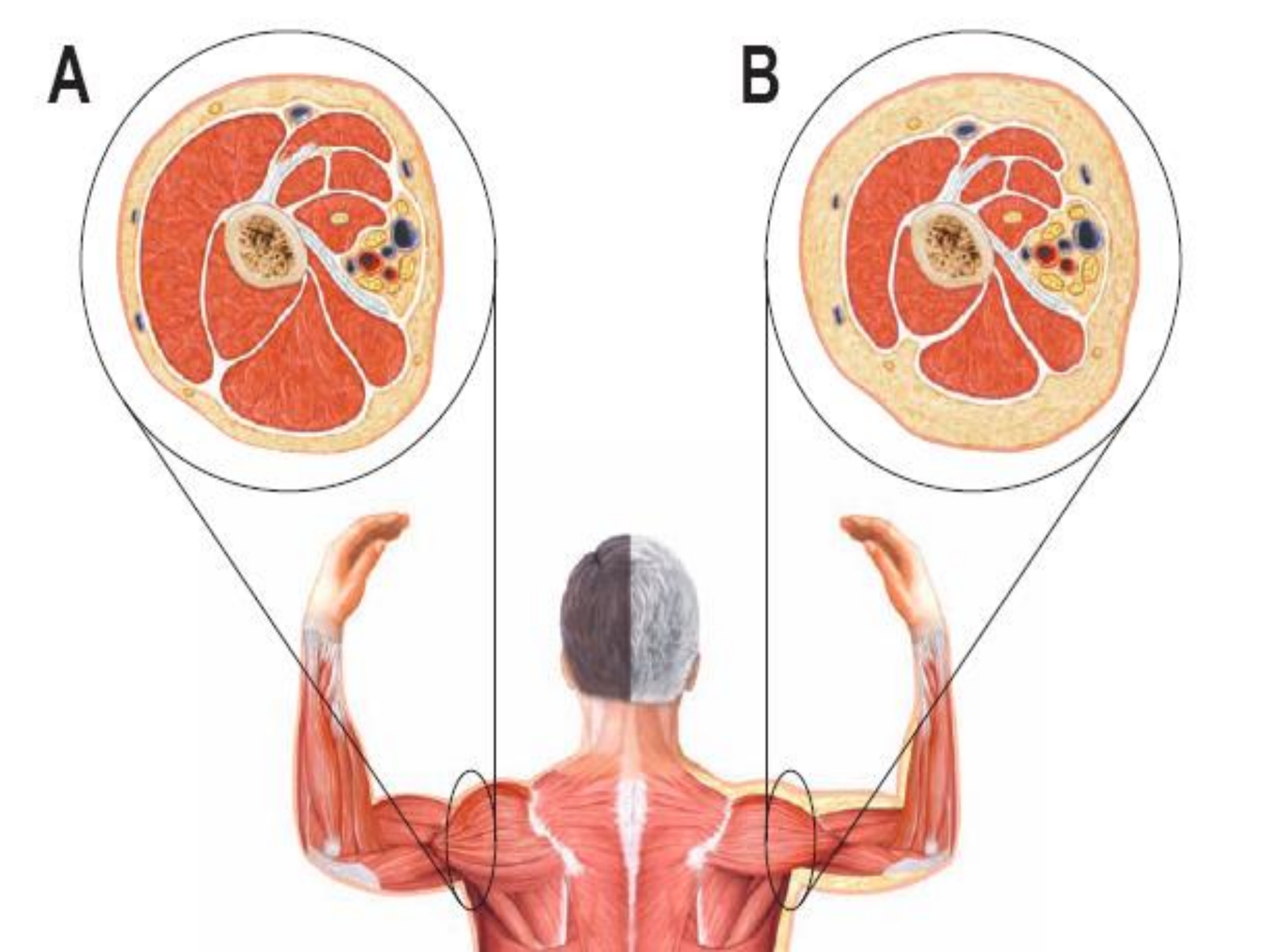
عند توقف العضلة من النشاط البدني بعد مدة من التدريب تحدث مجموعة من التحولات الهامة بعد ساعات فقط من التوقف، في 6 ساعات الأولى من التوقف وتيرة تصنيع البروتينات تنخفض وبالتالي من المحتمل بداية الضمور العضلي ما يترجم بانخفاض في حجم العضلة ، ينتج الضمور العضلي من نقص أو انعدام النشاط البدني الذي يؤدي إلى فقدان البروتينات العضلية وبالتالي نقصان مهم في القوة حوالي 3 إلى 4 % في اليوم.

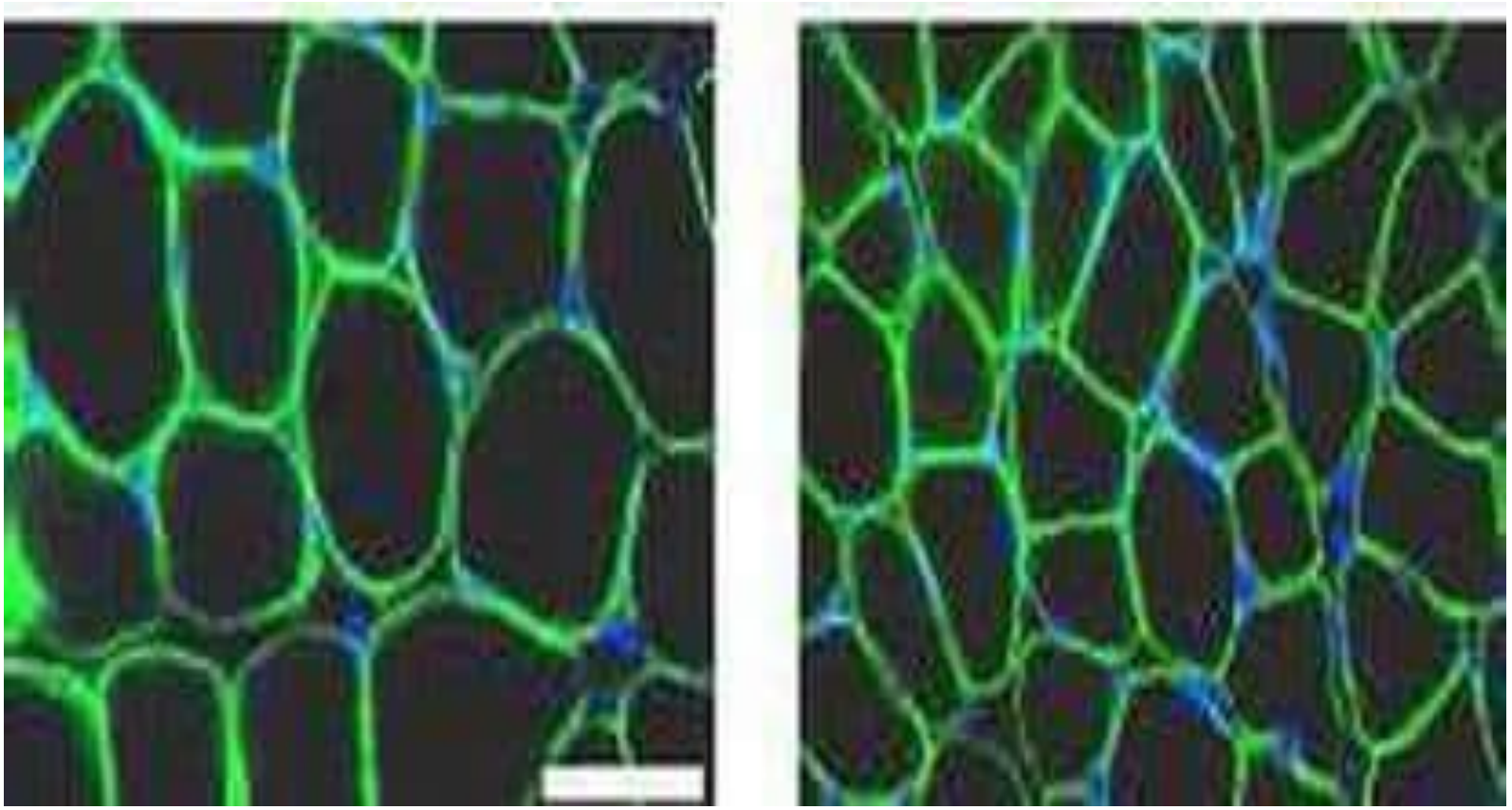

ضمور الألياف العضلية

الضمور العضلي مع تعويض الألياف بنسيج ذهني و ضام




Normal
Sarcopénie
Graisse
Muscle

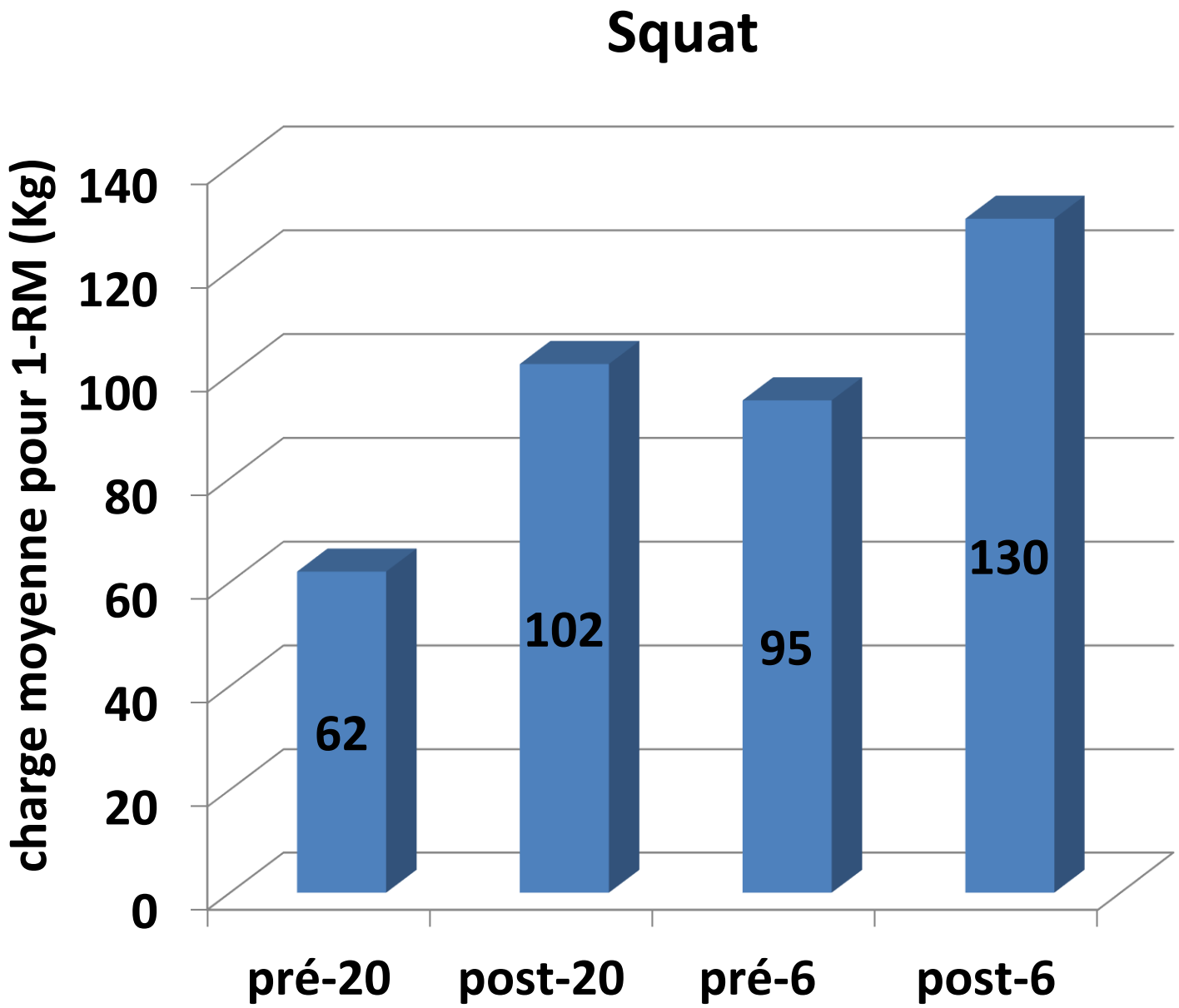

A
B

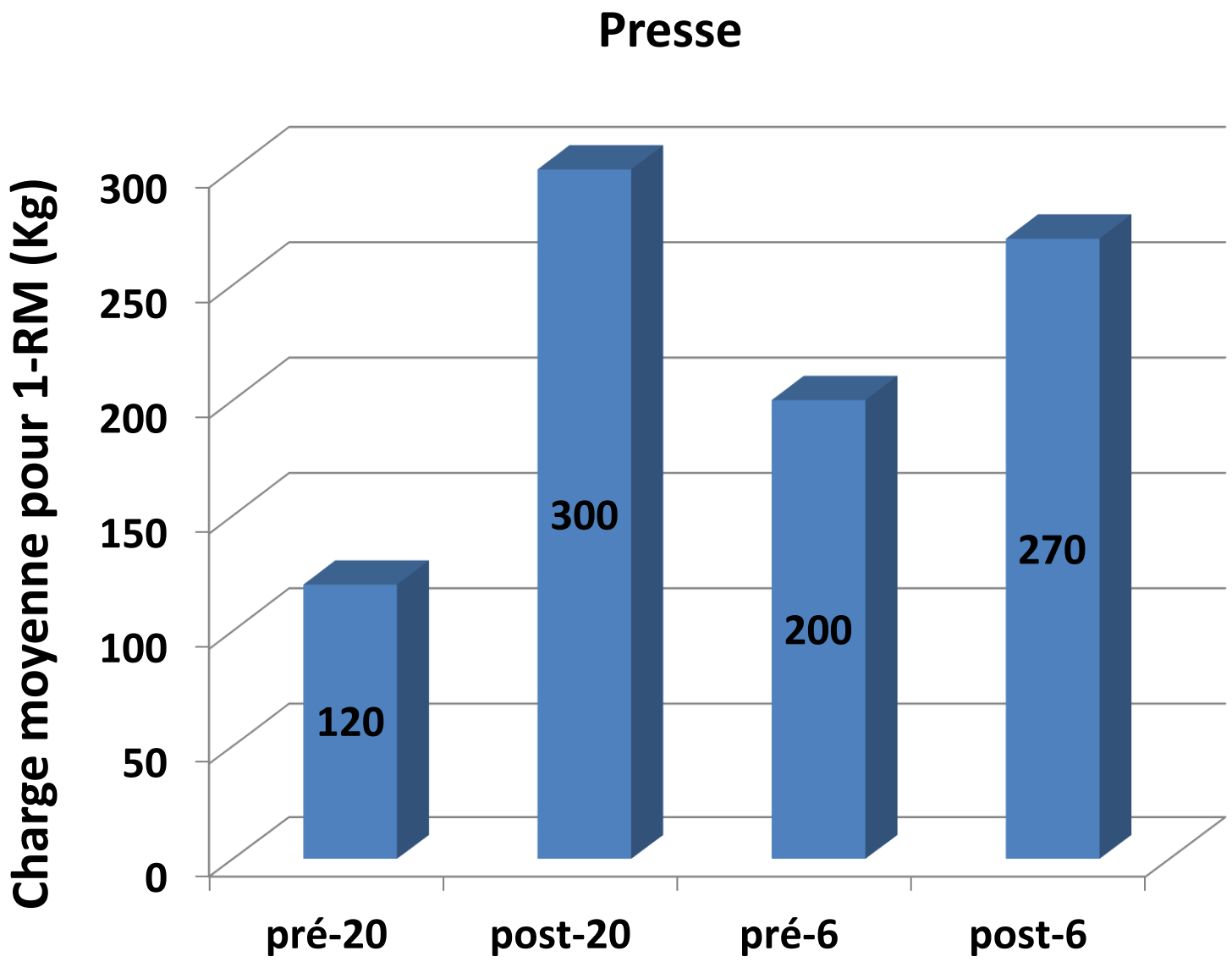


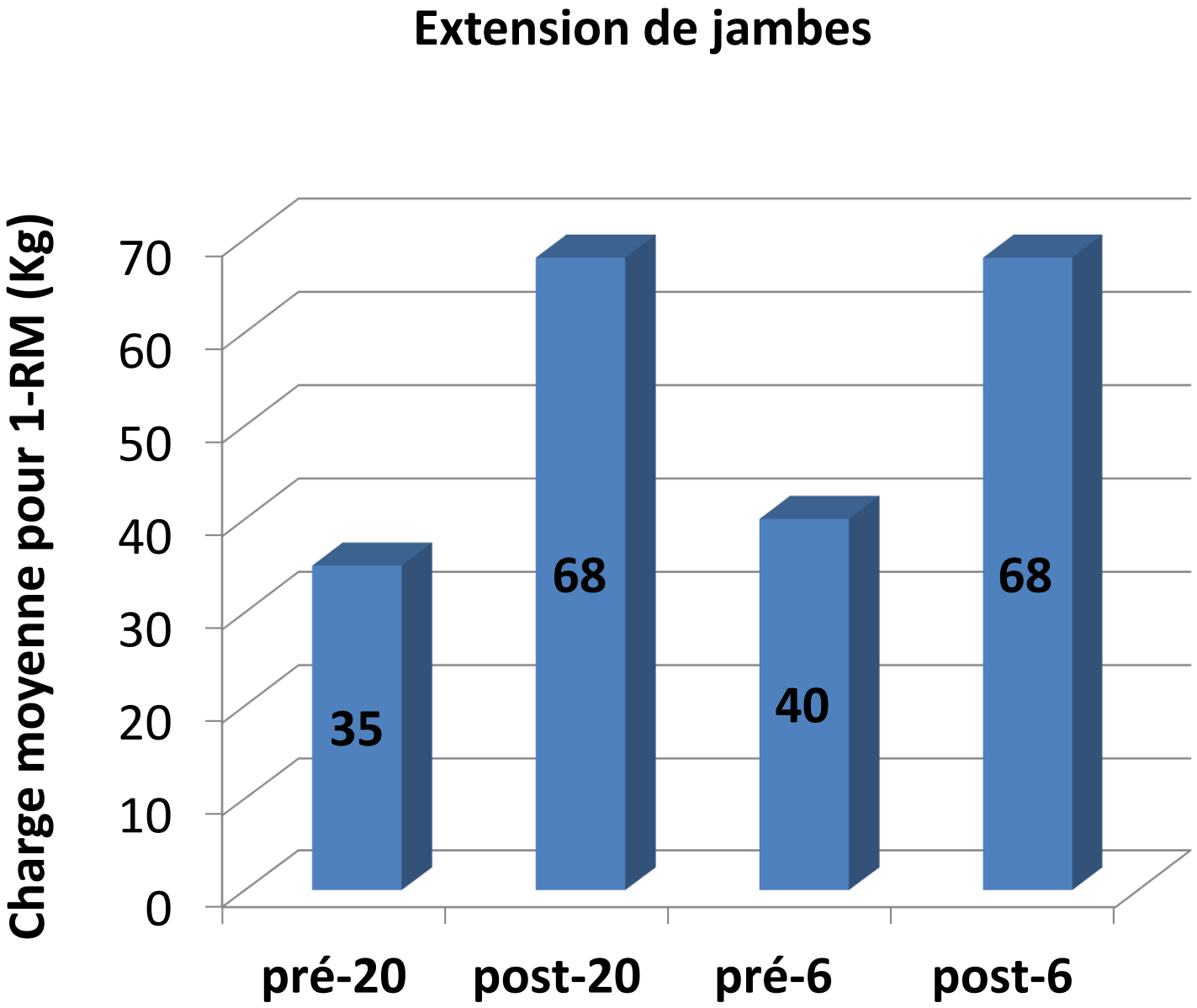
يؤثر التوقف من النشاط البدني على الألياف البطيئة أولا، بعض الدراسات أشارت إلى تفتت و تفكيك الليفات العضلية، تغير وانخلاع خطوط Z و تضرر الميتوكوندري، وبالتالي نقص في مساحة وعدد الألياف البطيئة.

2- التوقف من التدريب
L'arrêt de l'entrainement

في دراسة أجريت على البنات، تأثير التدريب الرياضي للقوة لمدة 20 أسبوع بعد ذلك التوقف لمدة 30 إلى 32 أسبوع، ثم الرجوع إلى التدريب لمدة 6 أسابيع، هذا البرنامج التدريبي خاص بالجزء السفلي فقط (squats, la presse , extensions des membres inférieures)، في المرحلتين الخاصتين بالتدريب نلاحظ تطور القوة مع زيادة مصاحبة في مساحة كل الألياف العضلية مع انخفاض في نسبة الألياف العضلية من النوع ST ، أما في مرحلة عدم التدريب لوحظ تأثير على مساحة وسمك الألياف العضلية مع نقصان في عدد الألياف العضلية من النوع FT.


Squat
charge moyenne pour 1-RM (Kg)
140
120
100
80
60
40
20
0
62
102
95
130
pré-20
post-20
pré-6
post-6


Presse
Charge moyenne pour 1-RM (Kg)
300
250
200
150
100
50
0
120
300
200
270
pré-20
post-20
pré-6
post-6


Extension de jambes
Charge moyenne pour 1-RM (Kg)
70
60
50
40
30
20
10
0
35
68
40
68
pré-20
post-20
pré-6
post-6

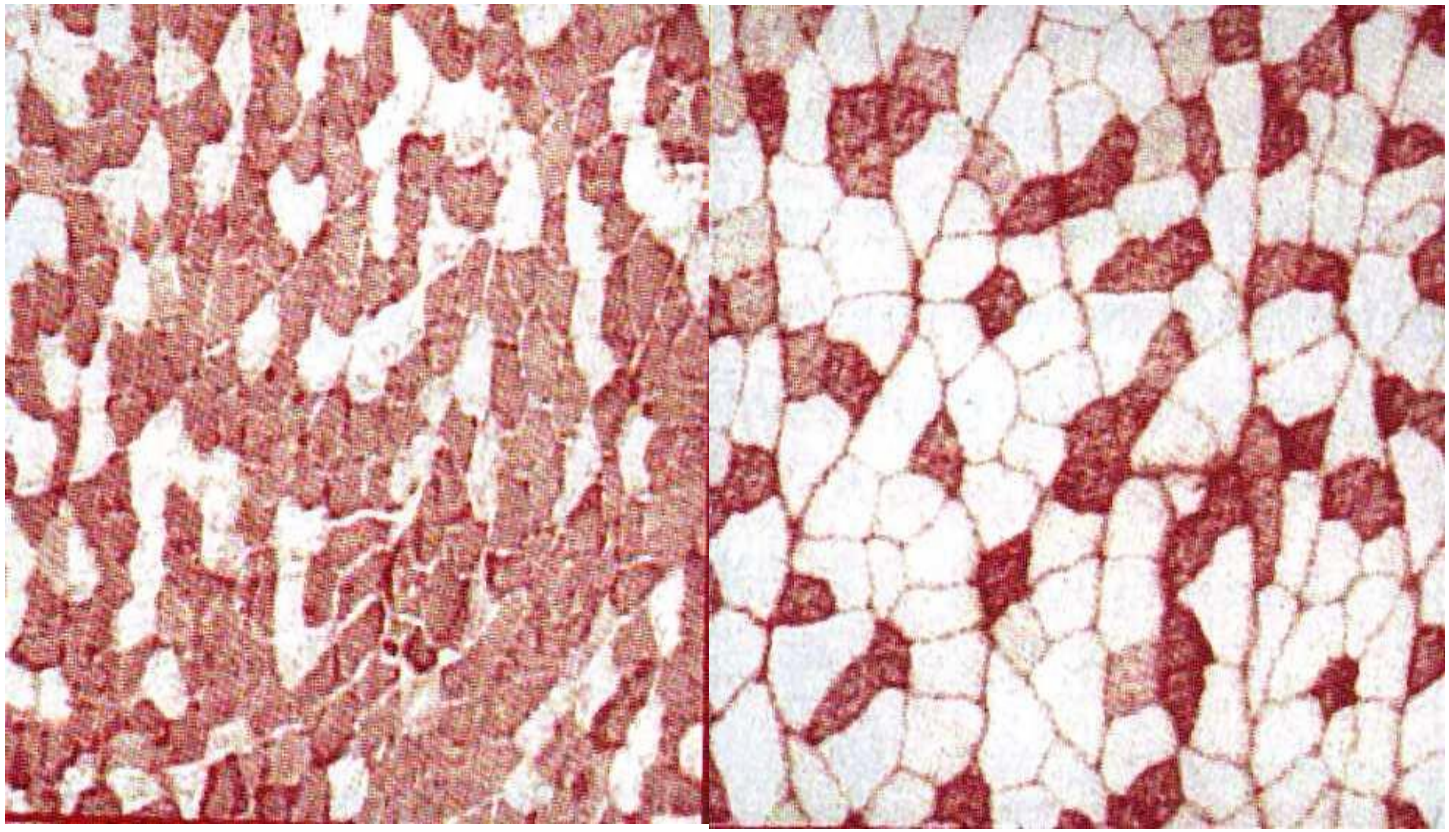
التكيفات الخاصة بالجهاز العضلي عند التدريب الهوائي
Les adaptations du système musculaire a l'entrainement aérobie

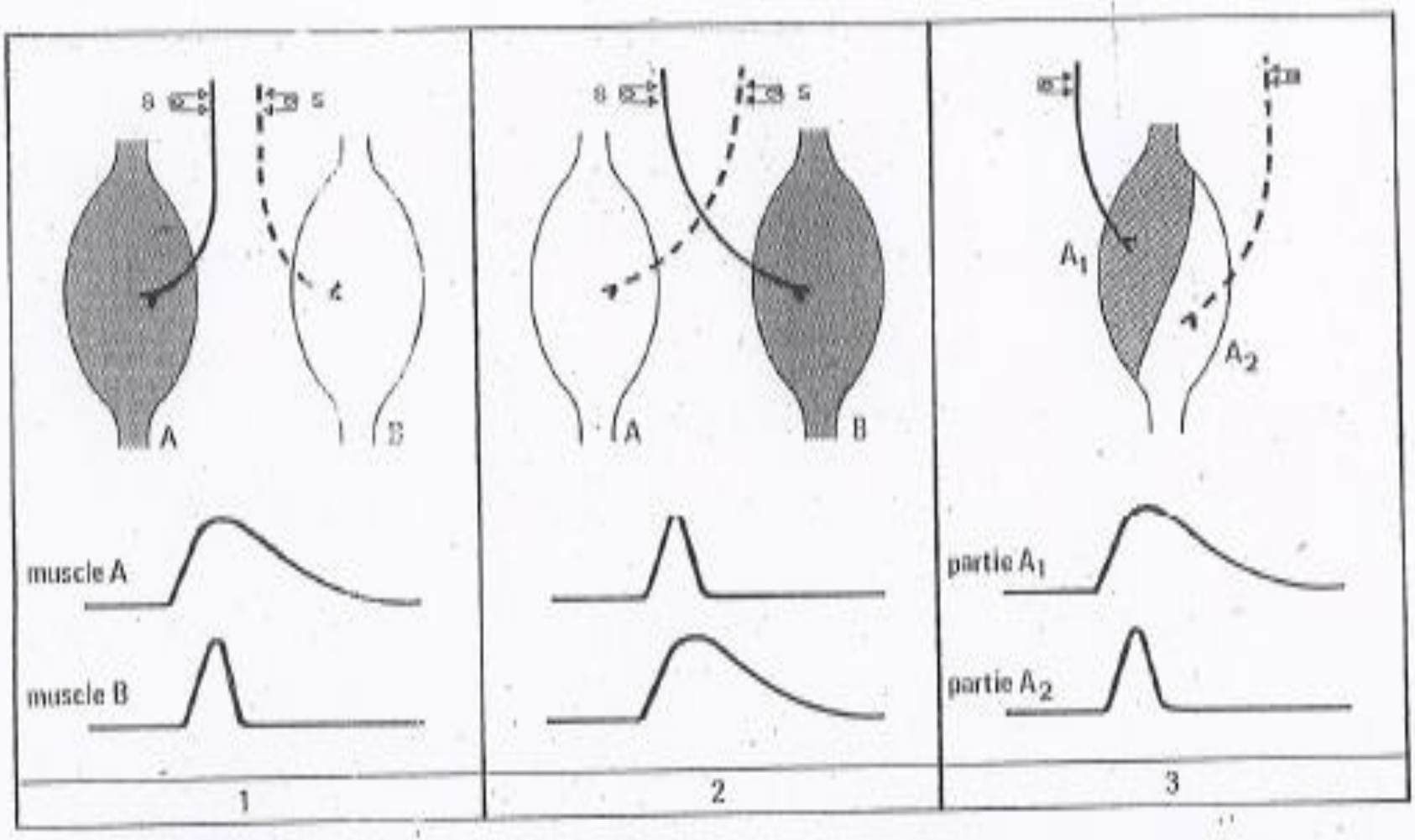
1- نوعية الألياف
Le type de fibre

تستميل النشاطات البدنية الخاصة بالتدريب الهوائي بشدة ضعيفة أو متوسطة الألياف العضلية البطيئة حيث تصبح هذه الألياف أكثر حجما، هذه الزيادة في المساحة تصل إلى 25 % حسب شدة ومدة الحصص المطبقة وفترة التدريب و من جهة أخرى لا تزيد مساحة الألياف العضلية السريعة FT و هذا نظرا لقلة استخدامها في هذا النوع من النشاط. إن الاستمرار في التدريب الهوائي لسنوات يؤدي إلى التحويل وتعديل في خصائص الألياف العضلية FTb نحو العمل الهوائي، او Fta، و في دراسات أخرى دلت على تحول الألياف من النوع FTb نحو الألياف FTa أي أكثر استخداما للأكسجين ، كما يمكن أن تتحول الألياف السريعة FTإلى الألياف ST لكن هذه التحولات عامة تكون ضعيفة وبنسب قليلة. و يظهر من خلال مشروع (HERITAGE) أن التدريب الهوائي لمدة 20 أسبوع يرفع من نسبة الألياف العضلية ST من 43,2 %

قبل التدريب إلى 46,7 % بعد التدريب مع انخفاض في نسبة الألياف من النوع FTb من 20,0 إلى 15,1 % بعد التدريب الهوائي بدون التغير في الألياف العضلية من النوع FTa .

يمكن أن يغير تدريب القوة من نوع الألياف العضلية، لدى الحيوان وفي دراسات حديثة التنشيط المتقاطع المتمثل في تحفيز وحدة حركية من النوع FT عن طريق عصبون حركي من النوع ST أو العكس يمكن أن يغير ذلك من نوع الألياف العضلية، كذلك التحفيز المستمر للوحدات الحركية FT عن طريق تحفيز عصبي بوتيرة ضعيفة يحول من الوحدات الحركية FT إلى وحدات حركية ST بعد مدة من الأسابيع، لدى الفئران نوعية الألياف العضلية تتغير بعد 15 أسبوع من التدريب العالي الشدة على بساط متحرك وهذا بزيادة في عدد الالياف ST و Fta و إنخفاض في عدد الالياف من النوع FTb ، هذا التغير في الالياف Ftb نحو الالياف FTa و الألياف Fta نحو الالياف ST تم تأكيده عن طريق مختلف التقنيات الهيستوكيميائية





[redacted] – *Influence de l'innervation sur les propriétés du muscle.*

1. innervation normale, 2. innervation croisée, 3. muscle doublement réinnervé. Le muscle A est initialement un muscle rouge, alors que le muscle B est un muscle blanc (adapté de Buller, *Sci. Basis Med.*, 1965, 186-201).

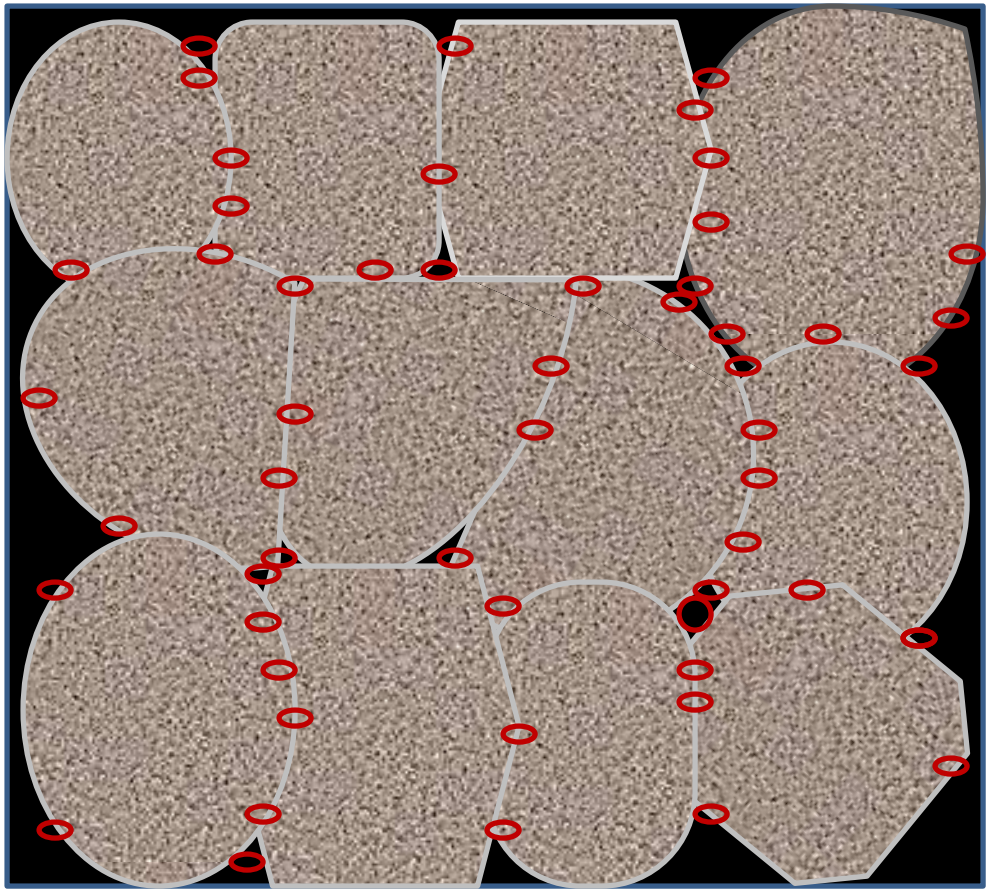
2- الدورة الشعيرية
La circulation capillaire

إن الزيادة في سمك وعدد الشعيرات الدموية في النسيج العضلي يعتبر التحول الرئيسي الحاصل من التدريب الهوائي بحيث يمكن أن تزداد هذه الشعيرات بنسبة 15 % بعد مدة من التدريب الهوائي الطويل والمرتفع الشدة، هذه الزيادة في الشعيرات الدموية تسمح بزيادة مساحة المبادلات الغازية بين الدم والعضلات و كذلك من أجل نقل الحرارة والمواد الغذائية، هذه الزيادة أيضا تسمح بزيادة حجم الأكسجين المستهلك ،

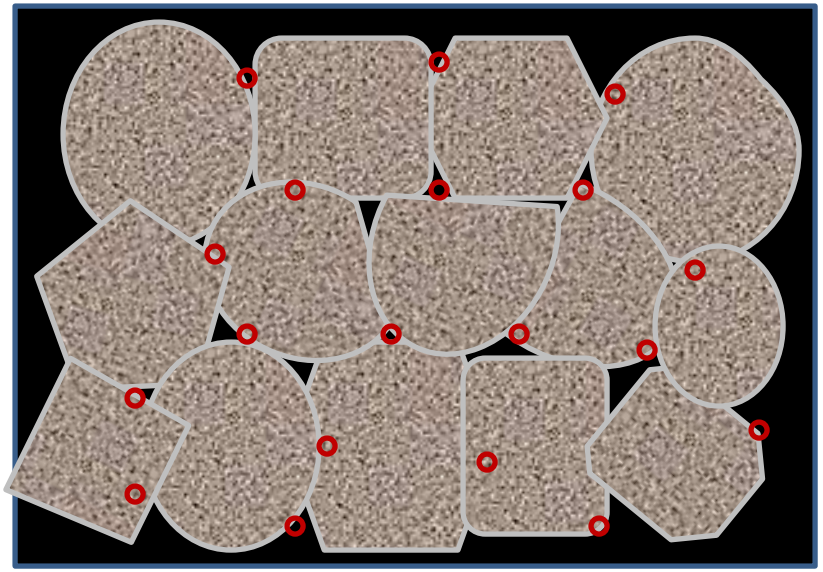
3- محتوى الميوقلوبين
La teneur en myoglobine

أثناء دخول الأكسجين في الألياف العضلية يثبت مباشرة في الميوقلوبين الذي يعمل على نقل الأكسجين بين الغشاء الخلوي والميتوكوندري، وأثناء أداء الجهد البدني يخزن الأكسجين في الميوقلوبين ثم يترك نحو الميتوكوندري، يؤدي التدريب الهوائي إلى زيادة محتوى الميوقلوبين في العضلة من 75 إلى 80 % .

B

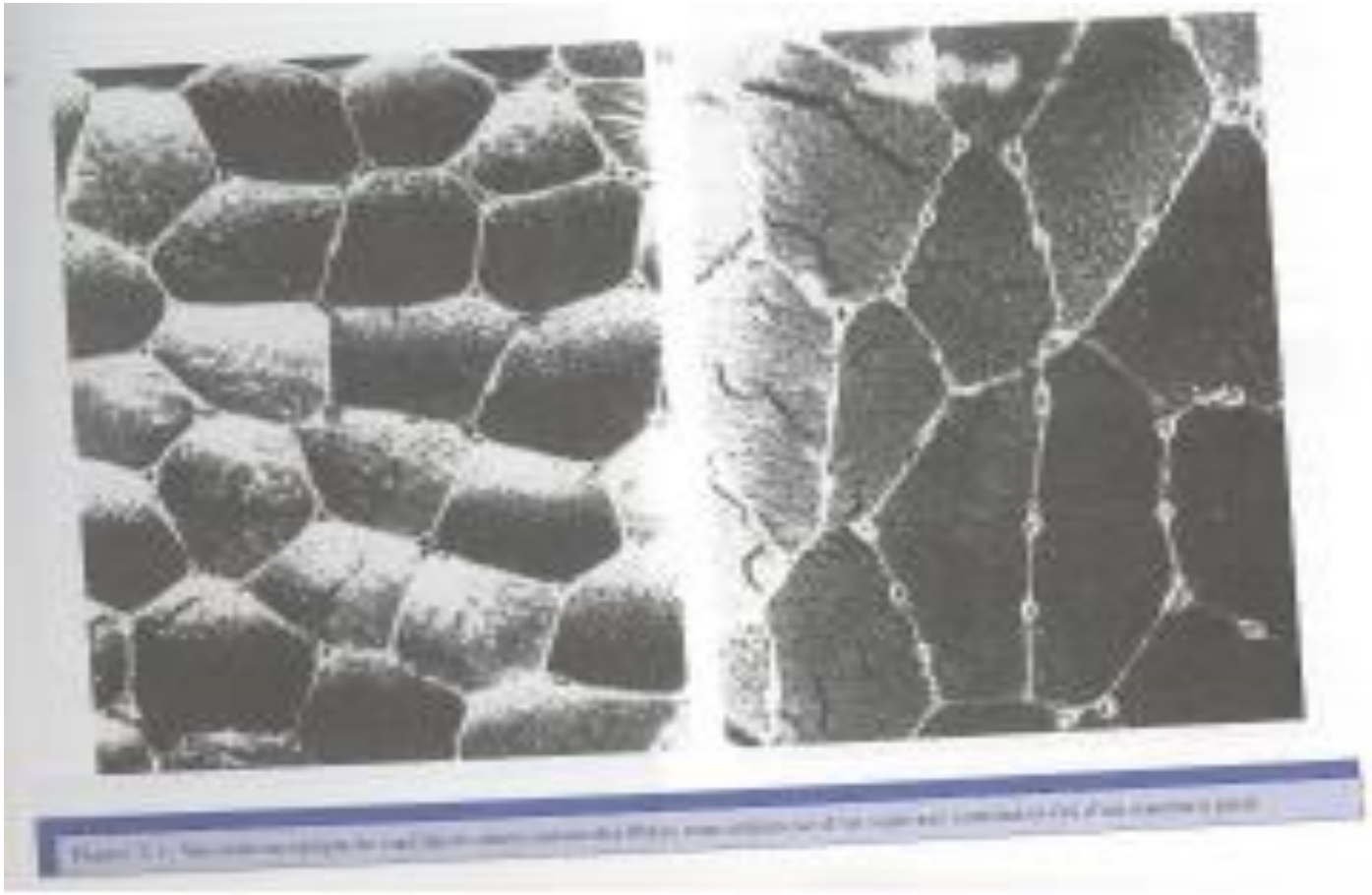


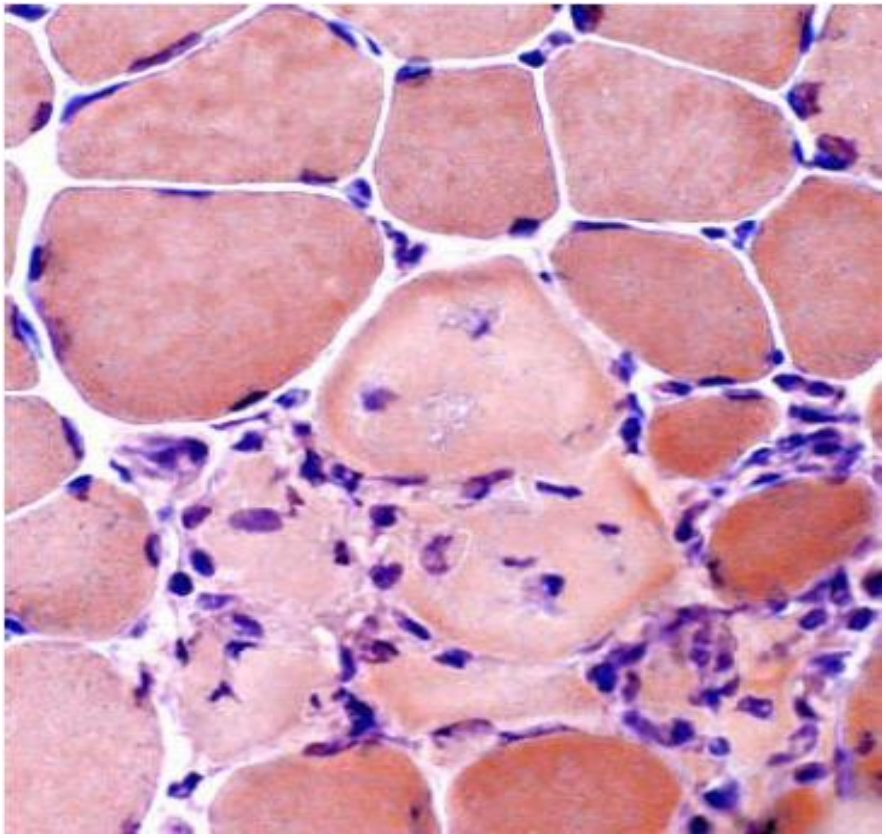
A

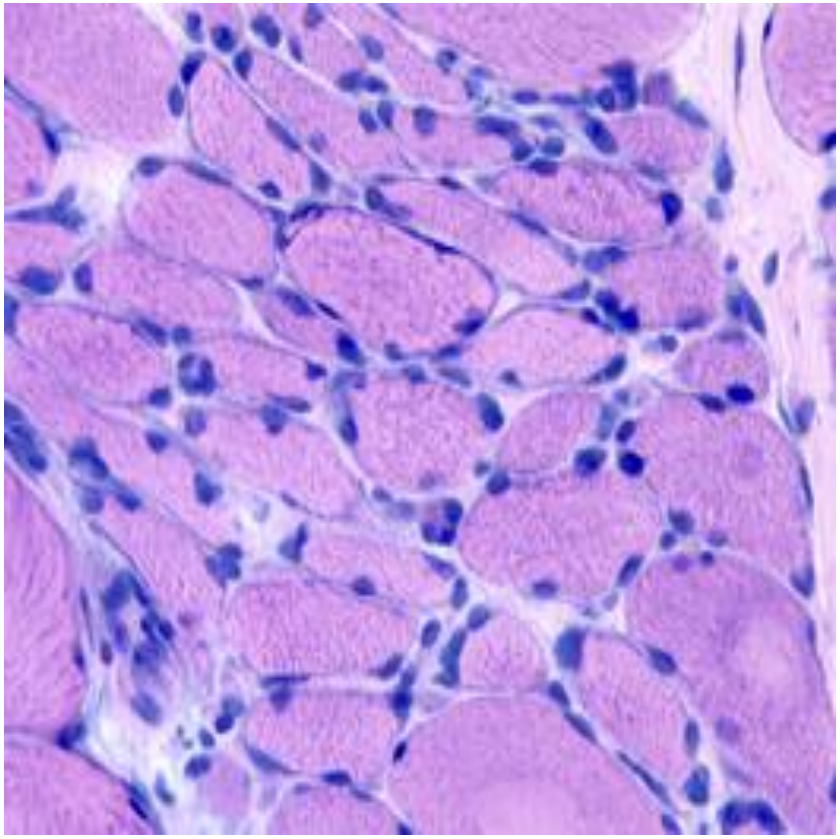


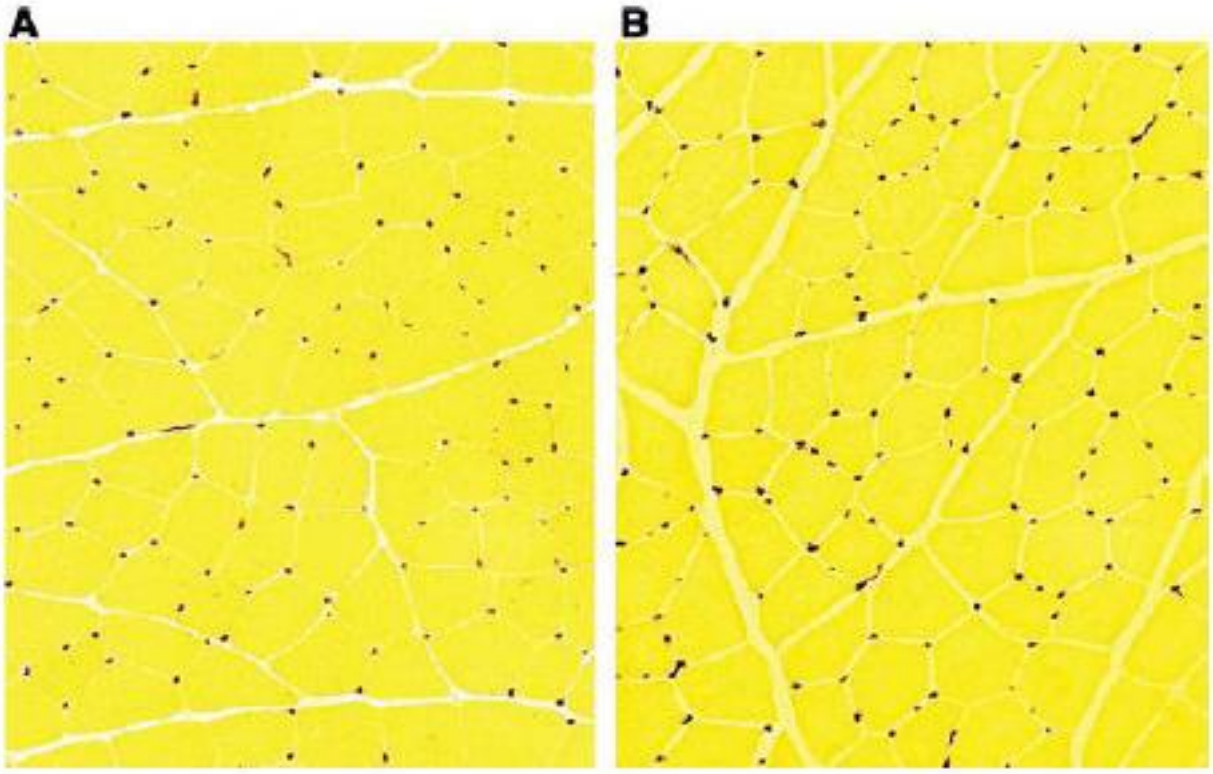
Vue microscopique de capillaires situés autour des fibres musculaires (A) d'un sujet non entrainé et (B) d'un coureur à pied

L' ↗ de la capillarisation est l'une des adaptations principale à l'entraînement qui permet d'expliquer l'↗ $VO_{2max\ car}$ (facteur limitant = diff O_2 à mito)







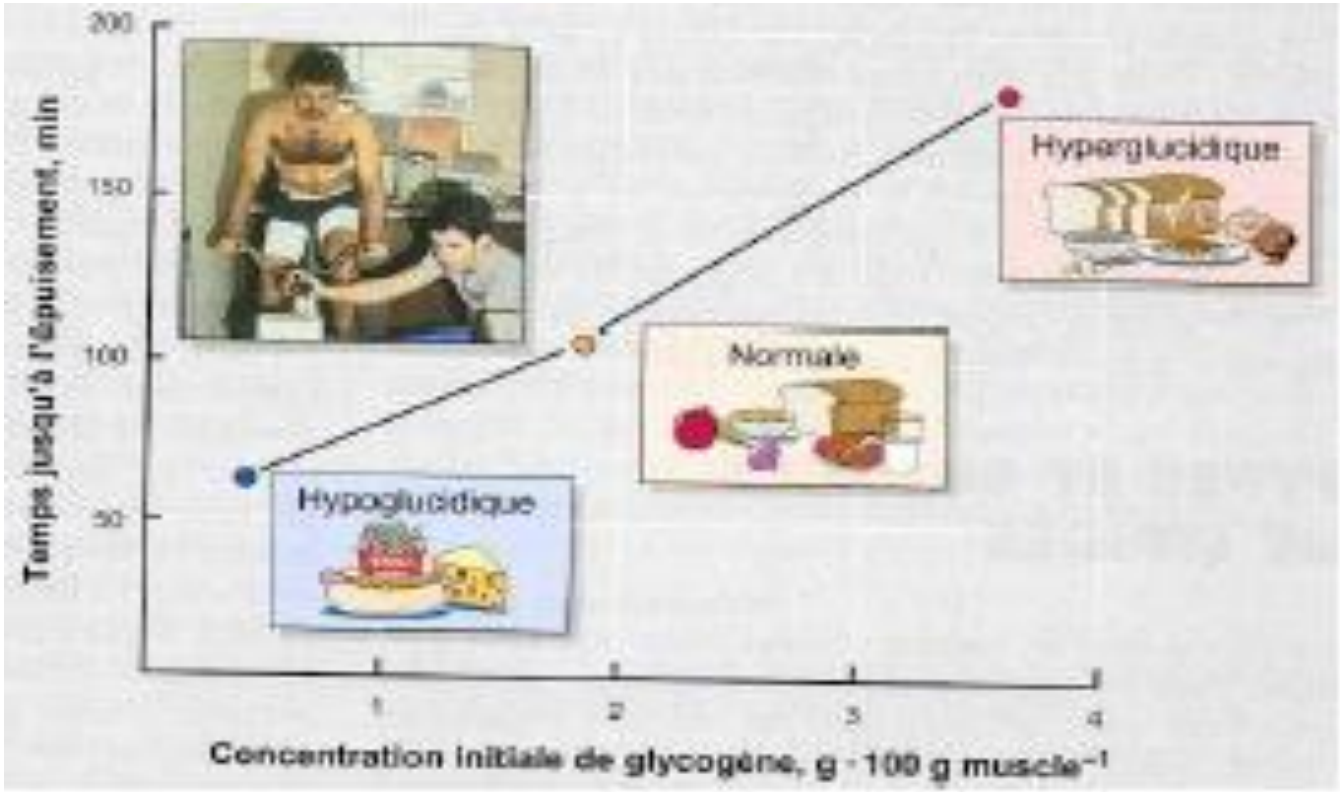

A
B

L'entraînement en endurance se traduit par une augmentation du réseau capillaire du muscle.

(Bigard et coll., 1991)

		Sédentaires	Entraînés
Densité capillaire ($/mm^2$)	Soléaire	834 ± 29	1112 ± 31 **
	Plantaris	784 ± 43	1007 ± 39 **
Rapport C/F	Soléaire	1.60 ± 0.09	1.86 ± 0.08*
	Plantaris	1.58 ± 0.09	1.70 ± 0.03*

Différence avec rats Sédentaires * $P<0.05$ ** $P<0.01$


Temps jusqu'à l'épuisement, min
200
150
100
50
Hyperglucidique
Normale
Hypoglucidique
1
2
3
4
Concentration initiale de glycogène, g · 100 g muscle⁻¹

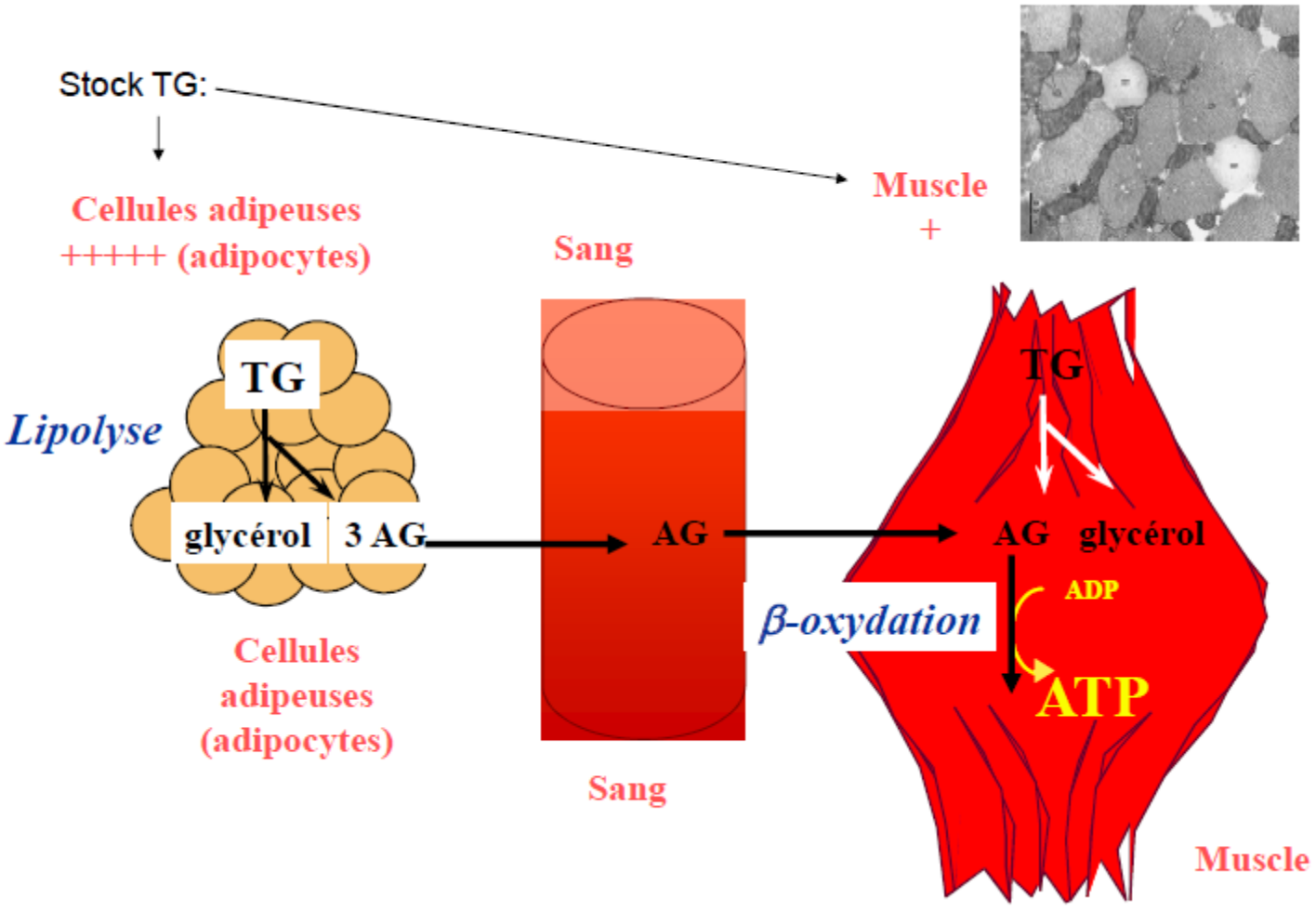
4- وظيفة الميتوكوندري
La fonction mitochondriale

إن إنتاج الطاقة في العمل الهوائي يتم على مستوى الميتوكوندري، تتطلب القدرة على توفير الطاقة عن طريق الآلية الهوائية بتوفر عدد وحجم مهم للميتوكوندري، حيث يعمل التدريب الهوائي على الرفع في هذه الخصائص، وفي دراسة أجريت على الجرذان عدد الميتوكوندري يزداد بـ 15 % بعد 27 أسبوع من التدريب وفي نفس الوقت مساحة الميتوكوندري ترتفع بنسبة 35 %.

5-الانزيمات المؤكسدة
Les enzymes oxydatives

إن الزيادة في عدد وحجم الميتوكوندري يعمل على الرفع من فعاليتها و هذا ما يحسن من الكفاءة الهوائية في العضلة، يرفع التدريب الهوائي من نشاط الأنزيمات المؤكسدة في الميتوكوندري ، و من بين هذه الأنزيمات نجد (la succinate déshydrogénase SDH, sytrate-synthase)، في دراسة أجريت عند أداء تمرينات الجري أو الدراجة ترفع من نسبة نشاط أنزيم SDH بنسبة 25% على عكس الشخص العادي، هذه النسبة تضرب في 2,6 عند تجاوز مدة التدريب 60 إلى 90.

L'entraînement en end. ↗ de l'oxydation des lipides



Evolution du métabolisme des lipides suite à l'entraînement

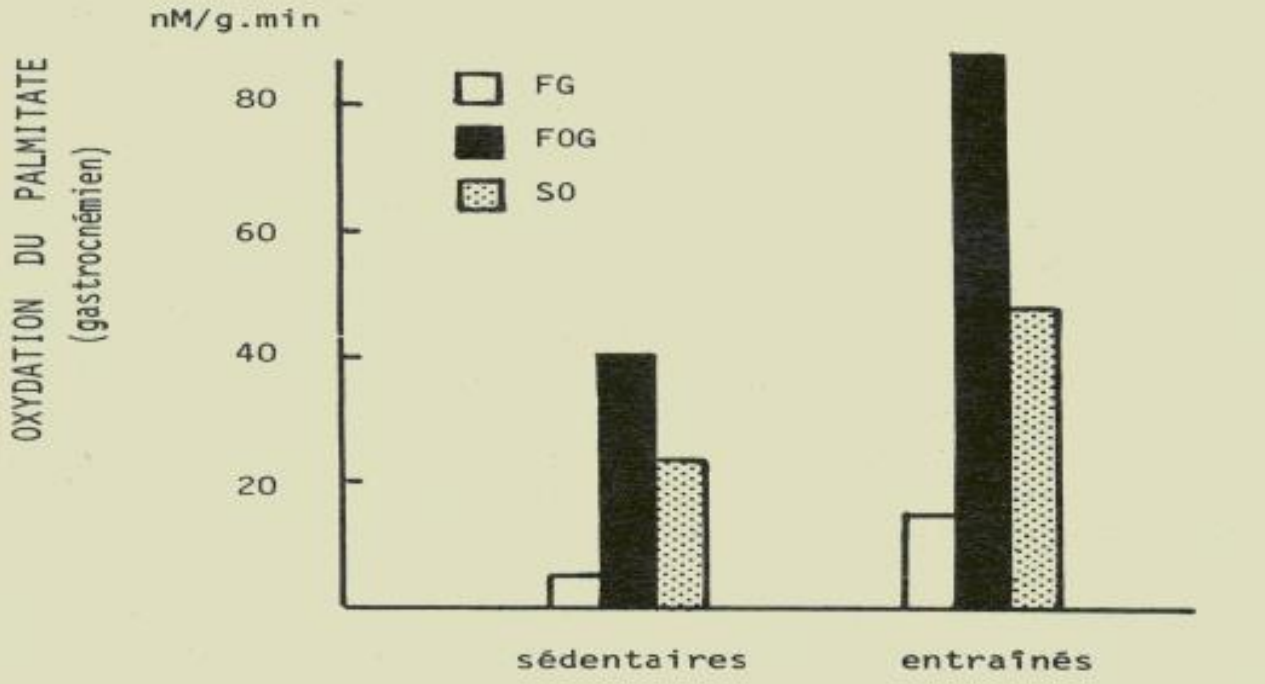


FIG. 88
Adaptation de l'oxydation du palmitate chez le rat (gastrocnémien) après entraînement en endurance
(D'après Baldwin *et al.*, 1977)

Influence de l'entraînement sur le niveau de déplétion glycogénique

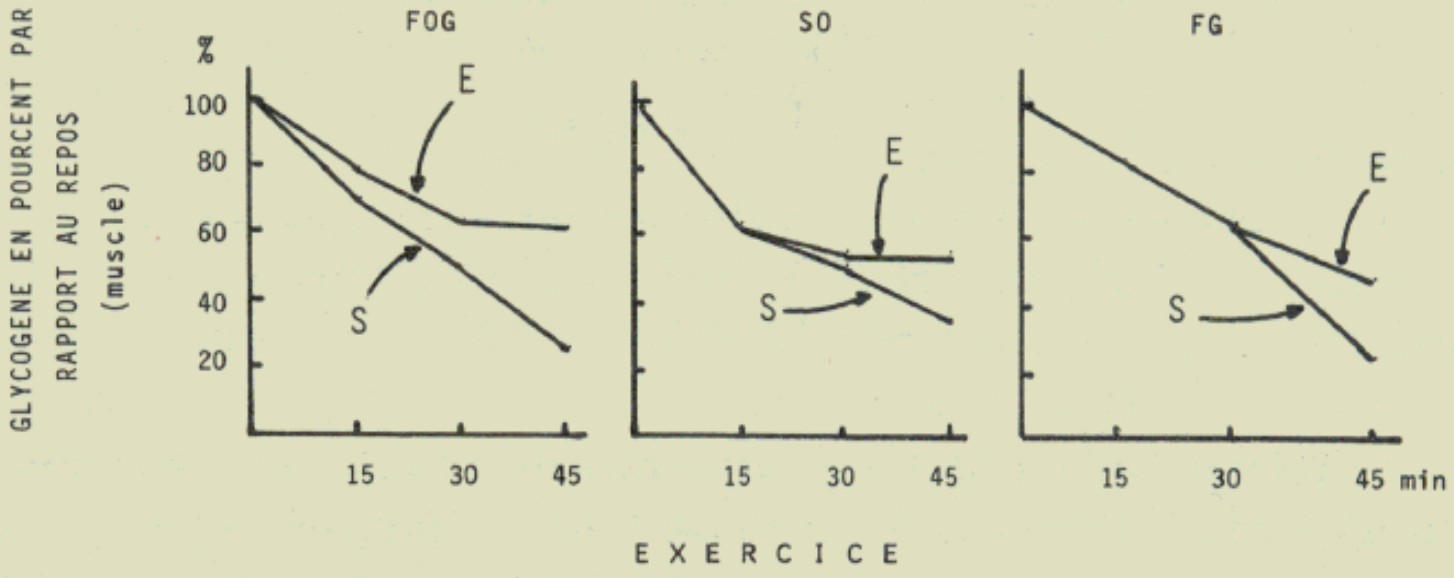


FIG. 86. — Déplétion en glycogène musculaire chez le rat avant et après entraînement d'endurance

(D'après Baldwin *et al.*, 1975)

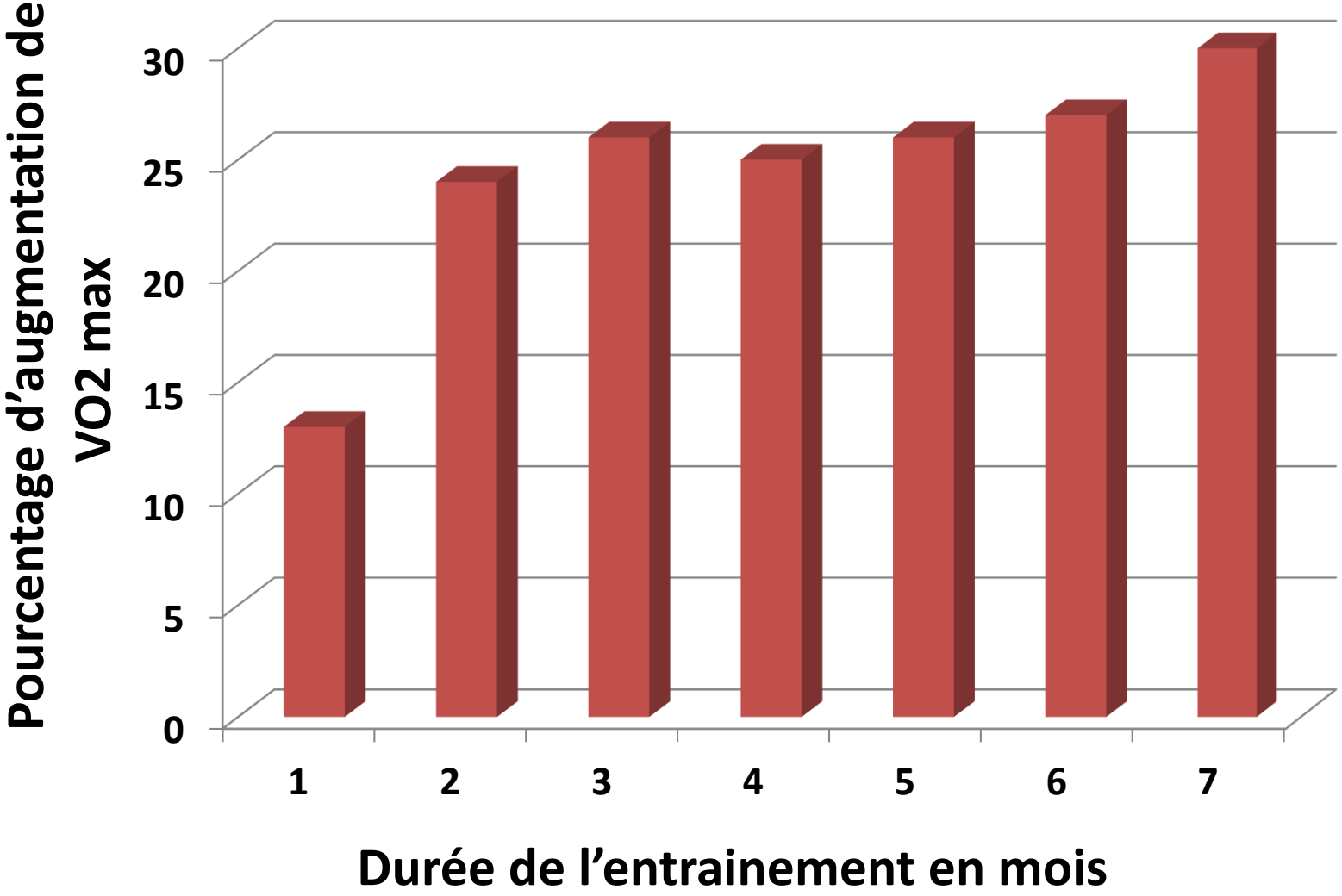
La meilleure oxydation des lipides permet d'épargner le glycogène

Tableau 7.1 : Activités enzymatiques musculaires (mmol • g^{-1} • min^{-1}) de sujets non entraînés, des sprinters et des endurants

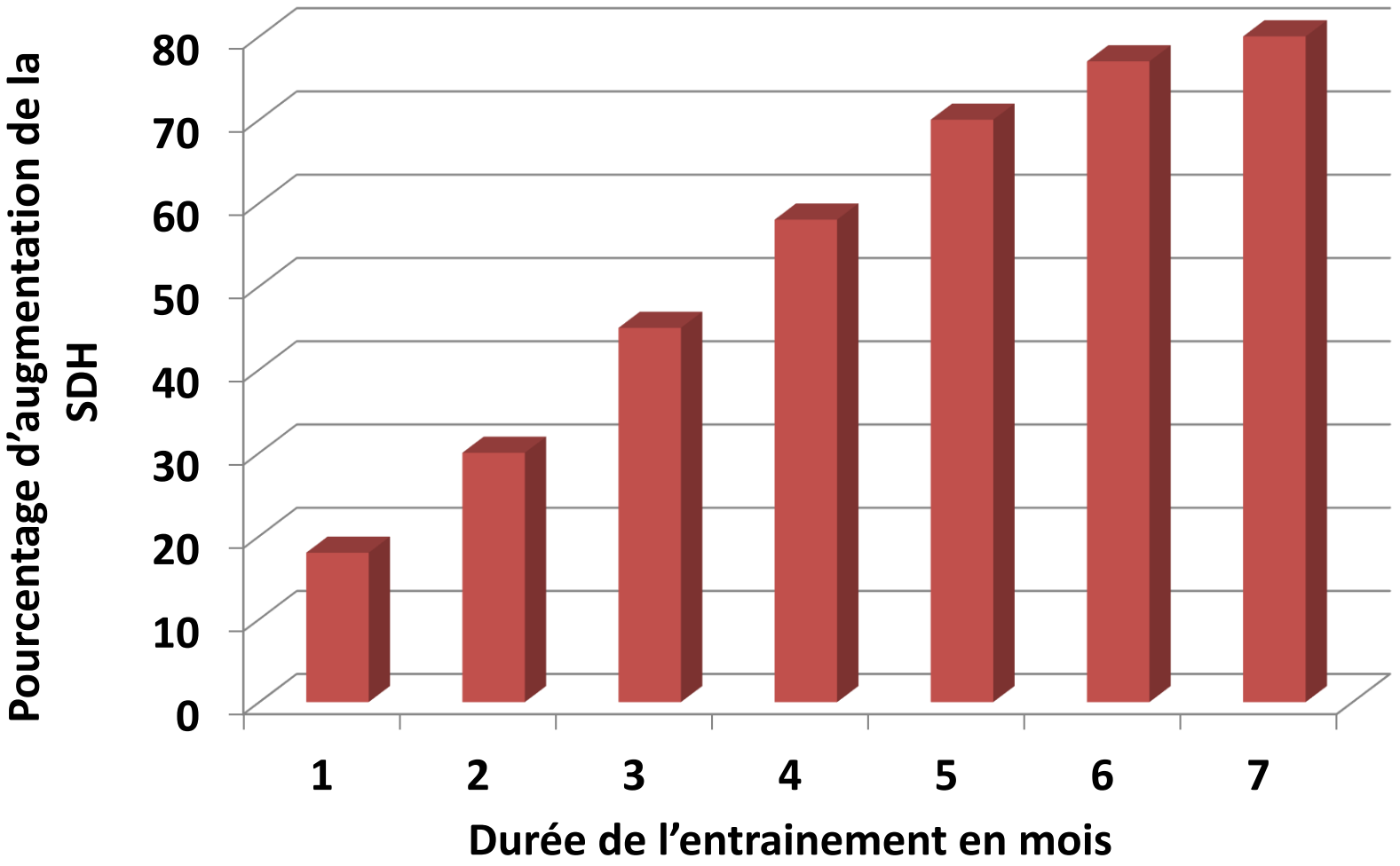
	Non entraînés	Sprinters	Endurants
Enzymes aérobies			
Système oxydatif	6.1	8.0	20.8[a]
Succinate déshydrogénase	45.5	46.0	66.5[a]
Malate déshydrogénase	1.6	1.5	2.3[a]
Carnitine palmityl transférase			
Enzymes anaérobies			
Système ATP-PC	609.0	700.0[a]	569.0
Créatine phosphokinase	308.0	350.0[a]	297.0
Myokinase			
Système glycolytique			
Phosphorylase	5.3	5.8	3.7[a]
Phosphofructokinase	19.9	29.2[a]	18.9
Lactate déshydrogénase	786.0	811.0	621.0

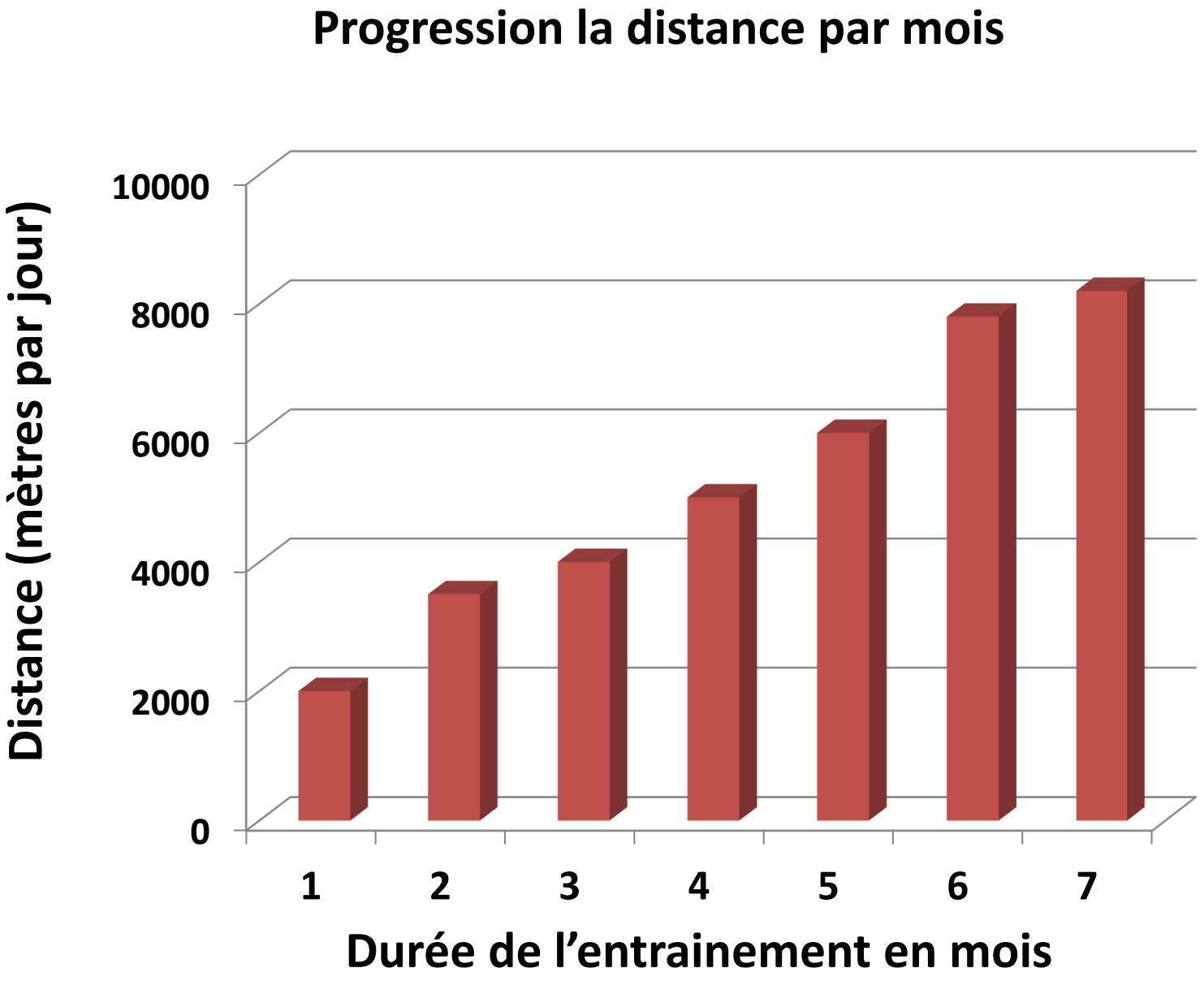
[a] Indique une différence significative par rapport aux sujets non entraînés

Augmentation de la consommation maximale d'oxygène en pourcentage l'ors d'un entrainement en natation de 7 mois

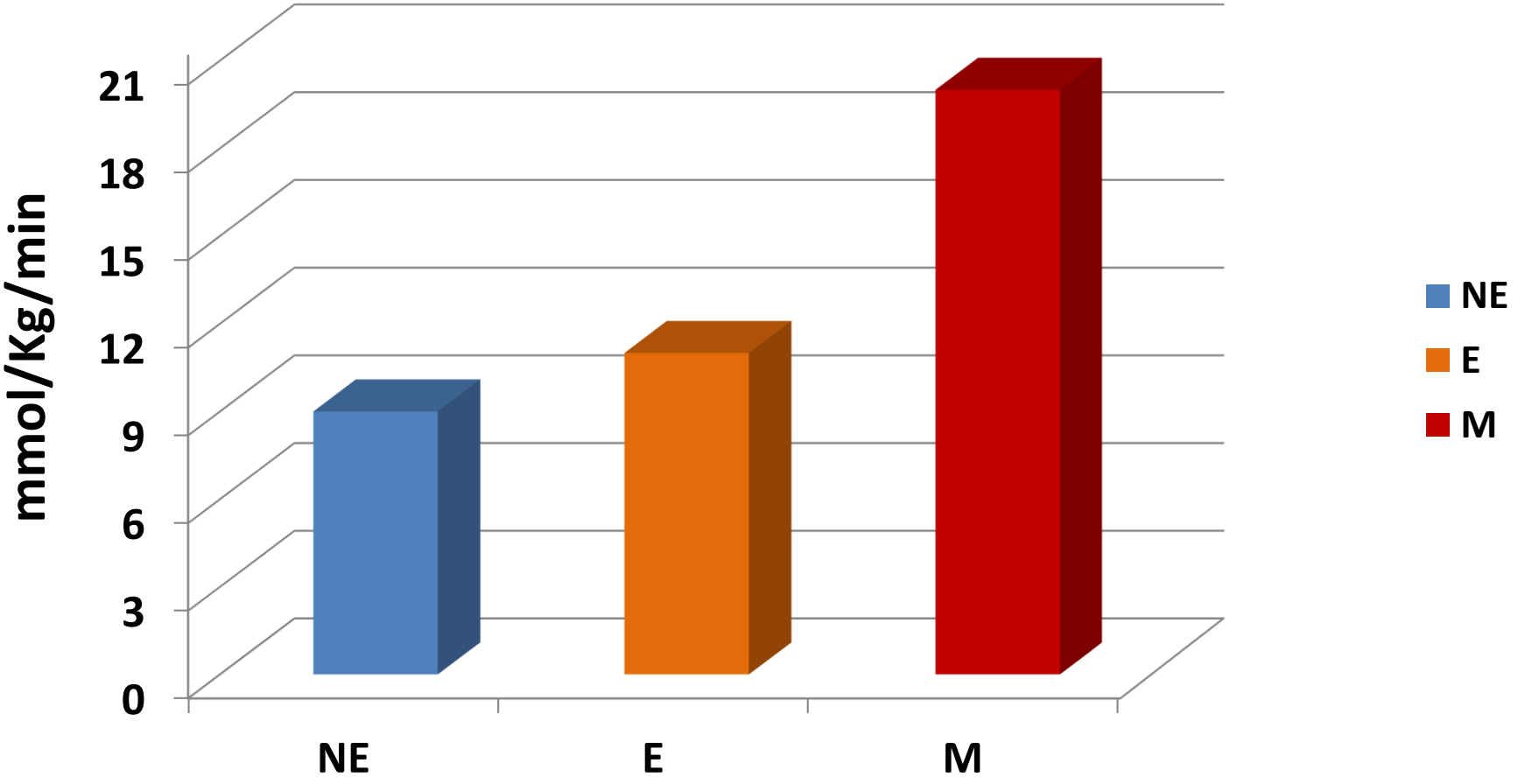


Augmentation de l'activité de la succinate déshydrogénase (en pourcentage) après un entrainement de 7 mois

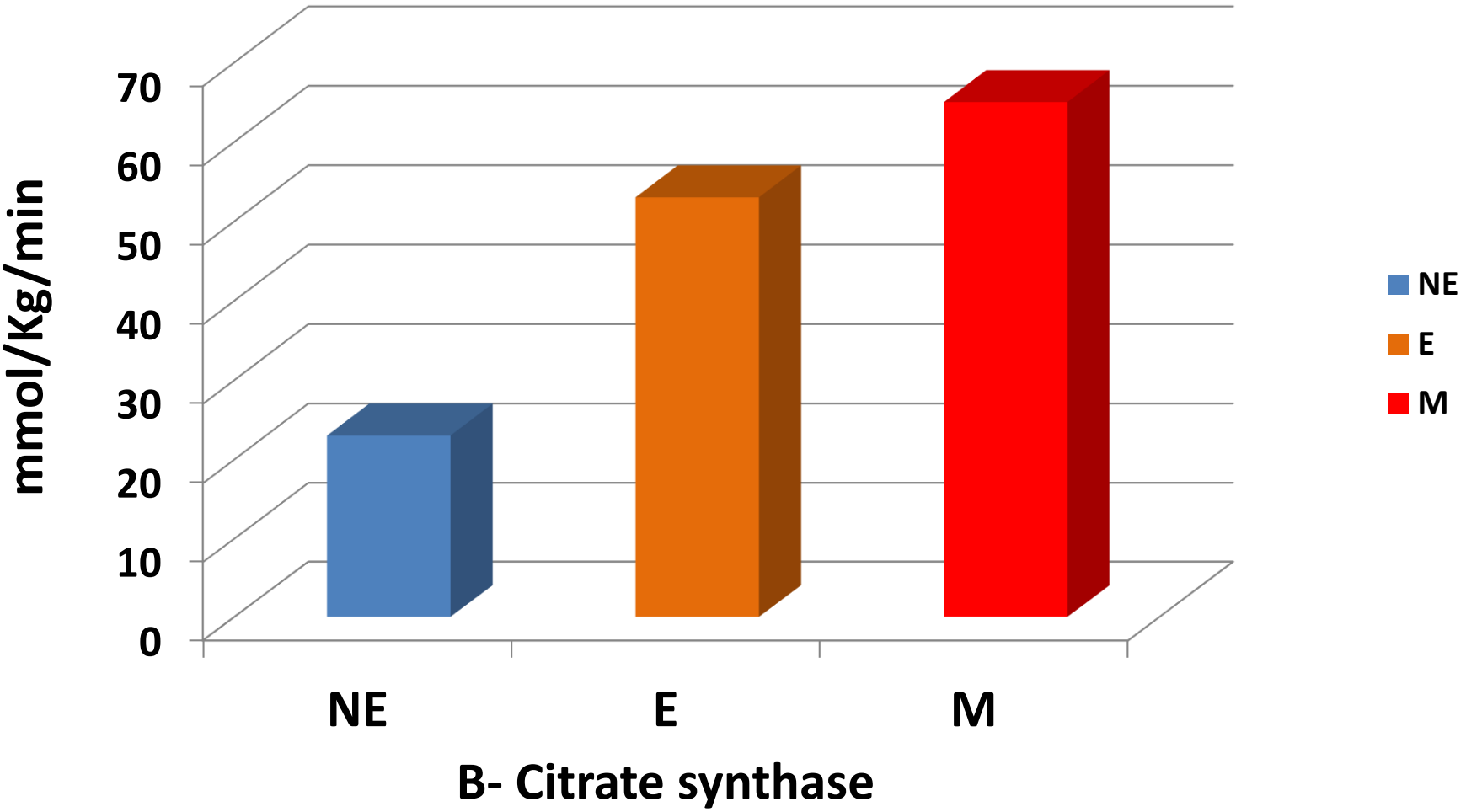



Progression la distance par mois
Distance (mètres par jour)
10000
8000
6000
4000
2000
0
1
2
3
4
5
6
7
Durée de l'entrainement en mois

Activité enzymatique des muscles des membres inférieurs (jumeaux) chez des sujets non entrainés (NE), des coureurs a pieds moyennement entrainés (E), et des marathoniens de haut niveau(M).



A- la succinate déshydrogénase


mmol/Kg/min
70
60
50
40
30
20
10
0
NE
E
M
B- Citrate synthase
NE
E
M

التكيفات الخاصة بالجهاز العضلي عند التدريب اللاهوائي
Les adaptations du système musculaire a l'entrainement anaérobie

يؤدي التدريب اللاهوائي (السرعة ، القوة) إلى إحداث مجموعة من التكيفات على مستوى العضلة الهيكلية، هذا التغير يظهر أساسا في استخدام هذه الألياف أثناء النشاط البدني للقوة والسرعة ، حيث كلما زادت شدة الجهد البدني كلما زاد عدد الألياف FT المستخدمة، يؤدي تدريب السرعة إلى نقصان في عدد الألياف العضلية من النوع ST و يعكس ذلك زيادة في عدد الألياف العضلية FT_a و في دراسة خاصة بتدريب السرعة القصوى لمدة 15 ثا أو 15 و 30 ثا، لوحظ انخفاض في نسبة الألياف العضلية البطيئة من 57 إلى 48% و بالتالي زيادة في نسبة الألياف العضلية FT_a من 32 إلى 38 %.

في دراسة staron et coll، تم التوضيح جيدا لعملية تحول الألياف العضلية، لدى الإناث بعد تدريب للقوة بحمولات وشدة مرتفعة لمدة 20 أسبوع كان هناك زيادة في القوة الثابتة وفي مساحة كل أنواع الألياف العضلية للجزء السفلي، هذه التغيرات وجدت في عدة دراسات، و في أبحاث اخرى وجدت أن تدريب القوة بحمولات مرتفعة و تمرينات السرعة يمكن أن يحدث عنه تحول في الألياف من النوع ST نحو الألياف Fta.

(Esjörnsson et al., 1993)

	Before Training	After 6 w Training
Type I	45 ± 11	38 ± 7 *
Type IIA	40 ± 9	52 ± 11 *
Type IIB	14 ± 11	8 ± 9 *

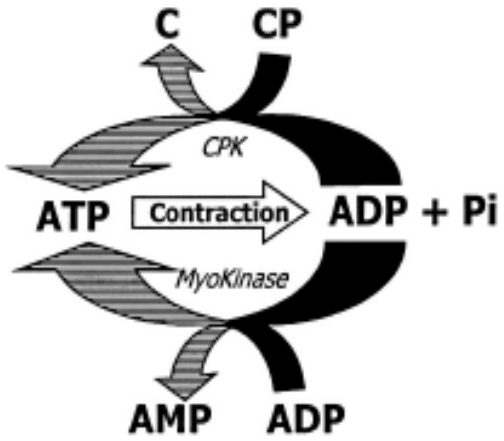
2.2- Adaptations métaboliques à l'entraînement anaérobie

2.2.1- Adaptations du système ATP-PC

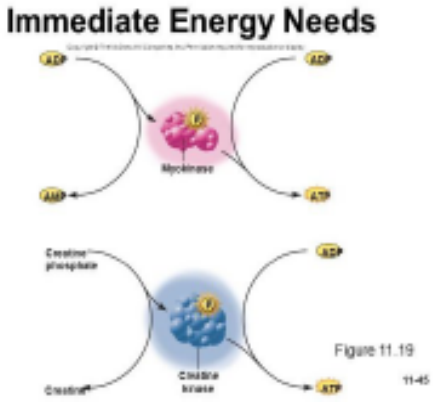
- L'entraînement en sprint améliore cette voie de 2 façons:
  - ↗ Réserves ATP et PC
  - ↗ activité des enzymes clés
    - ATPase (**dégradation** de l'ATP sur tête de myosine)
    - La myokinase (MK) et la créatine kinase (CK ou CPK) (**resynthise** l'ATP

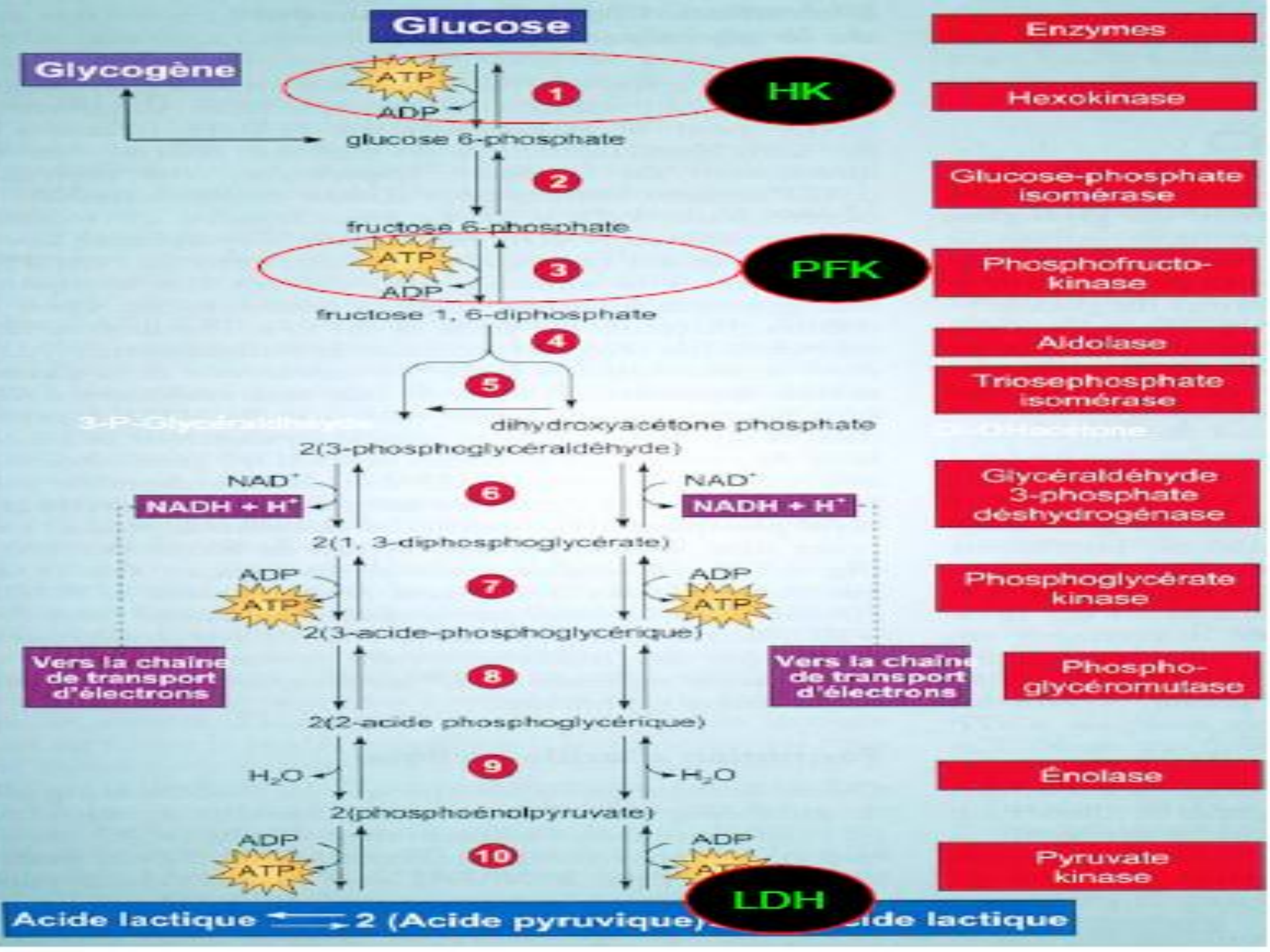
8 semaines d'entraînement anaérobie (sprint)
↗ ATPase de 30 %, la MK de 20 %, la CPK de 36 %

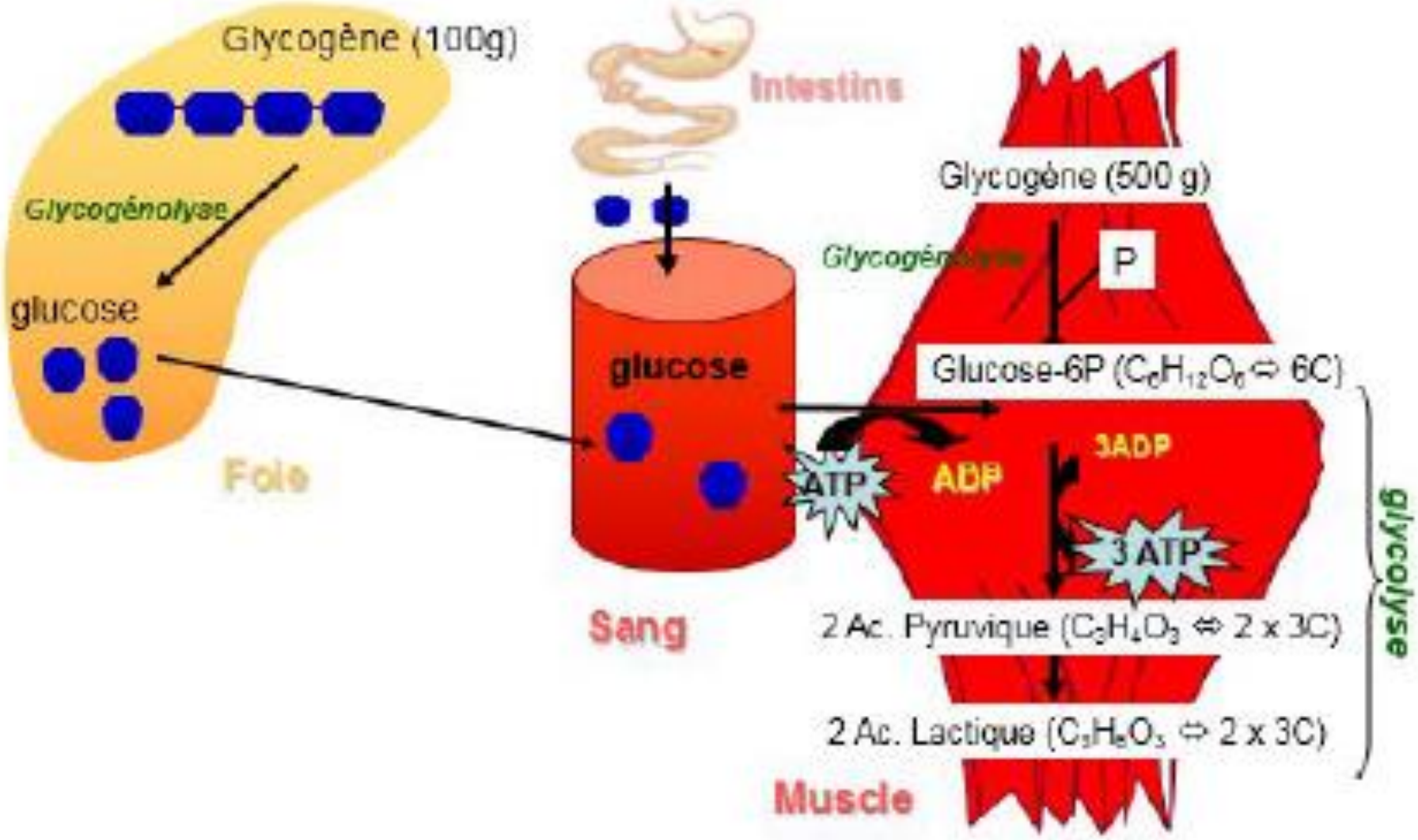
CK: catalyse les réactions qui entrent en jeu lors de la resynthèse de l'ATP à partir de la CP



MK: catalyse les réactions qui entrent en jeu dans le resynthèse de l'ATP à partir de l'ADP



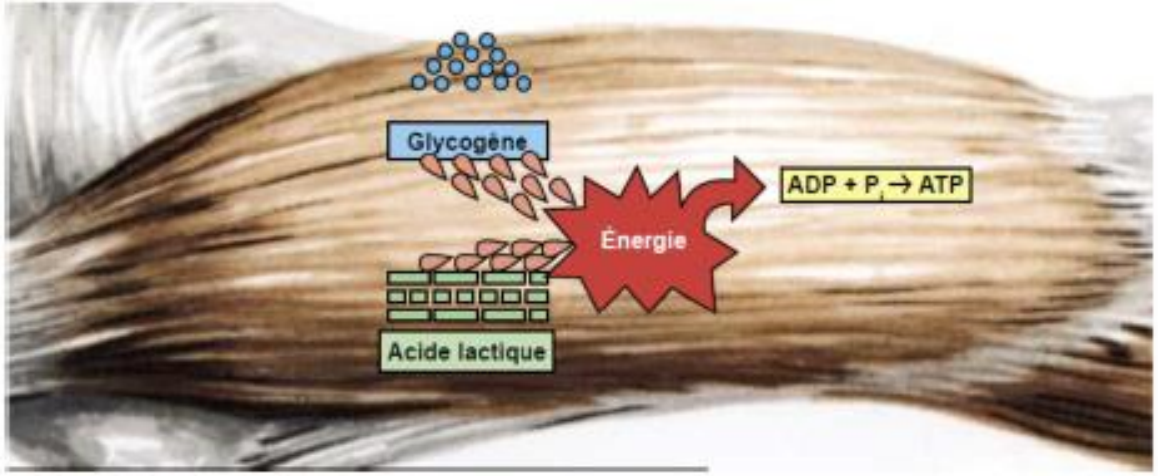

Glucose
Glycogène
ATP
ADP
1
HK
glucose 6-phosphate
2
fructose 6-phosphate
ATP
ADP
3
PFK
fructose 1, 6-diphosphate
4
5
dihydroxyacétone phosphate
2(3-phosphoglycéraldéhyde)
NAD+
NADH + H+
6
NAD+
NADH + H+
2(1, 3-diphosphoglycérate)
ADP
ATP
7
ADP
ATP
2(3-acide-phosphoglycérique)
Vers la chaîne de transport d'électrons
8
Vers la chaîne de transport d'électrons
2(2-acide phosphoglycérique)
H2O
9
H2O
2(phosphoénolpyruvate)
ADP
ATP
10
ADP
LDH
Acide lactique
2 (Acide pyruvique)
Enzymes
Hexokinase
Glucose-phosphate isomérase
Phosphofructo-kinase
Aldolase
Triosephosphate isomérase
Glycéraldéhyde 3-phosphate déshydrogénase
Phosphoglycérate kinase
Phospho-glycéromutase
Énolase
Pyruvate kinase


Glycogène (100g)
Glycogénolyse
glucose
Foie
Intestins
glucose
Sang
Glycogène (500 g)
Glycogénolyse
P
Glucose-6P ($C_6H_{12}O_6$ ⇨ 6C)
ATP
3ADP
ADP
3 ATP
2 Ac. Pyruvique ($C_3H_4O_3$ ⇨ 2 x 3C)
2 Ac. Lactique ($C_3H_6O_3$ ⇨ 2 x 3C)
Muscle
glycolyse

2.2- Adaptations métaboliques à l'entraînement anaérobie

2.2.2- Adaptations de la glycolyse

- Adaptations
  - ↗ activité des enzymes de la glycolyse
    - Preuves directes
      - Un entraînement fait d'exo très I de 30 s ↗ de 10 % à 25 % l'activité des enzymes / faibles changements avec exo de 6 s ou moins.
      - Les activités des enzymes glycolytiques importantes sont plus élevées chez les athlètes de sprint que chez des athlètes d'endurance
    - Preuves indirectes: il s'accumule beaucoup plus d'acide lactique dans le sang après un exercice maximal suite à un entraînement sprint



2.2- Adaptations métaboliques à l'entraînement anaérobie

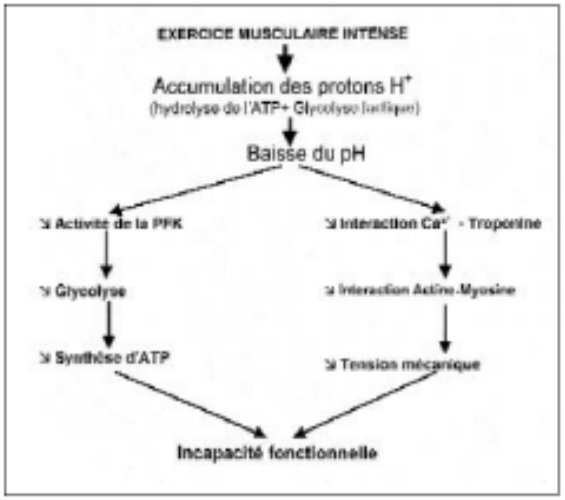
2.2.2- Adaptations du système tampon

- ↗ de la capacité glycolytique avec l'entraînement➔ l'accumulation d'acide lactique dans le muscle puis dans le sang.

P° acide lactique

Acide lactique ⟹ ion lactate + H^+ ⟹ ↘ pH

↘ perf ⟸ ↘ P° ATP ⟸ Inhibition PFK et LDH



Système protecteur = système tampon

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

Ions bicarbonates — bicarbonates

8 semaines d'un entraînement anaérobie ↗ les systèmes tampons de 12 à 15 % (sharp et coll. 1986), **l'effort peu donc continuer plus longtemps chez les sujets entraînés.**

تكيف جهاز ATP-PCr

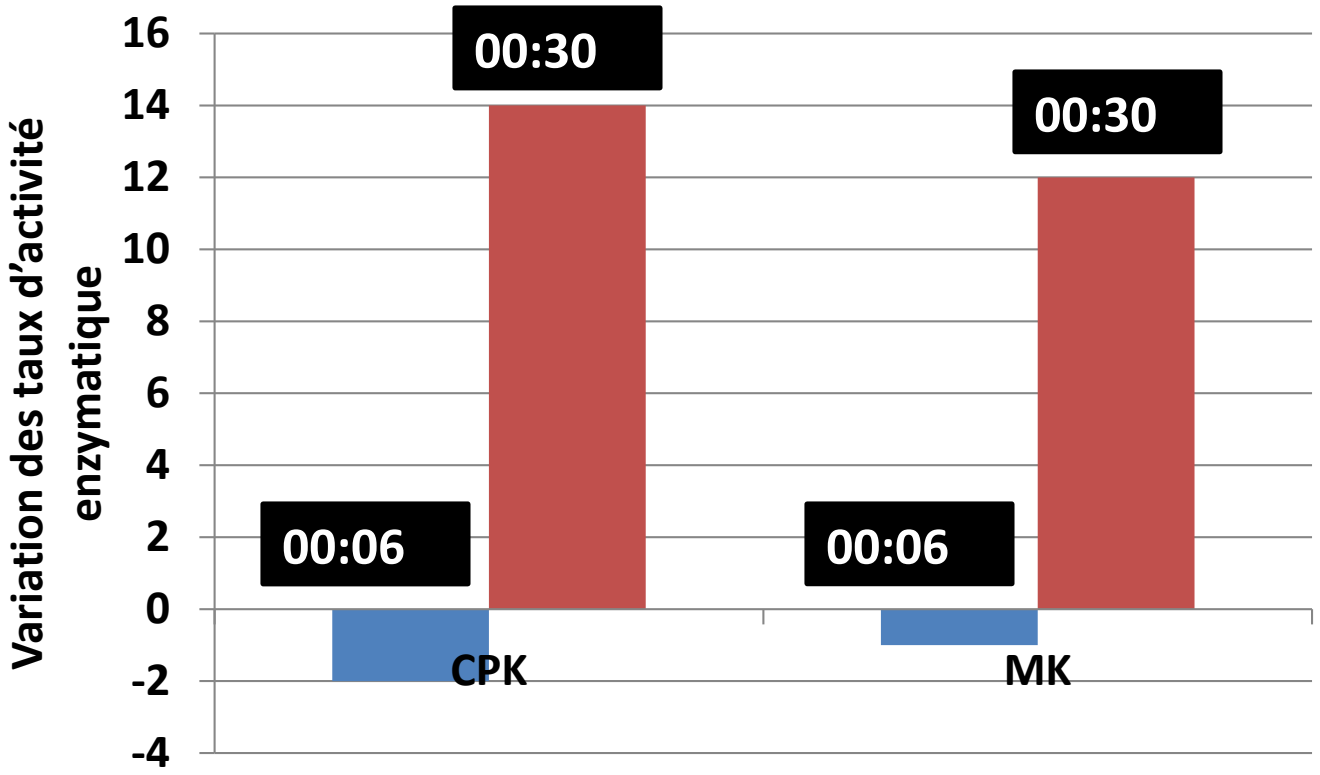
عند كل من نشاط السرعة و رفع الأثقال يكون هناك إنتاج أقصى للقوة وهذا باستخدام كل من جهاز ATP-PCr من أجل توفير الطاقة اللازمة للتقلص العضلي ، كل جهد بدني قصير المدة و عالي الشدة يتطلب هدم و تصنيع سريع للATP و PCr. في دراسة أجريت من طرف Costil et all قام مجموعة من الرياضيين بالبسط الأقصر للركبة ، تضمنت الحصص بين عشر تقلصات قصوى بسرعة لمدة قصيرة أقل من 6 ثانية برجل واحدة ، هذا النوع من التدريب أدى إلى التحفيز وبطريقة متصاعدة لجهاز ATP-PCr ومن أجل تدريب الرجل الأخرى تم إنجاز تكرارات قصوى لمدة 30 ثانية وهذا باستخدام الجهاز الجليكوليكي، عند كلا نوعي التدريب كان هناك نفس التطور للقوة بنسبة 14% ومقاومة التعب، كما كان هناك زيادة في كل من أنزيم الكرياتين فوسفو كيناز و الميوكيناز في الساق المتدربة لمدة 30 ثانية بينما لم يكن هناك تغير في الساق المتدربة لمدة 6 ثانية ، وهذا يعطي نتيجة أن التمرينات القصيرة و العالية الشدة ترفع من القوة العضلية و التفوق بينما ينتج عن ذلك تطور ضعيف في جهازATP-PCr

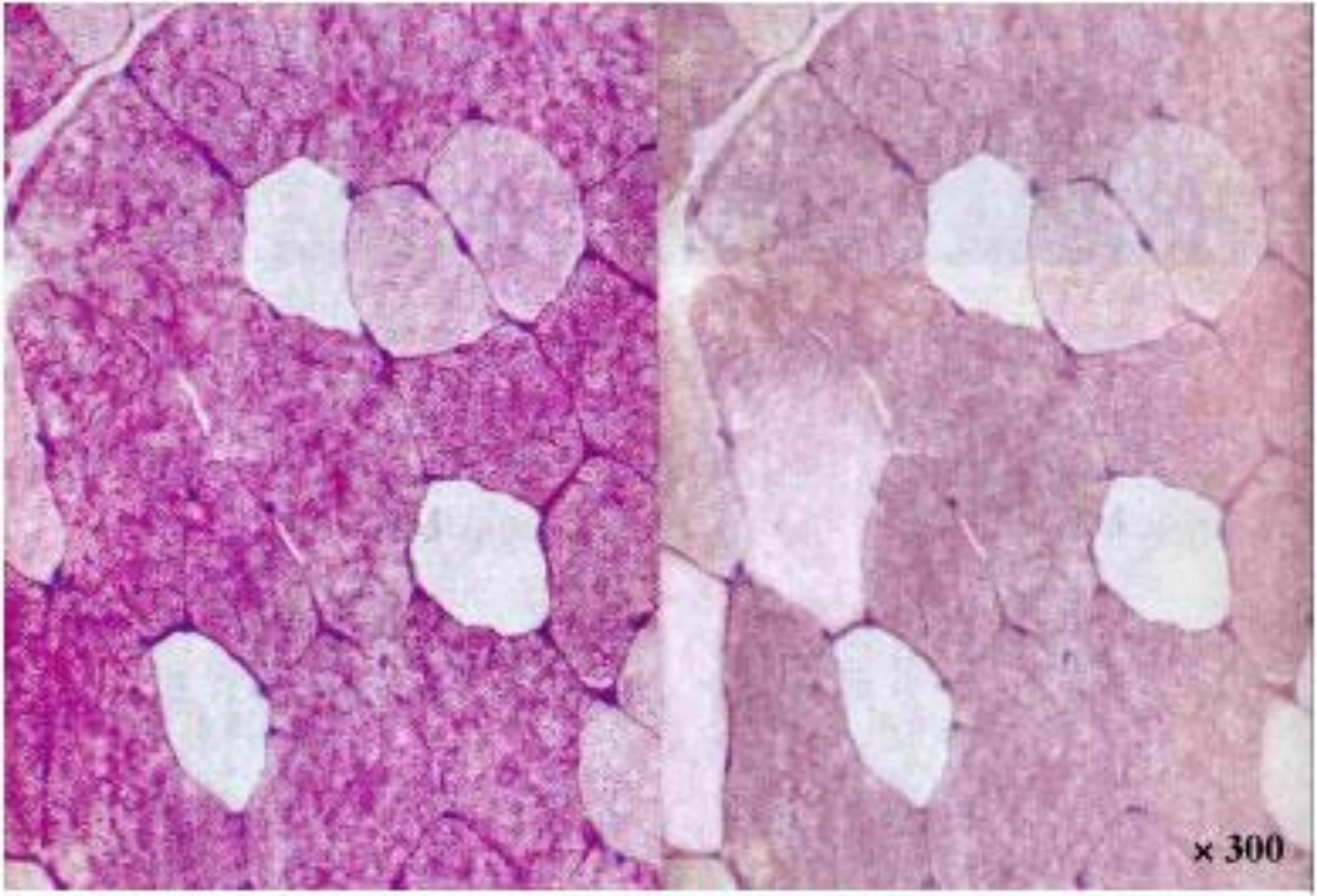
دراسة أخرى توصلت إلى زيادة في في نشاط الانزيمات العضلية لهذا الجهاز بعد تكرارات للتمرينات أقل من 5 ثا هذه النتائج تعتبر معاكسة للدراسة السابقة وهذا يدل على أن الهدف الرئيسي من التدريب هو تطوير القوة هذا التطور في القوة يسمح للعضلة بإنجاز اكثر سهولة للتمرينات البدنية المنجزة.

تكيف الجهاز الجليكوليكي

التدريب اللاهوائي عن طريق تمرينات لمدة 30 ثانية يرفع من نشاط بعض الانزيمات المعروفة في عملية الجليكوليز (الفوسفوغيلاز، الفوسفوفركتوكيناز، اللاكتلت ديدروجيناز) التدريب المنجز لتمرينات عالية الشدة لمدة 30 ثانية يرفع من نسبة نشاط هذه الانزيمات من 10 إلى 25% بينما هناك تغيرات ضعيفة عند التمرينات الاقل من 6 ثانية في دراسة للسرعة لمدة 30 ثا ترفع إحصائيا من نشاط الهيكسوكيناز بنسبة (56%) و انزيم الفوسفو فركتوكيناز بنسبة 49% بدون التغيير في نشاط الفوسفوغيلاز و اللاكتات ديدروجيناز.
التدريب اللاهوائي يحسن من نشاط انزيمات جهاز ATP-PCr و الجليكوليكي ولكن بدون التأثير على العمليات الايضية الهوائية.

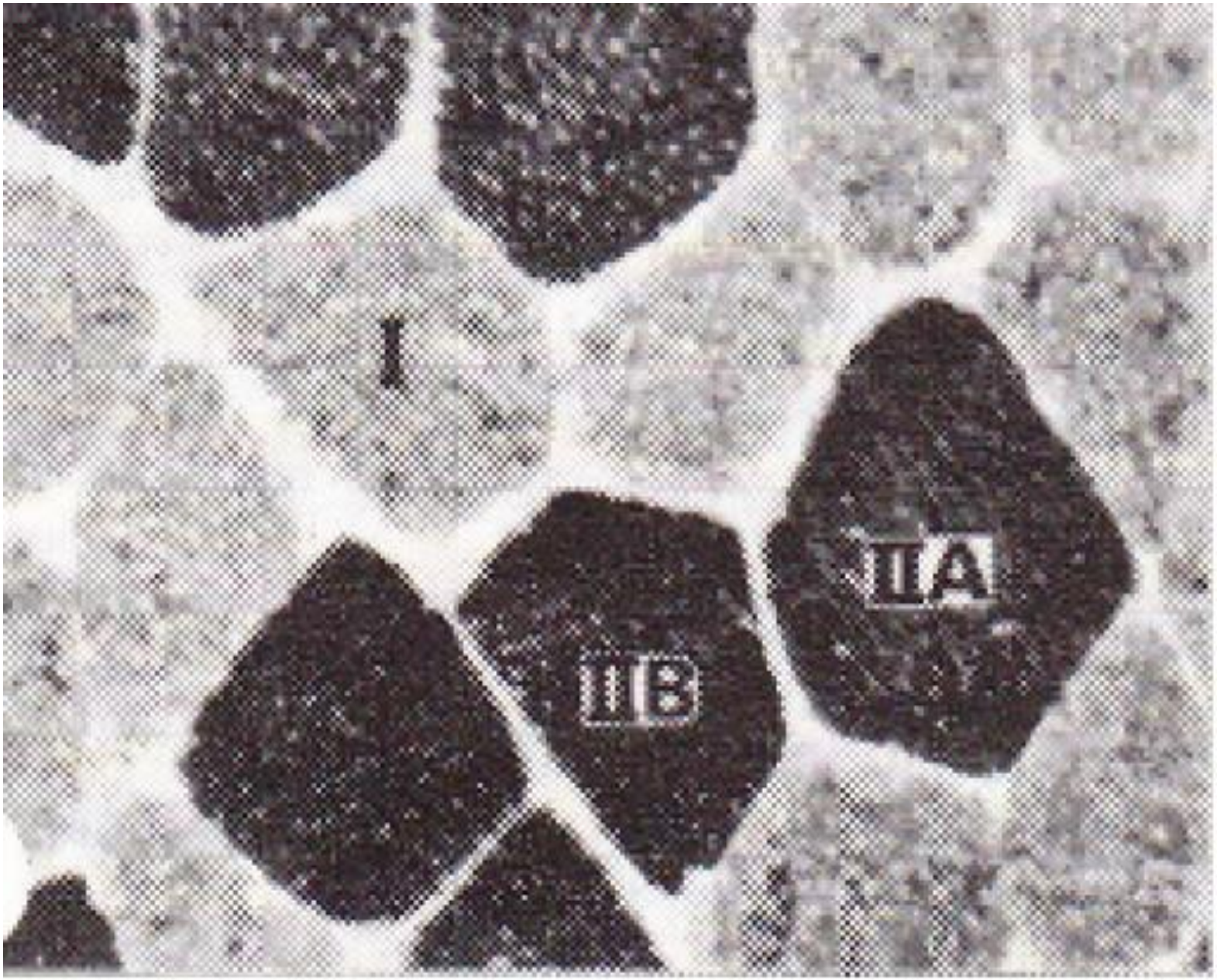
Variations des taux d'activités musculaires de la créatine phosphokinase (CPK) et de la myokinase (MK) après des exercices très intenses de 6 s et de 30 s





Coupe transversale de muscle avant (à gauche) et après (à droite) contraction

Le glycogène est coloré en violet


I
IIA
IIB