


Adaptations cardiovasculaires

Objectifs

- Identifier les adaptations aiguës lors d'efforts prolongés
- Identifier les adaptations chroniques présentes à la suite d'efforts prolongés
- Comprendre les déterminants de la capacité et de l'endurance aérobie



A man in tactical gear is crawling on a rooftop, aiming a handgun at zombies in the background. The scene is dark and atmospheric, with a brick wall and a doorway visible. The man is in the foreground, leaning forward with one hand on the ground and the other holding a handgun. In the background, two zombies are visible near a doorway, one appearing to be in a state of aggression.

Mise en contexte

- Les zombies ont depuis plusieurs années envahis nos villes
- Il n'est pas rare qu'une simple sortie pour se procurer des vivres se transforme en course effrénée pour sauver sa vie
- Voyons ce qui se passe lorsque vous tourner le coin, tombez face à face avec des zombies et devez fuir à toutes jambes



Déterminants de votre survie

(outre la chance)

- Certaines caractéristiques physiologiques vous permettront d'avoir plus de succès dans votre tentative de fuite
- Votre **capacité aérobie**, qui représente la quantité maximale d'oxygène que vous êtes en mesure d'utiliser pour alimenter vos mitochondries et la chaîne de transport des électrons et;
- Votre **endurance aérobie**, qui représente le pourcentage de votre capacité aérobie que vous êtes en mesure de soutenir pour une durée donnée

Capacité aérobie

• Notre capacité aérobie dépend de plusieurs facteurs qui peuvent être tous limitant dans un contexte ou un autre:

1. Quantité d'oxygène disponible dans les poumons
2. Quantité d'oxygène pouvant être transférée des poumons au sang
3. Quantité d'oxygène pouvant être transportée par le sang
4. Quantité d'oxygène pouvant être transférée du sang au muscle
5. Quantité d'oxygène pouvant être utilisée par le muscle

On peut résumer la capacité aérobie à cette équation:

$$VO_{2max} = FC_{max} \times VES \times (a - vO_2)_{max}$$

VES = Volume d'éjection systolique

A-VO₂ = différence artérioveineuse

FC = Fréquences cardiaques

Dépend de la quantité d'air et de la concentration d'oxygène dans les poumons. Les limitations sont davantage liées à l'environnement (présence ou non d'oxygène, altitude, présence de contaminants, etc.) qu'à des composantes physiologiques entraînables

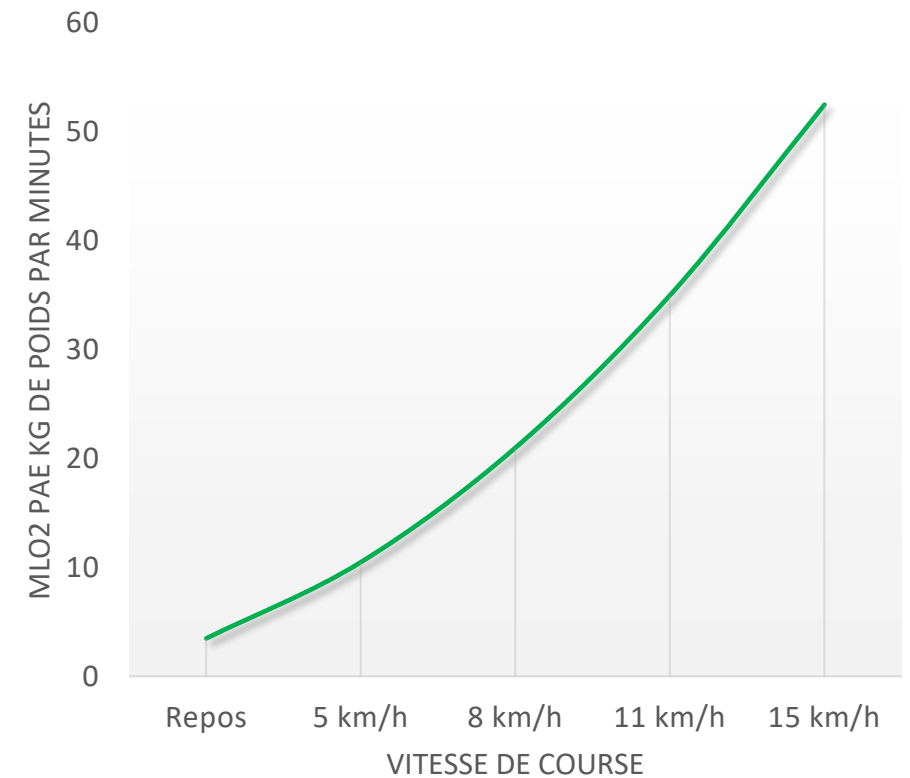
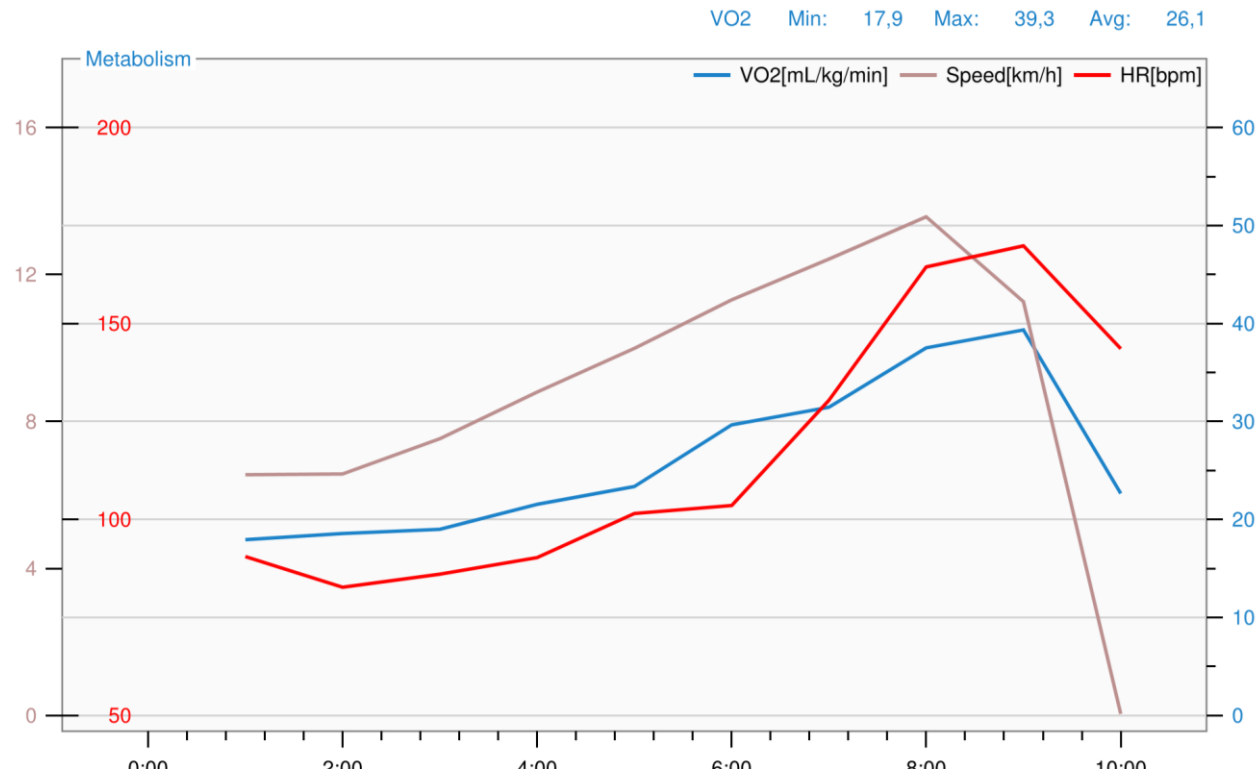
Ceci dépend de la surface d'exposition et de contact entre l'air/oxygène et le sang qui peut être limitée par différentes pathologies (troubles respiratoires, embolie, nécroses, etc.). La capacité du sang à accepter l'oxygène est également un déterminant important (présence de CO ou de CO₂, capacité de l'hémoglobine à accueillir le sang, etc.). *Il s'agit d'un facteur entraînable*

En plus de la capacité du sang à accepter l'oxygène, le liquide sanguin doit être en mesure de parcourir le trajet requis avec une vitesse suffisante ainsi qu'en quantité suffisante. L'activité du cœur et le système vasculaire périphérique vont influencer la capacité aérobie. *Il s'agit d'un facteur entraînable*

La quantité de sang pouvant atteindre les muscles dépend du volume sanguin et de la circulation sanguine, mais également des ramifications et de l'étendu du réseau vasculaire. *Il s'agit d'un facteur entraînable*

Une fois le sang et l'oxygène arrivés à destination, encore faut-il qu'il y ait suffisamment de structures (mitochondries) pour utiliser l'oxygène par l'intermédiaire de la chaîne de transport des électrons. *Il s'agit d'un facteur entraînable*

Intensité de l'effort et capacité aérobie



Amélioration de la VO_{2max}

- Les valeurs les plus élevées de capacité aérobie ont été chiffré aux alentours de $90-93 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$
- Plusieurs auteurs ont tenté de chiffrer de façon globale le potentiel d'augmentation de la capacité aérobie
- Toutefois, le potentiel d'augmentation est directement influencé par la valeur initiale
 - Plus la capacité aérobie initiale est faible, plus son augmentation peut être importante ($25 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1} \rightarrow 45-50 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$)
 - Plus la valeur initiale est importante plus l'augmentation de la capacité aérobie est limitée ($50 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1} \rightarrow 55-60 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$)
- Afin d'augmenter la capacité aérobie, l'organisme doit être exposé régulièrement à une sollicitation suffisante (intensité et volume) ainsi qu'une récupération adéquate
 - $\sim >65\%$ Capacité aérobie
 - $\sim >10\text{min}$
 - ~ 3.5 fois par semaine



Endurance aérobie

- L'endurance aérobie dépend de plusieurs facteurs dont les principaux suivants:

1. La capacité aérobie (et ses déterminants)
2. La résistance à la fatigue des fibres musculaires
3. Les réserves énergétiques
4. L'efficacité énergétique (rendement mécanique ou économie de mouvement)
5. La thermorégulation
6. La résilience

- L'endurance aérobie est plus difficile à évaluer que la capacité aérobie

- v_{Vmax}
- FTP
- O_2 par W

Une personne ayant une faible capacité aérobie peut être très endurante. Toutefois, elle ne pourra être « performante », elle ne sera en mesure que de prolonger une fraction importante d'une petite valeur dans le temps (lent, mais lent longtemps). L'augmentation de la capacité aérobie augmente le potentiel d'endurance. ***Il s'agit d'un facteur entraînable***

La résistance à la fatigue des fibres varie selon le type de fibres. L'utilisation d'une plus grande proportion de fibres résistantes à la fatigue (type 1) permet de prolonger les contractions musculaires pendant des périodes plus longues. ***Il s'agit d'un facteur légèrement entraînable***

Les efforts prolongés nécessitent une plus grande quantité d'énergie. Les réserves disponibles, plus particulièrement les réserves de glycogène peuvent devenir un facteur limitant de la performance en endurance. ***Il s'agit d'un facteur entraînable***

Plus la durée d'un effort perdure dans le temps, plus l'efficacité mécanique ou l'économie de mouvement prend de l'importance. Plus la quantité d'énergie perdue en chaleur est importante, moins d'énergie est allouée au mouvement. ***Il s'agit d'un facteur entraînable***

En lien avec les exigences énergétiques plus importantes, l'économie du mouvement et la durée de l'effort, l'accumulation de chaleur peut se traduire par une diminution de la performance en endurance. ***Il s'agit d'un facteur entraînable***

La résilience représente la capacité psychologique à tolérer un effort et les sensations qui en découle. Lors d'efforts prolongés, cette dimension psychologique peut s'avérer un facteur limitant important. ***Il s'agit d'un facteur entraînable***

Amélioration de l'endurance aérobie

- Indépendamment de l'augmentation de la capacité aérobie, il est possible d'améliorer l'efficacité du système et développer l'endurance
- Tout comme pour la capacité aérobie, moins l'endurance est bonne, plus il est possible de l'augmenter
- On observe des augmentations de ~10 à ~30%
- Il existe de nombreuses approches visant l'amélioration de l'endurance aérobie
 - Elles impliquent toutes de prolonger une intensité dans le temps
 - Elles dépendent toutes du niveau de sollicitation qu'il est possible de soutenir

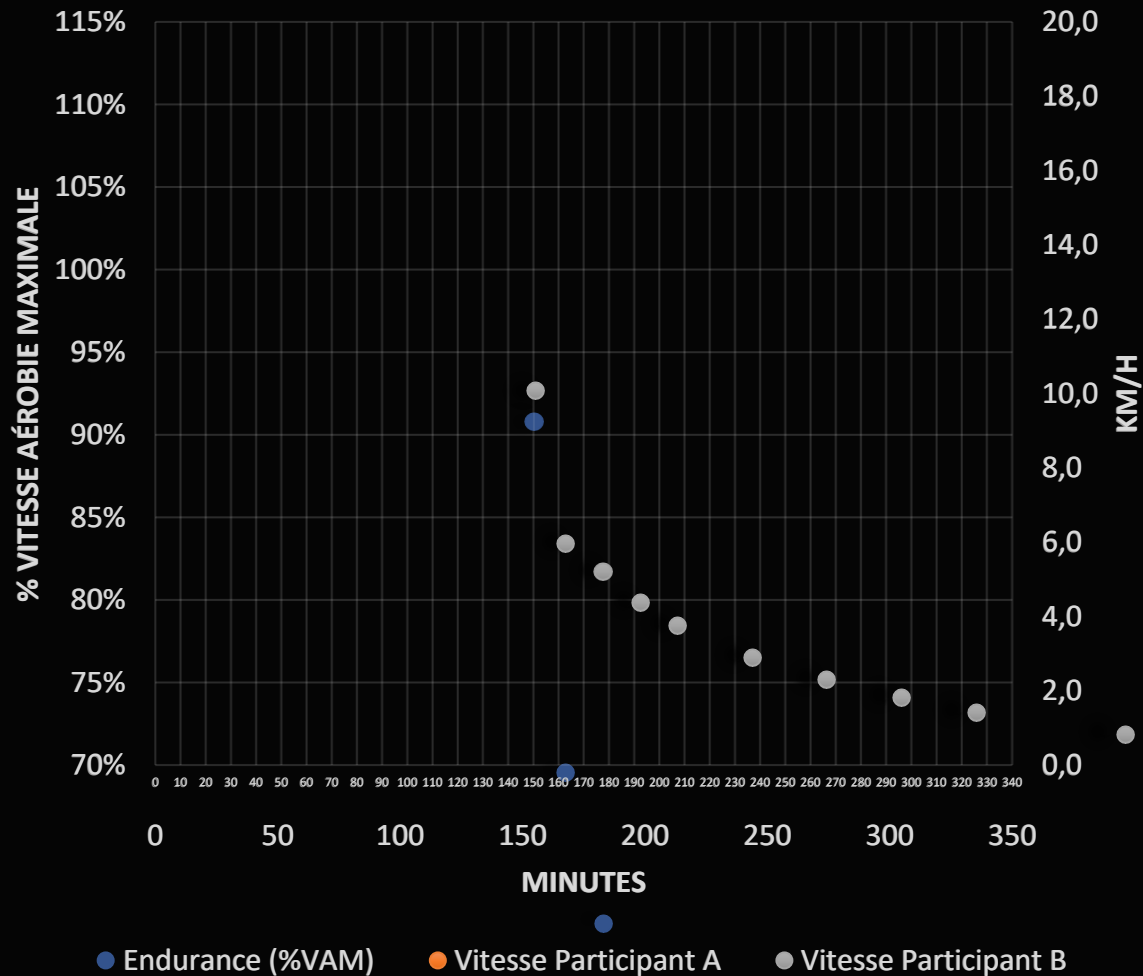




Fuir des zombies

- Si vous avez à fuir des zombies...
 - Vous devez bénéficier d'une bonne **capacité aérobie** afin de pouvoir atteindre une vitesse de course suffisante
 - Vous devez bénéficier d'une **endurance aérobie** suffisante pour maintenir une vitesse suffisante pour une durée vous permettant de semer vos poursuivants

Relation capacité aérobie – endurance aérobie



- Il est possible de modifier la courbe d'endurance selon sa forme initiale par l'entremise d'interventions en entraînement
- Toutefois, il est inévitable d'observer une diminution de la puissance maximale en fonction du temps

Évaluation de la capacité aérobie

- Afin de déterminer la capacité aérobie d'un individu il faut augmenter la consommation d'oxygène en augmentant le travail généré
- Il faut mesurer la consommation d'oxygène ou encore d'associer le travail généré à une consommation d'oxygène
- Les tests sont progressifs (de plus en plus difficiles), sous-maximaux ou maximaux, directs ou indirects
- Exemples de tests:
 - Cooper 12 min
 - Test Navette 20m
 - Test progressif par palier
 - Test progressif continu



Évaluation de l'endurance aérobie

- L'EA aérobie est plus difficile à quantifier parce qu'elle est influençable par plusieurs facteurs
- Afin de tester l'EA, il faut associer une puissance de travail (vitesse, puissance) à plusieurs durées afin d'être en mesure d'établir une courbe de fatigue
- Péronnet et Thibault ont proposé un modèle mathématique pour associer le % de consommation d'oxygène soutenable à la durée d'un effort (il existe de nombreux modèles)

- $$\text{Index d'endurance (IE)} = \frac{(100 - \%VO_{2\max})}{(\ln(7) - \ln(t))}$$

t = temps en minutes



Pertinence de l'évaluation de l'EA

- En observant de façon conjointe et simultanée des paramètres physiologiques (FC, VO_2 , etc.) et des paramètres de travail (vitesse, puissance) il est possible de déterminer le coût en oxygène de la puissance générée (efficacité)
- Une des adaptations les plus importantes pour l'EA se situe au niveau de la réduction du coût en O_2 du travail généré





Adaptations aigues

- Durant un effort qui se prolonge dans le temps (plus que quelques minutes), la consommation d'oxygène augmente en proportion de l'intensité de l'effort
- Cette augmentation repose sur la capacité de l'organisme à augmenter le débit cardiaque et l'extraction de l'oxygène par les tissus
- Cette relation s'explique par l'équation de Fick:
 - $VO_2 = Q \times (a - vO_2)_{max}$

Augmentation de Q

- Lors d'un effort, le débit cardiaque (Q) augmente afin de permettre l'augmentation de la distribution du sang et de l'oxygène aux tissus actifs
- L'augmentation de Q se produit grâce à l'augmentation des fréquences cardiaques (FC) et du volume d'éjection systolique (VES)
- L'activation du système nerveux sympathique, la réponse endocrinienne (adrénaline, noradrénaline) ainsi que l'augmentation du retour veineux et du remplissage ventriculaire suscitent l'augmentation des FC et du VES
- Chez des participants masculins modérément entraînés, on peut observer des valeurs de repos de Q de 5L/min et des augmentations lors d'efforts intenses jusqu'à ~25L/min



Augmentation des FC

- Lors d'efforts physiques prolongés, l'augmentation des fréquences cardiaques est le résultat de la diminution de l'activité de la division parasympathique et de l'augmentation de l'activation de la division sympathique du système nerveux autonome
- Au début de l'effort, une activation en parallèle du cortex moteur et du centre de contrôle cardiovasculaire du bulbe rachidien entraîne une suppression de l'activité parasympathique au profit de la division sympathique
- Les mécanorécepteurs des muscles transmettent des informations sur les changements de tension et de longueur des muscles, stimulant davantage l'activation de la division sympathique
- Les chémorécepteurs transmettent les informations en lien avec l'environnement physico-chimique du muscle (concentration de métabolites issues de l'activité musculaire) et active la division sympathique
- Afin de renforcer les effets du système nerveux (en intensité et dans le temps), les glandes surrénales produisent des catécholamines (adrénaline et noradrénaline) qui stimule l'activité cardiaque



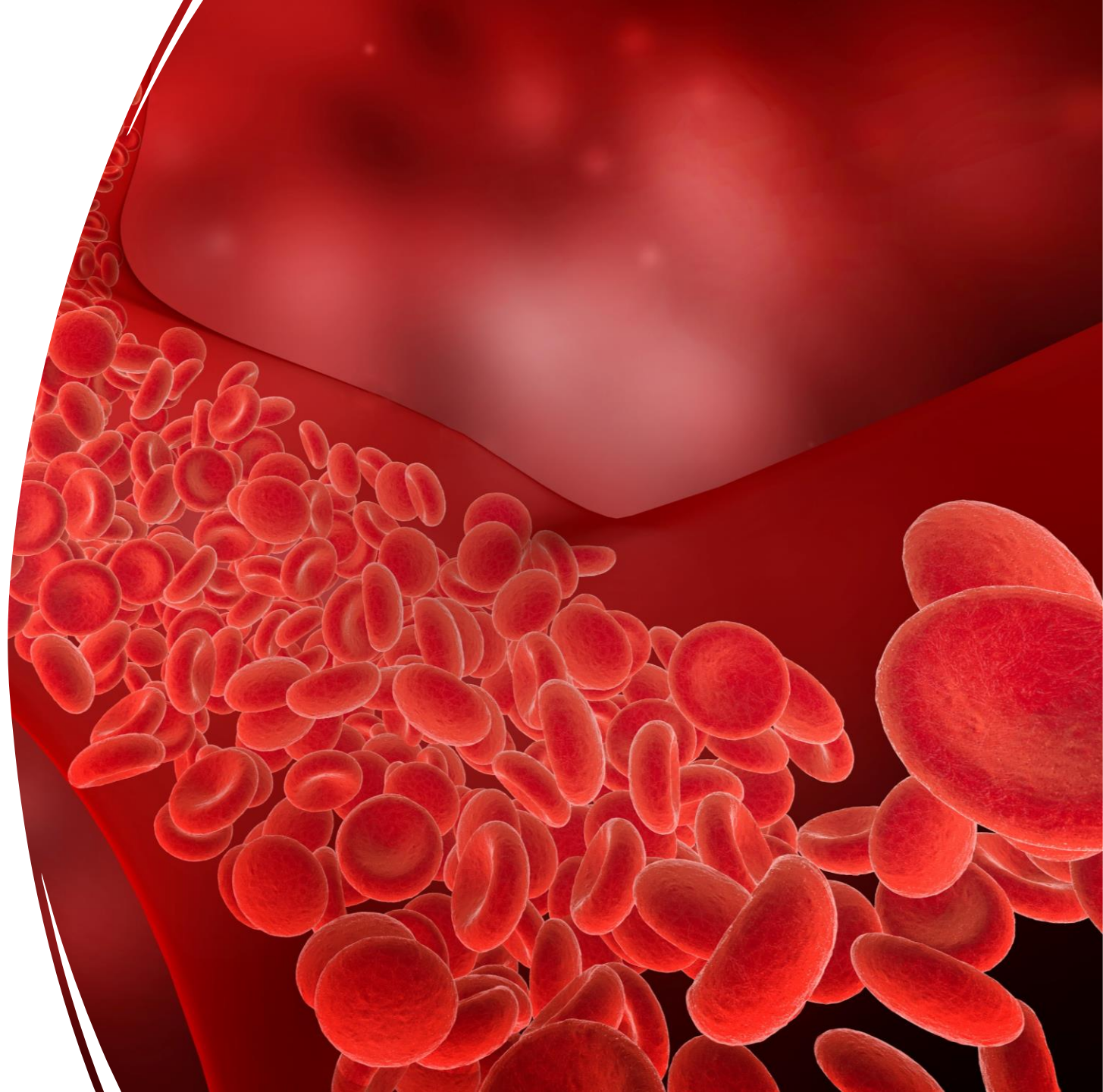
Augmentation du volume d'éjection systolique

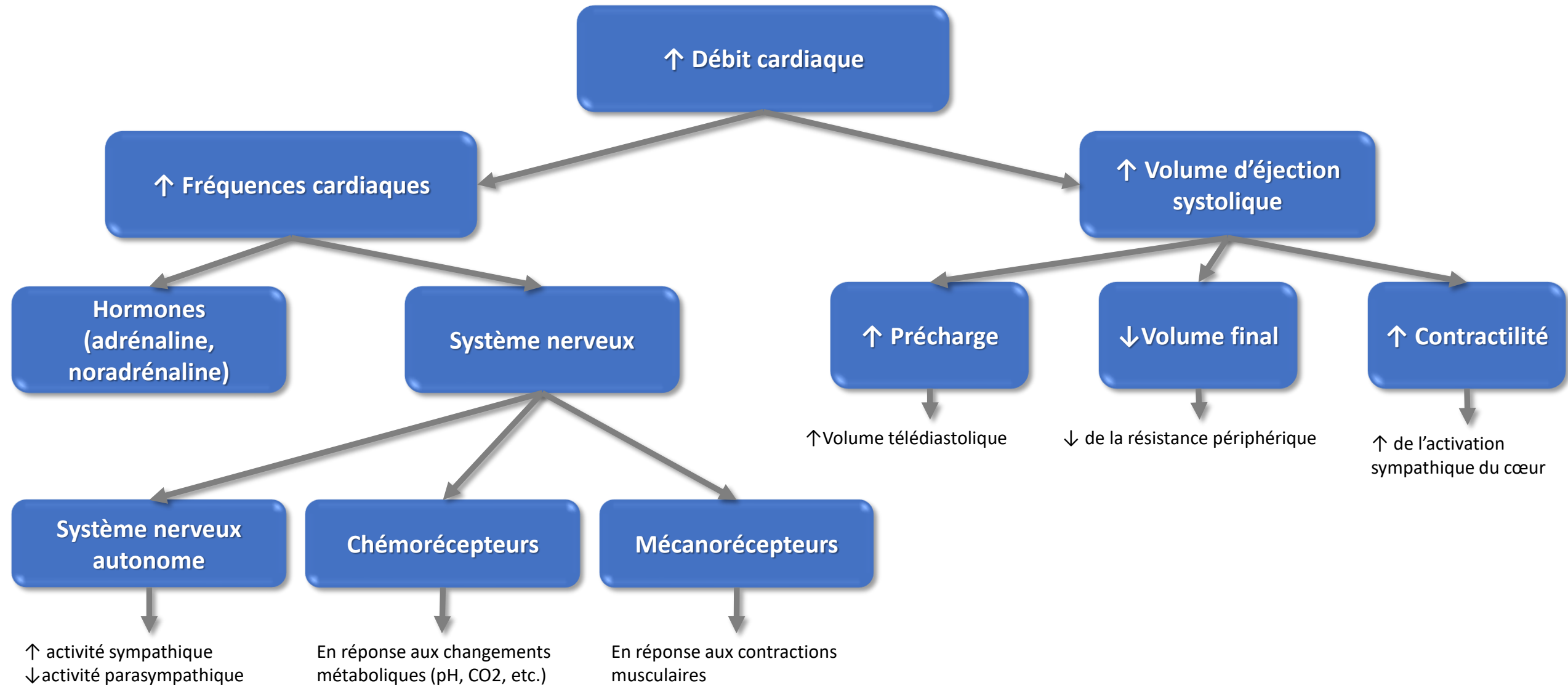
- Le VES augmente durant les efforts prolongés est fonction de:
 - Les changements de volume télédiastolique et télésystolique
 - La contractilité du muscle cardiaque
- Un retour veineux plus important augmente le volume télédiastolique stimulant le mécanisme de Frank-Starling augmentant la puissance des contractions musculaires
- Le volume télésystolique diminue en fonction de la diminution de la résistance périphérique, entraînant une plus grande quantité de sang éjectée
- Le VES tend à plafonner à des intensités sous-maximales de la capacité aérobie ($\sim 30-60\% \text{VO}_{2\text{max}}$) chez la majorité des gens (exception pour des athlètes d'endurance)
- Ce plateau est causé par la diminution du temps de remplissage engendré par l'augmentation de la fréquence des battements du cœur



Réponse vasculaire

- Lors d'un effort prolongé, on observe une redistribution du Q, une plus grande fraction étant vouée à la peau et aux muscles
- Lors d'efforts intenses, la quantité de sang destinée aux muscles et au cœur augmente de 4 et 20 fois respectivement
- La quantité de sang destinée à la peau augmente entre ~8 et 18 fois comparativement aux valeurs de repos (fonction de l'intensité de l'exercice et de la température)
- La pression artérielle moyenne (MAP) augmente en fonction de l'augmentation de la pression systolique causée par l'augmentation du Q
- La vasoconstriction des vaisseaux sanguins des tissus non impliqués dans l'effort permet de maintenir la pression artérielle





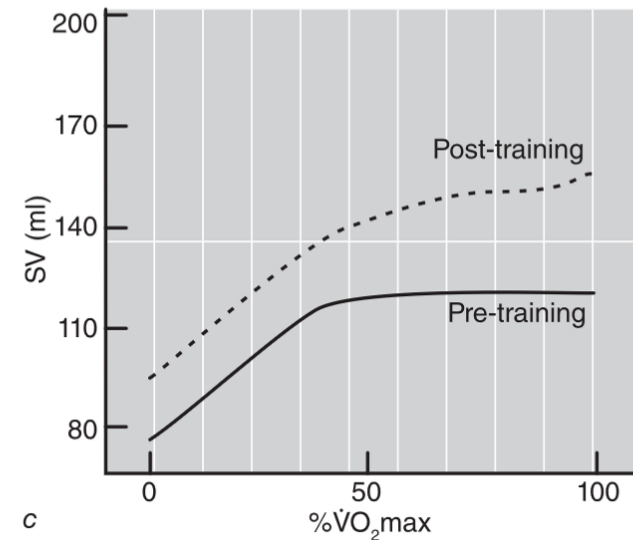
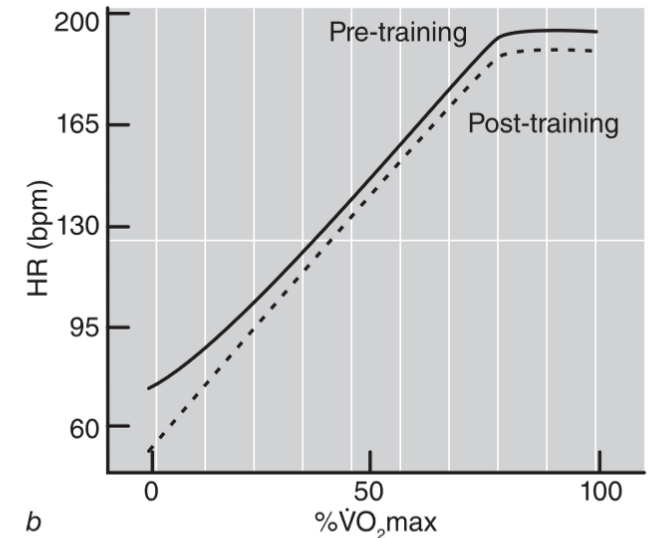
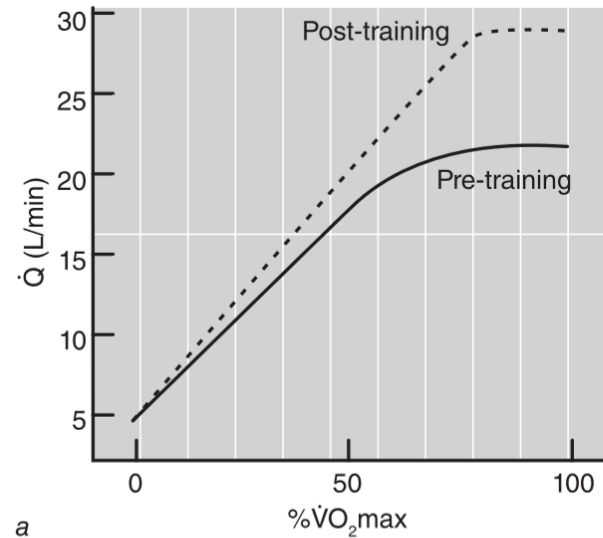
Adaptations chroniques: Volumes cardiaques

- L'entraînement aérobie répété génère des adaptations au niveau des dimensions des chambres du muscle cardiaque, plus particulièrement du ventricule gauche
- On observe des augmentation du volume ventriculaire gauche en télédiastole (fin de remplissage) et une augmentation de l'épaisseur de la paroi
- Cette hypertrophie ventriculaire fonctionnelle diffère de l'hypertrophie ventriculaire associée à des états pathologiques (hypertrophie non fonctionnelle)
 - Ces formes d'hypertrophie se manifestent par une augmentation de la paroi ventriculaire sans l'augmentation du volume de la cavité engendrant un ventricule plus rigide et moins efficace

	Groupe contrôle	Endurance	Force	Cardiomyopathies hypertrophique
Diamètre télédiastolique (mm)	49.6	53.7	52.1	45.0
Épaisseur de la paroi postérieure (mm)	8.8	10.3	11.0	14.0
Épaisseur relative de la paroi (épaisseur vs volume)	0.36	0.39	0.44	0.72

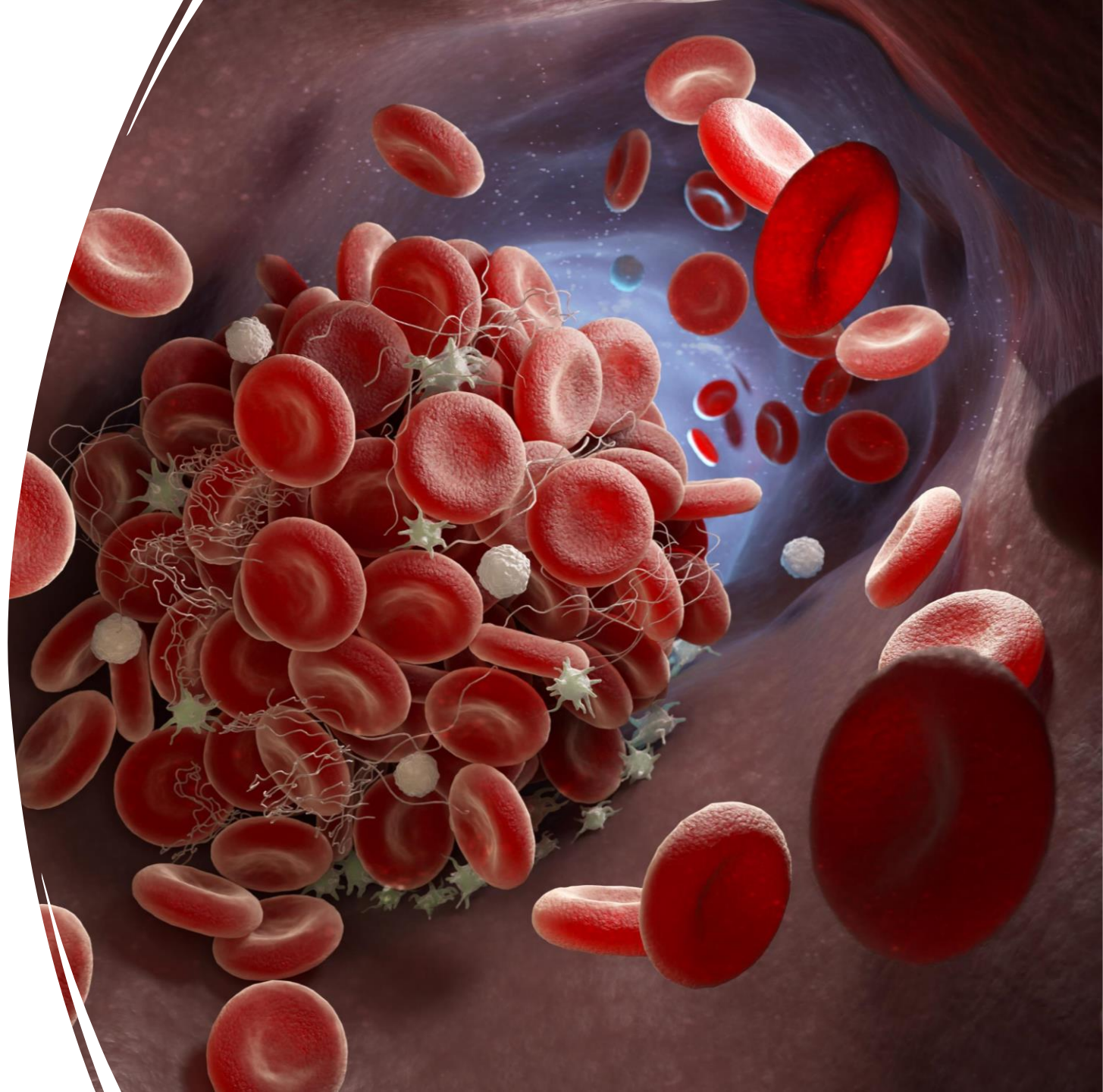
Adaptations chroniques: Débit cardiaque

- Le Q de repos demeure inchangé suivant une période d'entraînement en endurance
- Toutefois, les composantes du Q (FC et VES) sont modifiées où les FC diminuent et le VES augmente
- Le Q lors d'efforts sous-maximaux chez des participants entraînés demeure inchangé ou diminue légèrement
- Le Q lors d'efforts à haute intensité augmente chez les participants entraînés



Adaptations chroniques: Volume d'éjection systolique

- L'entraînement aérobie augmente les capacités d'éjection systolique à la suite des modifications du volume des compartiments cardiaques, de l'augmentation du volume sanguin et du retour veineux
- Lors d'efforts sous-maximaux et maximaux, un volume sanguin plus important entraîne un retour veineux plus important favorisant un meilleur remplissage télédiastolique
- Cette « précharge » plus importante favorise un plus grand VES
- On remarque que la phase de remplissage des ventricules est plus rapide chez les participants entraînés de même qu'une phase d'expulsion plus rapide, possiblement liée à une activation plus importante du mécanisme Franck-Starling



Adaptations chroniques: Volume sanguin

- On peut observer une augmentation de 20 à 25% du volume sanguin chez les participants entraînés (aérobie) comparativement à des participants non entraînés
- Cette adaptation semble indépendante de l'âge et du sexe et se manifeste principalement à la suite de l'augmentation du volume plasmatique et dans un effet moindre, de l'augmentation du volume des globules rouges (athlètes présentant une masse d'hémoglobine totale 20-25% plus élevée que les non entraînés)
- L'augmentation du volume plasmatique se produit sur quelques jours (1 à 4 jours) et plafonne après environ 7 jours
- Malgré l'augmentation du volume des globules rouges, on peut observer une diminution de la concentration de ces derniers à la suite de l'augmentation du volume sanguin (on réfère alors à de l'anémie sportive)



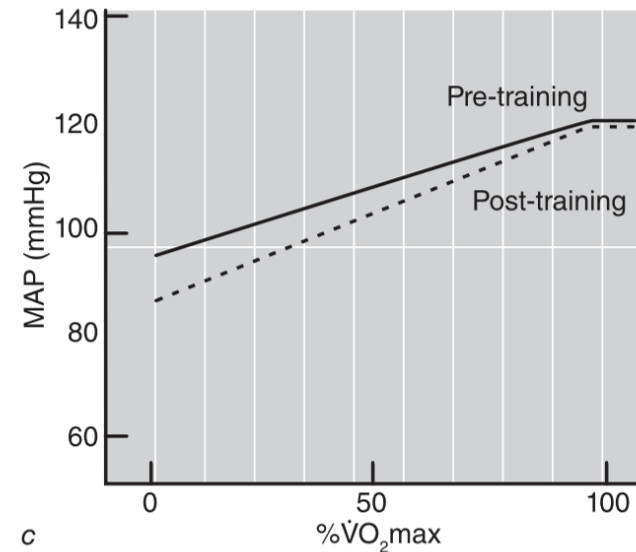
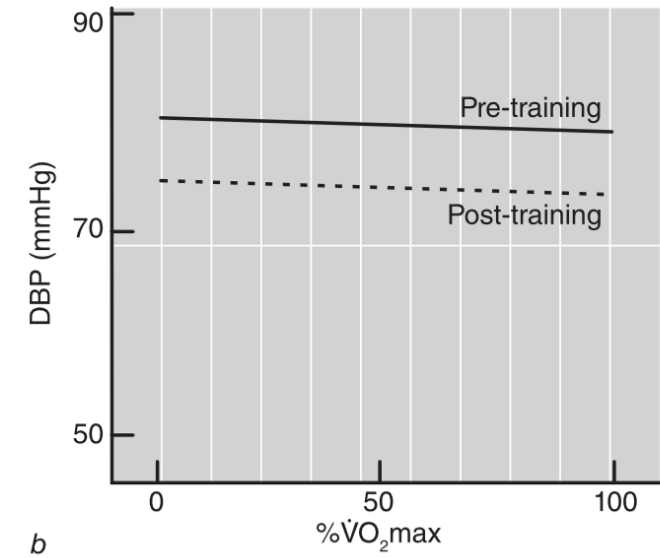
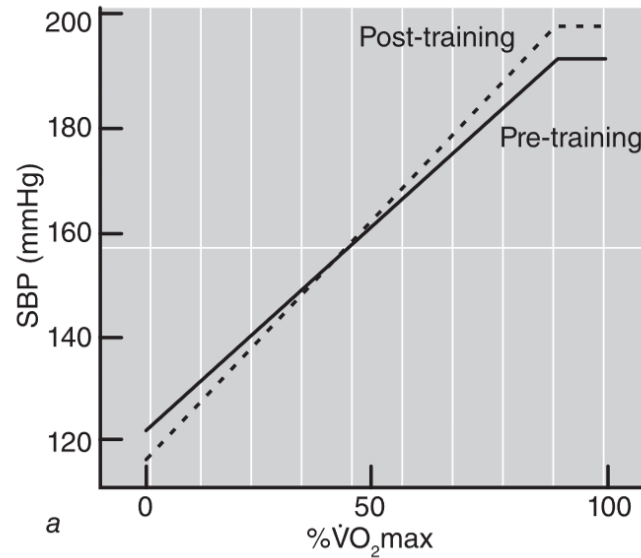
Adaptations chroniques: Fréquences cardiaques

- Une des adaptations les plus souvent observées se situe au niveau de la réduction des fréquences cardiaques au repos et pour des intensités sous-maximales d'effort
- Cette adaptation pourrait être causée en partie par une plus grande contribution de la division parasympathique du système nerveux autonome (au repos et à l'effort) de même qu'une meilleure capacité de transport et d'extraction de l'O₂ (nécessite une moins grande quantité de sang pour permettre le même travail)



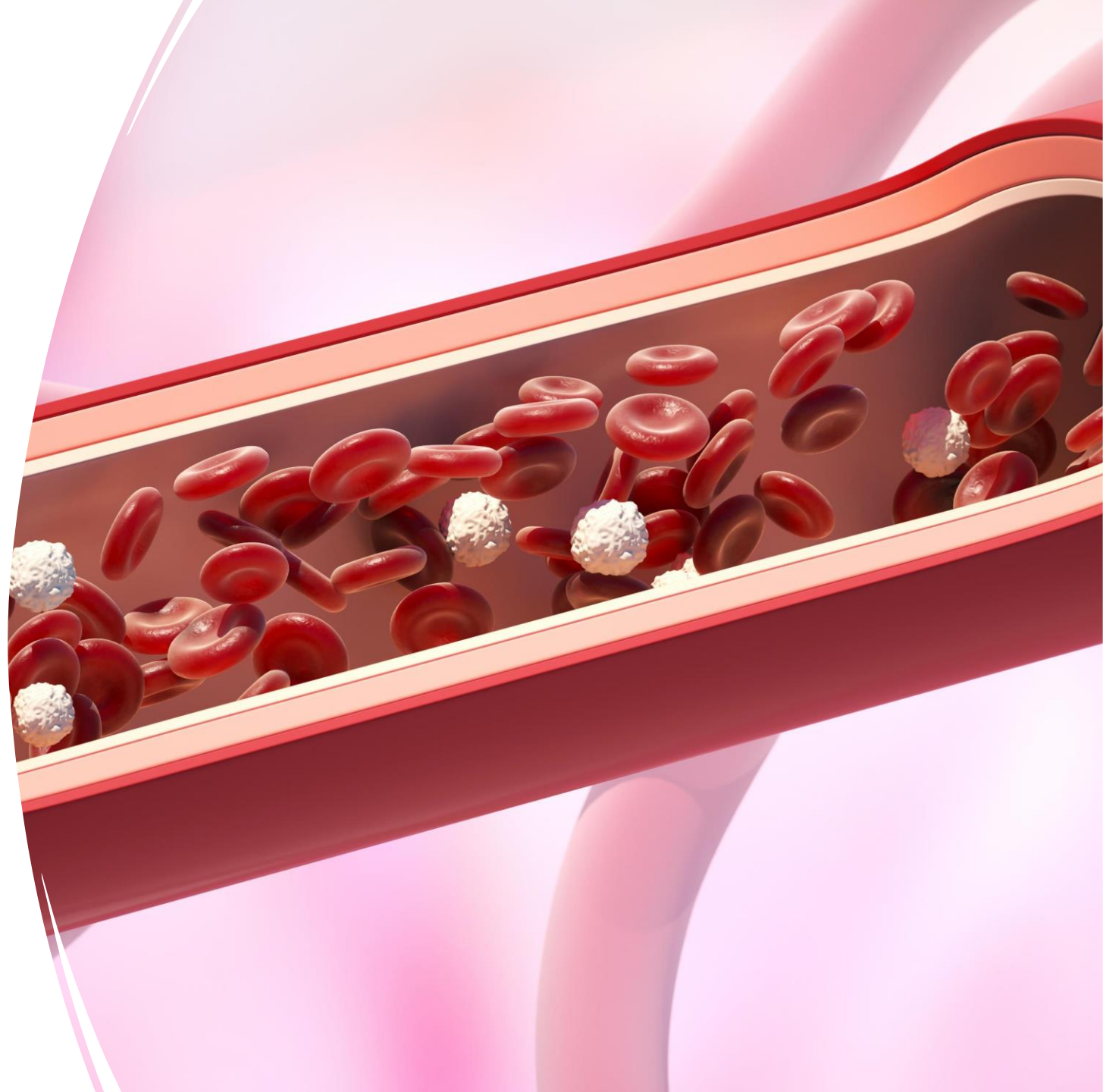
Adaptations chroniques: Pression artérielle

- L'entraînement de nature aérobie génère une faible réduction (~4mmHg) de la pression artérielle de repos (systolique et diastolique) chez des individus asymptomatiques
- Les effets sont plus prononcés chez les personnes présentant une pression artérielle élevée
 - Réduction de la PASys de ~5-7 mmHg et la PADia de ~2-3 mmHg
- Les effets peuvent perdurer pendant plusieurs heures (~12-24h)



Adaptations chroniques: Microcirculation musculaire

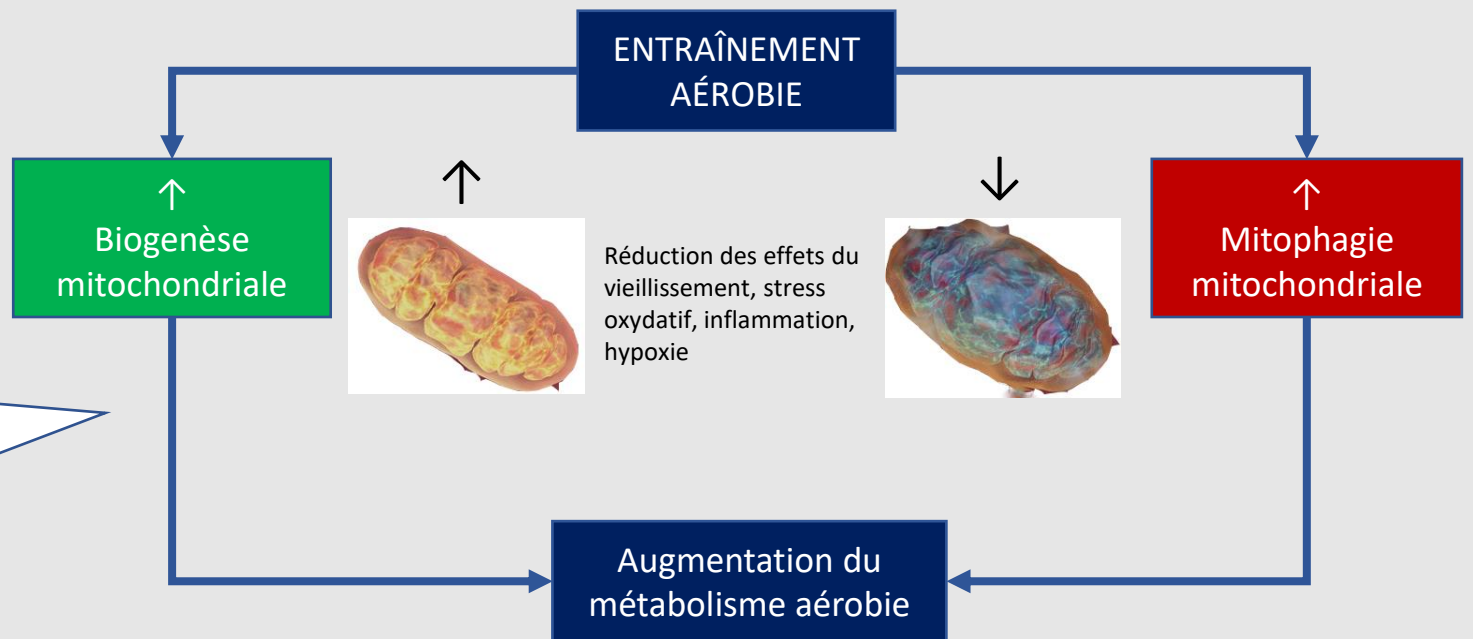
- La circulation sanguine musculaire demeure inchangée au repos (athlète vs non athlète)
- Lors d'efforts d'intensité sous-maximale ($<75\% \text{VO}_{2\text{max}}$), on observe une réduction ou encore aucun changement
 - Possiblement en lien avec une plus grande capacité d'extraction de l' O_2
- Lors d'efforts plus intenses, on peut observer une meilleure capacité de distribution du sang à au sein des tissus actifs comme le muscle



Adaptations chroniques: mitochondries

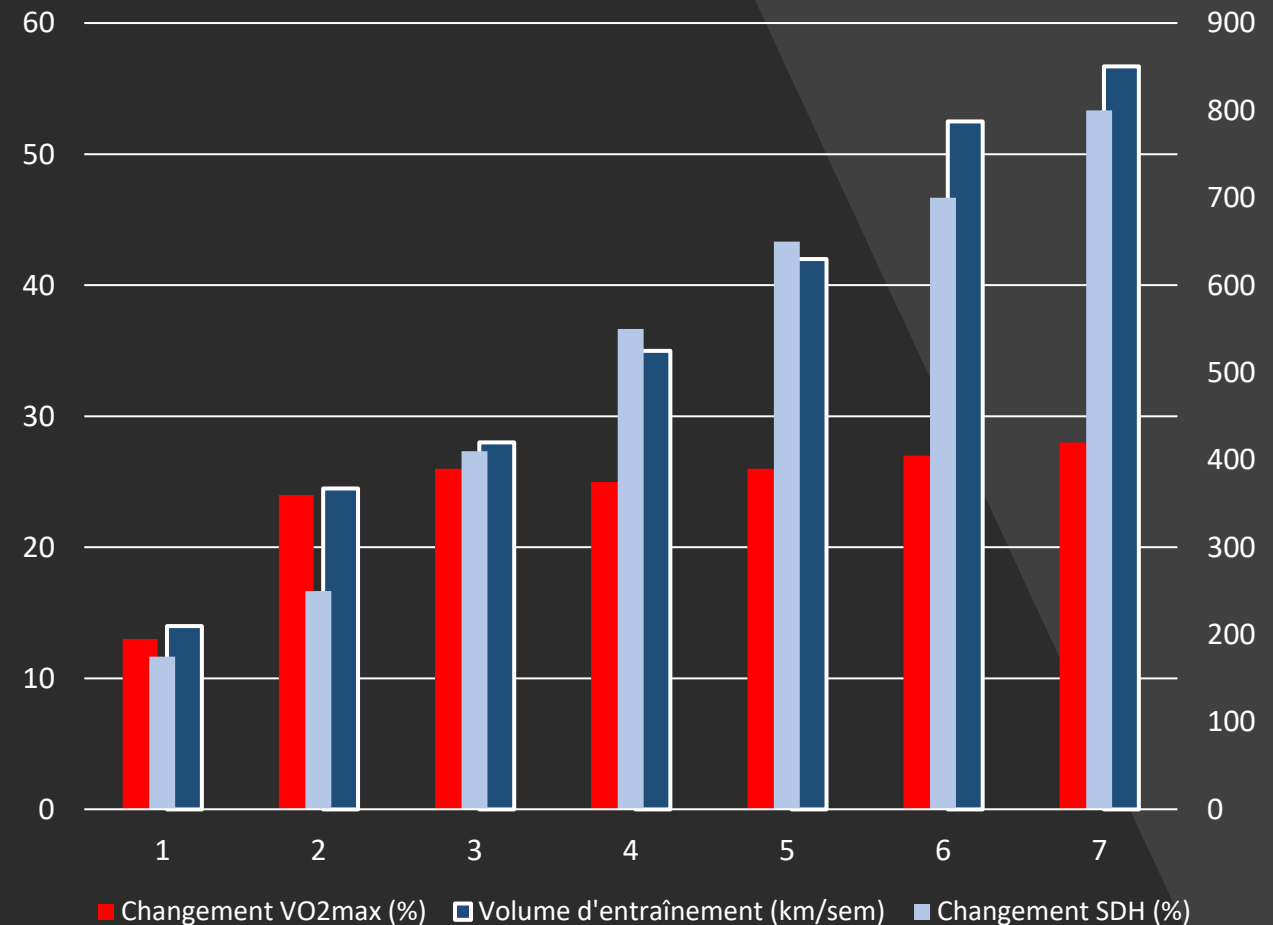
- L'entraînement aérobie permet d'améliorer la capacité des mitochondries de renouveler l'ATP
- On observe une augmentation du volume des mitochondries ainsi que de leur quantité
- Chez le rat, le nombre de mitochondries a augmenté de ~15% à la suite d'un entraînement de 27 semaines
- Le volume des mitochondries a également subi une augmentation de ~35% pour la même période
- L'ampleur des changements semblent davantage relié au volume d'entraînement (toutefois, il est rare d'observer une analyse tenant compte de la sollicitation)
- L'entraînement aérobie permet d'effectuer « un ménage » au sein des mitochondries en accélérant le processus de dégradation des mitochondries moins performantes au profit de la mitogenèse de nouvelles mitochondries plus performantes

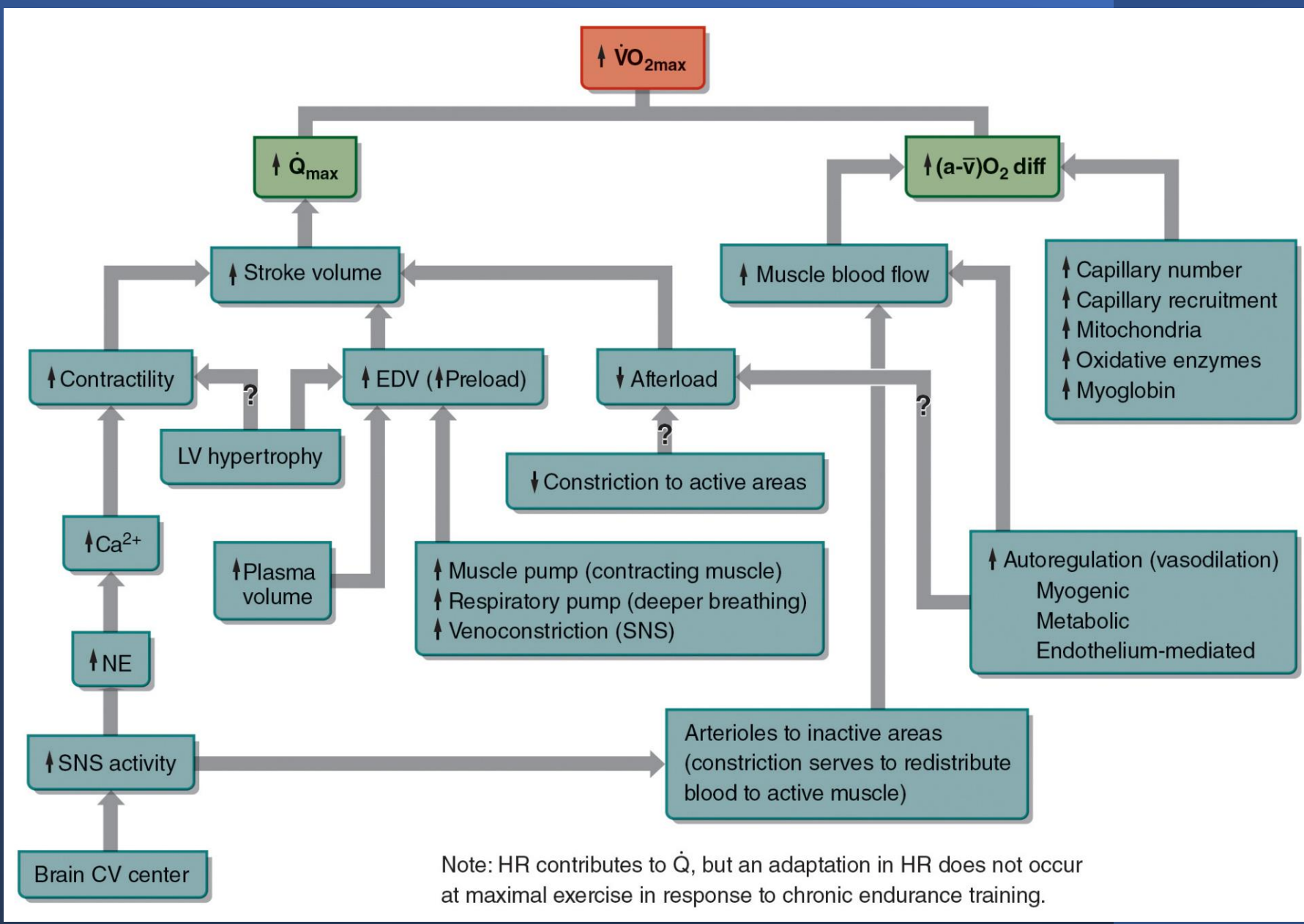
L'entraînement aérobie stimule la création de nouvelles mitochondries et le « recyclage » de mitochondries moins fonctionnelles
(remodelage mitochondrial par fusion et fission)



Adaptations chroniques: Enzymes oxydatives

- L'utilisation d'une stimulation répétée comme l'entraînement aérobie ne fait pas que modifier les dimensions et le nombre de mitochondries
- On observe également une amélioration des capacités des mitochondries par l'intermédiaire d'une augmentation de l'activité de différentes enzymes clés qui régulent le métabolisme aérobie et le renouvellement de l'ATP
- Toutefois, les enzymes ne sont pas les seules responsables de la capacité aérobie comme le démontre le plateau observé dans la capacité aérobie malgré une augmentation de la concentration de certaines enzymes au 3^e mois d'entraînement





Note: HR contributes to \dot{Q} , but an adaptation in HR does not occur at maximal exercise in response to chronic endurance training.

TABLE 11.4 Maximal Oxygen Uptake Values ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) for Nonathletes and Athletes

Group or sport	Age group (years)	Males	Females
Nonathletes	10-19	47-56	38-46
	20-29	43-52	33-42
	30-39	39-48	30-38
	40-49	36-44	26-35
	50-59	34-41	24-33
	60-69	31-38	22-30
	70-79	28-35	20-27
Baseball and softball	18-32	48-56	52-57
Basketball	18-30	40-60	43-60
Bicycling	18-26	62-74	47-57
Canoeing	22-28	55-67	48-52
Football	20-36	42-60	
Gymnastics	18-22	52-58	36-50
Ice hockey	10-30	50-63	
Jockey	20-40	50-60	
Orienteering	20-60	47-53	46-60
Racquetball	20-35	55-62	50-60
Rowing	20-35	60-72	58-65
Skiing, alpine	18-30	57-68	50-55
Skiing, Nordic	20-28	65-94	60-75
Ski jumping	18-24	58-63	
Soccer	22-28	54-64	50-60
Speed skating	18-24	56-73	44-55
Swimming	10-25	50-70	40-60
Track and field, discus	22-30	42-55	*
Track and field, running	18-39	60-85	50-75
	40-75	40-60	35-60
Track and field, shot put	22-30	40-46	*
Volleyball	18-22		40-56
Weightlifting	20-30	38-52	*
Wrestling	20-30	52-65	

*Data not available.

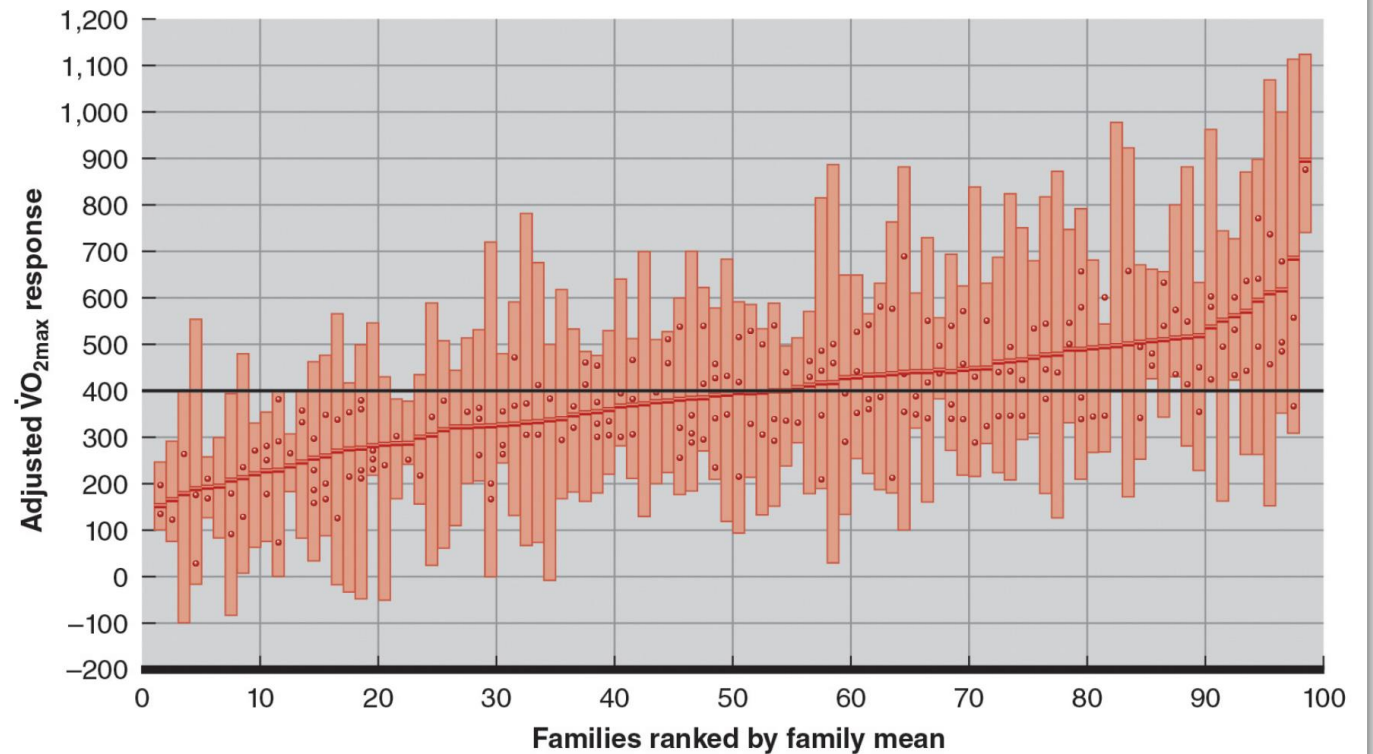
TABLE 11.3 Typical Effects of Endurance Training in a Previously Inactive Man, Contrasted with Values for a Male World-Class Endurance Athlete

Variables	Pretraining, sedentary male	Posttraining, sedentary male	World-class endurance athlete
Cardiovascular			
HR _{rest} (beats/min)	75	65	45
HR _{max} (beats/min)	185	183	174
SV _{rest} (ml/beat)	60	70	100
SV _{max} (ml/beat)	120	140	200
Q̇ at rest (L/min)	4.5	4.5	4.5
Q̇ _{max} (L/min)	22.2	25.6	34.8
Heart volume (ml)	750	820	1,200
Blood volume (L)	4.7	5.1	6.0
Systolic BP at rest (mmHg)	135	130	120
Systolic BP _{max} (mmHg)	200	210	220
Diastolic BP at rest (mmHg)	78	76	65
Diastolic BP _{max} (mmHg)	82	80	65
Respiratory			
V _E at rest (L/min)	7	6	6
V _{E max} (L/min)	110	135	195
TV at rest (L)	0.5	0.5	0.5
TV _{max} (L)	2.75	3.00	3.90
VC (L)	5.8	6.0	6.2
RV (L)	1.4	1.2	1.2
Metabolic			
(a- \bar{v})O ₂ diff at rest (ml/100 ml)	6.0	6.0	6.0
(a- \bar{v})O ₂ diff max (ml/100 ml)	14.5	15.0	16.0
VO ₂ at rest (ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹)	3.5	3.5	3.5
VO _{2max} (ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹)	40.7	49.9	81.9
Blood lactate at rest (mmol/L)	1	1	1
Blood lactate max (mmol/L)	7.5	8.5	9.0
Body composition			
Weight (kg)	79	77	68
Fat weight (kg)	12.6	9.6	5.1
Fat-free weight (kg)	66.4	67.4	62.9
Fat (%)	16.0	12.5	7.5

Note. HR = heart rate; SV = stroke volume; Q̇ = cardiac output; BP = blood pressure; V_E = ventilation; TV = tidal volume; VC = vital capacity; RV = residual volume; (a- \bar{v})O₂ diff = arterial–mixed venous oxygen difference; VO₂ = oxygen consumption.

Variabilité des adaptations

- La figure suivante représente la variabilité dans l'amélioration de la capacité aérobie à la suite d'un entraînement de 20 semaines réalisé par des familles
- Les données pour chaque famille sont comprises dans les histogrammes et les valeurs individuelles sont représentées par un point à l'intérieur de l'histogramme
- L'augmentation moyenne est de 393 mL/min



Si vous devez régulièrement fuir des zombies...

- Dès les premiers jours, vous observerez une amélioration de vos capacités principalement à la suite de l'augmentation du volume sanguin
- Puis, au fil des semaines, et des fuites répétées, vous bénéficierez d'adaptations structurelles (ventricules) et fonctionnelles (Q , extraction O_2 , efficacité)
- L'ensemble de ces adaptations se reflètera par une capacité à courir plus vite et à courir plus longtemps de même que par une plus grande capacité à maintenir un effort sous-maximal longtemps
- Toutefois, si vous modifiez votre mode de locomotion, il est possible que vos performances en soient affectées (perte d'efficacité) sans que votre capacité aérobie ne le soit
 - Les adaptations cardiovasculaires ont un aspect général, mais sont limitées par des éléments spécifiques (nage, course, vélo, etc.)



