



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

University of Algiers 3

جامعة الجزائر 3

Sport and Physical Education Institute

معهد التربية البدنية والرياضية

مطبوعة محاضرات مقياس فيزيولوجية الجهد العضلي

المستوى: طلبة السنة أولى ماستر، تخصص تدريب

إعداد الأستاذة: د. فتحي مونية

البريد الإلكتروني المهني:

السنة الجامعية: 2020 / 2021



1- معلومات عامة عن المقياس:

عنوان الوحدة: أساسية

المقياس: فيزيولوجية الجهد العضلي

نوع الدرس: أعمال موجهة محاضرة سداسي سنوي

المعامل: 2 الرصيد: 3

المدة الزمنية: 24 أسبوع -72 ساعة

الفئة المستهدفة: السنة الأولى ماستر تخصص تدريب

أهداف التعلم

- أهم المعارف النظرية المرتبطة بتخصص فيزيولوجية الجهد العضلي.
- الرفع من المستوى المعرفي للطالب في التخصص، وربطه بالتخصص.
- Les bases du mouvement
- Les bases énergétiques de l'exercice musculaire
- La récupération et son effet sur la performance
- L'influence de l'environnement sur la performance (température et altitude)
- Adaptation à l'exercice en fonction de l'âge et du sexe

المعارف المسبقة المطلوبة:

✓ معرفة بعض المفاهيم والمصطلحات علم التشريح والفيزيولوجية

✓ معرفة أجهزة الرئيسية وأهم وظائفها وتكيفها في الممارسة الرياضية.

طريقة التقييم: المتابعة الدائمة والامتحانات

-كيفية تقييم التعلم: يكون التقييم بطريقتين:

1-تقييم كتابي اخر السداسي والذي يحوي كل ما تم التطرق اليه و مناقشته اثناء المحاضرة إضافة الى الموارد التي

طلب منكم الاطلاع عليها والتي تمت مناقشتها. ويتضمن التقييم أسئلة التحليل والتركيب والفهم والاستنباط. والعلامة

تكون 50٪ من المعدل العام.

2-التقييم المستمر و الذي يقوم به الأستاذ المكلف بالأعمال التوجيهية. و العلامة تكون 50 ٪ من المعدل العام.

المعدل النهائي للنجاح يكون اكثر او يساوي 10 من 20

ملاحظة: اذا كان المقياس لا يحتوي على اعمال موجهة او اعمال تطبيقية، تحتسب المحاضرة فقط 100%.

2-معلومات عن الأستاذ

الجامعة: الجزائر 3-دالي ابراهيم

المعهد: التربية البدنية والرياضية

الأستاذة: د فتني مونية



الرتبة: أستاذ محاضر « أ » (MCA)

الاتصال عبر البريد الإلكتروني: fetni.mounia.nouri@gmail.com

البريد الإلكتروني المهني للأستاذ:

3-محتوى المقياس

المحاضرة الأولى : Introduction à la physiologie du sport

المحاضرة الثانية: Les sources et la resynthèse de l'énergie

المحاضرة الثالثة: Métabolisme anaérobie alactique

المحاضرة الرابعة : Evaluation de la puissance du métabolisme *anaérobie alactique*

المحاضرة الخامسة : Métabolisme anaérobie lactique(glycolyse anaérobie)

المحاضرة السادسة Evaluation du métabolisme du métabolisme *anaérobie lactique*

المحاضرة السابعة: Métabolisme oxydatif(aérobie)

المحاضرة الثامنة : Evaluation du métabolisme aérobie et détermination de la

consommation maximale d'oxygène(Vo2max)

المحاضرة التاسعة: Typologie musculaire

المحاضرة العاشرة: Adaptation du système cardiovasculaire à l'entraînement

المحاضرة الحادية عشر: Adaptation du système respiratoire à l'exercice

المحاضرة الثانية عشر: Adaptation à l'exercice physique en fonction de l'accroissance

المحاضرة الثالث عشر: L'effet de l'altitude sur l'organisme : entraînement et stage

4-قائمة المراجع

-الكتب باللغة الاجنبية:

1. JACK H. WILMORE, DAVID L. COSTILL, LARRY W KENNEY, *Physiologie du sport et de l'exercice*, 6^{ème} édition
2. MATVEIEV LP, *Les bases de l'entraînement*. Ed Vigot, paris, 1983
3. MATVEIEV LP., *Les aspects fondamentaux de l'entraînement*. Ed Vigot, paris, 1983
4. WEINECK. J., *la biologie du sport*, Edition Vigot 1998
5. VASSILIS KLISSOURAS, ODYSSEUS KLISSOURAS, ACHILLES KLISSOURAS, PETER JENOURE, *Les Bases De La Physiologie Du Sport, 64 Concepts Clés*, 2017
6. W.D.MC ARDLE, F.KATCH, V.KATCH, *Physiologie De L'activité Physique*, Edition Vigot, 1989
7. GUILLAUME MILLET, STEPHANE PERREY, *Physiologie De L'exercice Musculaire*
8. AURELIEN BROUSSAL-DERVAL ET OLIVIER BOLLIET, *Les Tests De Terrain*, 4TRAINER édition
9. GEORGES CAZORLA, *Evaluation des capacités physiologiques et physiques*, 2014
10. JACK H. WILMORE, DAVID L. COSTILL, LARRY W KENNEY, *Physiologie du sport et de l'exercice*, 6^{ème} édition



Typologie musculaire

- I- Introduction
- II- Caractéristiques des fibres rapides et des fibres lentes
- III- Répartition des fibres
- IV- L'impact de la myotypologie sur l'entraînement
- V- Effet de l'entraînement sur la typologie musculaire

I- Introduction

Le muscle est un organe complexe qui n'est pas uniforme. Pour pouvoir effectuer des gestes rapides ou pour bouger pendant des heures, le muscle est muni de différents types de fibres qui sont les cellules musculaires.

Les fibres musculaires ne sont pas toutes identiques au sein d'un même muscle. Le muscle n'est donc pas un tissu homogène puisqu'il est constitué de fibres dont les propriétés mécaniques, enzymatiques et énergétiques sont différentes.

On distingue en général deux ou trois principaux types de fibres :

Nom principal	fibres à contraction lente		fibres à contraction rapide	
Autres terminologies	fibres lentes		fibres rapides	
	ST pour <i>slow twitch</i> (= secousse lente)		FT pour <i>fast twitch</i> (= secousse rapide)	
	fibres de type I		fibres de type IIa	fibres de type IIb
	SO pour <i>slow oxydative</i>		FOG pour <i>fast oxydative glycolytic</i>	FG pour <i>fast glycolytic</i>
	fibres rouges		fibres intermédiaires	fibres blanches

Principales terminologies des types de fibres musculaires, dans "physiologie de l'exercice musculaire", Guillaume MILLET, P53



II- Caractéristiques des fibres rapides et des fibres lentes

C'est la vitesse de contraction qui différencie les fibres ST et FT, d'où leur nom, celle-ci provient essentiellement de différentes formes de myosine ATPase. (La myosine ATPase est l'enzyme qui catalyse la dégradation de l'ATP et permet la libération d'énergie nécessaire à la contraction ou au relâchement).

Les fibres ST possèdent une forme lente de myosine ATPase, les fibres FT possèdent une forme rapide de myosine ATPase.

La plus grande résistance à la fatigue des fibres lentes s'explique par de grandes capacités à produire de l'énergie en utilisant l'oxygène. Les éléments qui participent à ces capacités sont : **le réseau capillaire** pour apporter l'O₂ à proximité de la fibre, **la concentration en myoglobine** pour le transporter à l'intérieur de la fibre, **le nombre de mitochondries** pour l'utiliser, le faible diamètre (qui implique une distance courte à parcourir par l'O₂ pour aller jusqu' aux mitochondries) et **l'équipement enzymatique oxydatif**.

Les fibres lentes possèdent davantage de glycogène en réserve ainsi que les mitochondries. On peut dire que ce type de fibre a les atouts d'une contraction peu intense mais pérenne,

Le réticulum sarcoplasmique des fibres rapides est plus développé que dans les fibres lentes, ce qui facilite à leur niveau la libération du calcium nécessaire à la contraction musculaire,

L'allure des secousses entre fibres lentes et rapides peut s'expliquer par des différences physiologiques. Les fibres rapides ont de grandes vitesses de raccourcissement et de relaxation en raison d'un réticulum sarcoplasmique volumineux ce qui conditionne une vitesse élevée de largage et de pompage du Ca²⁺.

Les fibres rapides ont une vitesse de contraction 5 à 6 fois plus rapide que les fibres lentes grâce au volume élevé du réticulum sarcoplasmique

Les fibres lentes ayant un diamètre plus petit, elles sont moins fortes en valeur absolu si on les compare aux fibres rapides. Les vitesses maximales de raccourcissement des fibres rapides étant très élevés il est en revanche indéniable que la puissance de ces fibres est supérieure à celles des fibres lentes.



La contrepartie de cette puissance élevée est double : une faible résistance à la fatigue et un mauvais rendement énergétique : pour une puissance donnée, la consommation d'ATP est en effet supérieure pour les fibres rapides.

Caractéristiques	Fibres à contraction lente (type I)	Fibres à contraction intermédiaire (type IIa)	Fibres à contraction rapide (type IIb)
Diamètre	petit	intermédiaire	grand
Épaisseur de la ligne Z	épaisse	intermédiaire	étroite
Contenu en glycogène	modéré	modéré à élevé	modéré à élevé
Résistance à la fatigue	élevée	intermédiaire	faible
Temps de contraction	< 30 ms	30-100 ms	100 ms et plus
Tétanos parfait	20 par seconde	50 par seconde	100 par seconde
Nombre de capillaires par fibre	beaucoup	beaucoup	peu
Contenu en myoglobine	élevé	élevé	faible
Rapidité de la contraction	lente	rapide	rapide
Activité ATPasique de la myofibrille	basse	élevée	élevée
Activité des enzymes glycolytiques	basse	élevée	élevée
Activité des enzymes mitochondriales	élevée	basse	basse
Système énergétique prédominant	aérobie	combinaison	anaérobie

Les caractéristiques des types de fibres musculaires chez l'homme, dans " physiologie et méthodologie d'entraînement ", Véronique BILLAT, P64

III- Répartition des fibres

La différenciation en fibres musculaires apparaît précocement (les premières années de la vie).

Les études montrent que la composition en fibres musculaires est génétiquement déterminée. Variant très peu de l'enfance à l'âge adulte.

Avec l'avancement en âge nos muscles tendent à perdre des fibres rapides ce qui augmente le pourcentage des fibres lentes



Les pourcentages des fibres ne sont pas les mêmes dans tous les muscles du corps. Les muscles des bras et des jambes d'une même personne ont en général des compositions semblables en fibres musculaires

La répartition de fibres dans un muscle peut varier selon la fonction de ce dernier, certains muscles possèdent plus de fibres blanches que les fibres rouges, (muscles dits **phasiques**) et à l'opposé les muscles **posturaux** appelés parfois des muscles **antigravitaires** possèdent plus de fibres rouges que de fibres blanches, Certains muscles ont une composition assez bien partagée entre les deux principaux types de fibres

Pour un même muscle, la répartition entre les deux types de fibres dépend également du sport pratiqué, sans surprise, en effectuant des biopsies musculaires, les chercheurs avaient en effet trouvé que les sprinters, les haltérophiles et autres athlètes fournissant un effort explosif présentaient de fortes proportions de fibres rapides. En toute logique, ils ont supposé que cette forte proportion provient du type d'entraînement suivi par l'athlète.

Si ces athlètes possédaient plus de fibres rapides, c'est parce qu'ils étaient nés avec. Ces individus doués d'une force plus importante avaient été naturellement attirés par ce type de sport.

Les scientifiques ont pu se pencher davantage sur la complexité du développement musculaire et ils ont fini par trouver que la génétique jouait un rôle bien plus important qu'on ne le pensait au début.

En clair : vous pouvez toujours transformer votre corps mais du point de vue de la répartition des fibres, vous n'obtiendrez jamais mieux que ce que vous possédez. Vous pouvez augmenter la taille des fibres rapides, mais les scientifiques ont découvert qu'il n'existait au monde aucune sorte d'entraînement pouvant permettre de modifier la répartition des fibres blanches et rouges.



IV- L'impact de la myotypologie sur l'entraînement

La myotopologie revêt donc une importance capitale pour l'orientation de son entraînement en force. Une personne qui a un profil "lent" devra avoir des recommandations différentes qu'une personne au profil "rapide".

Le sport influencera également ses recommandations : Si on fait un sport d'endurance, alors on privilégiera le développement et la synchronisation des fibres oxydatives. Pour les sports intermittents, plutôt les fibres à capacité mixtes (oxydative + glycolytique). Pour les sports de vitesse, plutôt les fibres à capacité glycolytique.

L'impact de la typologie musculaire et la volonté de développer celle-ci aura différents impacts sur l'entraînement

- Le nombre de répétitions : Il sera peut-être préférable de demander plus de répétitions à une personne endurante qu'à une personne rapide, pour une même charge,
- La charge déplacée : Ce point est lié au point précédent. Par exemple, Il est probable que sur un travail de Force maximale on pourrait apporter une charge particulièrement importante pour un athlète pratiquant un sport d'endurance par rapport à une personne pratiquant plutôt une discipline faisant appel surtout à l'explosivité/vitesse, pour un même nombre de répétitions.
- L'objectif de la séance : Par conséquent, une séance de type force max ou d'hypertrophie ne sera pas gérer de la même manière d'un point de vue générale (nombre de séries, de répétitions, d'exercices et charge/tonnage de la séance).

Et pour connaître ou évaluer votre myotypologie de manière directe : Prenez votre 85% du RM et faites le maximum de répétitions. Le nombre de répétitions vous indiquera plus ou moins votre profil :

- 1 à 4 répétitions : forte proportion de fibres rapides
- 5 répétitions : profil intermédiaire
- 6 répétitions et plus : forte proportion de fibres lentes.



V- Effet de l'entraînement sur la typologie musculaire

Le muscle est l'élément central de tout exercices physiques (marcher, sauter, lancer, porter, etc.).

L'activité physique joue un rôle capital dans la construction et la définition des différentes masses musculaires.

Elle agit directement sur la typologie, la taille et le nombre de fibres musculaires.

Le niveau d'activité (faible, modérée, intense), la nature des exercices (force, résistance, explosivité), le déroulement (nombre de répétitions) sollicitent différemment les fibres musculaires : les fibres musculaires recrutées lors d'un sprint (fibres rapides) n'ont pas les mêmes caractéristiques fonctionnelles que celles utilisées lors d'un marathon.

Il a été bien démontré que les structures des muscles d'athlètes très entraînés diffèrent de celles de sujets sédentaires.

Les athlètes endurants présentent :

- Une proportion élevée de fibres lentes de type I dans les muscles locomoteurs,
- Un réseau capillaire plus dense. (Schantz, 1986, Coggan 1992, Lambert 2005, Rossiter 2005).
- Une augmentation de la densité mitochondriale qui est bien corrélée avec l'amélioration de la consommation maximale d'oxygène.

L'entraînement en endurance induit une amélioration de la convection de l'oxygène vers les muscles.

L'activité physique, sous forme d'entraînement d'endurance est reconnue comme un moyen efficace pour augmenter la défense antioxydante, pour réduire les dommages oxydatifs au niveau de l'ADN (Hollander et coll. 2000) et pour élever le contenu mitochondrial (Holloszy et coll. 1970).

Les athlètes entraînés dans des sports de force présentent :

- Une augmentation de la surface des fibres musculaires et dans certains types d'activités, on a pu relever ;
- Une augmentation de la proportion de fibres de type rapides.

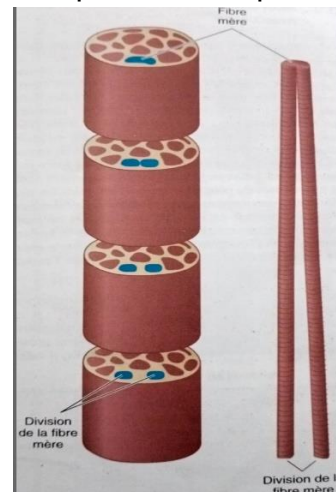
L'entraînement en force développe l'hypertrophie musculaire. Il améliore la force mais peut aussi participer, dans un contexte de blessure, à la restitution du muscle



fonctionnel. En effet, l'activité physique stimule les facteurs myogéniques impliqués dans la régénération musculaire (Bamman et coll. 2004).

La propriété de plasticité du muscle squelettique le rend très sensible aux charges mécaniques. C'est un tissu dynamique qui a une grande capacité d'adaptation anatomique et fonctionnelle,

Les deux aspects de cette adaptation est force et diamètre, théoriquement une augmentation de la taille musculaire peut être due à une augmentation de nombre de fibre ou de tissu conjonctif séparant chaque fibre musculaire (McDougall, 1992)



La surface des fibres musculaires

Un entrainement de la force soutenu entraine une augmentation de la surface à la fois des fibres de type I et II, avec une augmentation plus marquée pour les fibres rapides

L'importance de cette augmentation varie considérablement et dépend du type d'entrainement

Conversion des types de fibres avec l'entrainement

Les chercheurs restent divisés sur la question, Le fait que la proportion des fibres I et II ne change pas sous l'effet de l'entrainement

Plusieurs études rapportent que l'entrainement en endurance ne transforme pas les fibres rapides en fibres lentes (Gollnick, 1985, Hppeler, 1986) mais le muscle se modifie par l'augmentation de son activité

Modification du tissu conjonctif et des capillaires

La proportion du tissu conjonctif (endo, péri et épimysium) séparant les fibres musculaires représente environ 13% du volume musculaire total, c'est pourquoi une augmentation du volume musculaire due à entrainement de la force s'accompagne de celle des tissus conjonctifs.

Au contraire lors d'un entrainement en endurance on observe une augmentation de la densité capillaire



Modification de l'ultrastructure du muscle

L'augmentation de la surface des fibres est liée à celle de la surface et du nombre de myofibrilles. Avec l'entraînement, des myofilaments d'actine et de myosine s'ajoute à la périphérie des myofibrilles,

Ainsi, il a été montré que les exercices en force/résistance, utilisant une intensité élevée d'exercice induisent une synthèse protéique musculaire (Schulte 2001, Hunter 2004, Harridge, 2007) engendrant une hypertrophie des muscles sollicités (Schulte 2001, Kraemer 2004, Brook 2016), notamment en stimulant la voie de signalisation mTOR (mammalian Target Of Rapamycin), une enzyme régulant la croissance cellulaire et la synthèse protéique (Drummond 2009, Brooks 2016, Smiles 2016).

Les entraînements en endurance basés sur une durée d'exercice plus long et sur une intensité plus faible impactent de manières différentes le muscle squelettique. En effet, les exercices moins intenses agissent principalement sur la fatigabilité du muscle (jeune ou âgé), en augmentant principalement les myofibrilles de type I, mais aussi Ila (Schantz, 1986, Coggan 1992, Lambert 2005), en améliorant le maintien de la force (Betik 2008) ainsi qu'en stimulant la biogénèse mitochondriale (Bigard 2007, Journaycaz 2010, Brooks 2016).

Avec l'âge, une transition naturelle, correspondant à une perte des types de fibres glycolytiques (II) au profit des fibres oxydatives (I) se réalise, impactant les performances musculaires en diminuant la masse et la force musculaire. Ces modifications phénotypiques rendent alors plus difficilement réalisables les efforts quotidiens, déclinant l'autonomie chez les personnes âgées.

Si la sédentarité peut aggraver ces effets, l'activité physique a au contraire un impact bénéfique. En effet, les différents types d'entraînement (endurance, résistance, force) permettent de diminuer les effets de la sarcopénie/dynapénie.

Les entraînements les plus efficaces pour compenser le déclin de la masse et de la force musculaire semblent être basés sur des exercices de hautes intensités (résistance/force), efficaces chez les sujets jeunes comme chez les sujets âgés.



Il a été bien démontré que les structures des muscles d'athlètes très entraînés diffèrent de celles de sujets sédentaires (Costill et coll., 1976). Les modifications de la typologie musculaire sous l'effet de l'entraînement résultent de trois facteurs principaux qui sont

- le type de stimulation nerveuse,
- la nature des contraintes mécaniques liées à chaque type d'activité physique
- la réponse hormonale à l'effort,

la nutrition pouvant moduler l'expression de ces précédents facteurs.

Résumé :

Lorsque l'on essaie de schématiser les effets de l'entraînement sur le muscle, on oppose la pratique des sports d'endurance à celle des sports de force et vitesse.

Les athlètes endurants présentent une augmentation de la proportion de fibres lentes de type I dans les muscles locomoteurs associée à un réseau capillaire plus dense. Il existe aussi une augmentation de la densité mitochondriale corrélée avec une amélioration de la consommation maximale d'oxygène.

Les athlètes entraînés dans des sports de force présentent une augmentation de la surface des fibres musculaires et pour certains types d'activités, une augmentation de la proportion de fibres de type rapides.

Cependant, la discussion reste ouverte pour savoir dans quelles proportions ces modifications observées chez des athlètes qui réussissent dans leur discipline, sont le résultat de l'entraînement ou bien reflètent leur patrimoine génétique.



Adaptation du système cardiovasculaire à l'entraînement

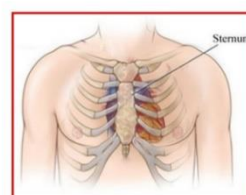
Anatomie du coeur

Le système cardio vasculaire occupe au sein de l'organisme une place essentiel puisqu'il est indispensable au bon fonctionnement de tous les autres systèmes

Situation du coeur

1 - Anatomie externe

Le coeur est de forme **pyramidale triangulaire**, il est situé dans le thorax, entre les deux poumons. il repose sur le diaphragme dans le médiastin antérieur. derrière le sternum. et en avant de la colonne vertébrale. Le poids du coeur augmente graduellement avec l'âge, en moyenne chez l'homme il est de 270 g et 260g chez la femme.

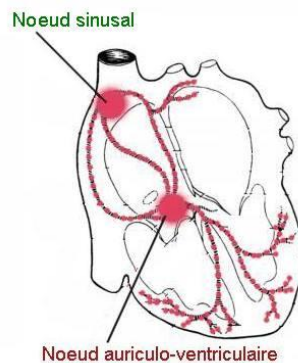


2 - Anatomie interne

Le coeur est divisé en 4 cavités par une cloison verticale et une cloison horizontale : 2 cavités supérieures : les **oreillettes** et 2 cavités inférieures : les **ventricules**. Les deux oreillettes sont séparées par le **septum inter auriculaire**. Les deux ventricules sont séparés par le **septum inter**. Les oreillettes communiquent aux ventricules par les orifices auriculo-ventriculaires. On distingue ainsi un coeur droit constitué d'une oreillette et d'un ventricule droits communiquant par un **orifice tricuspide** et un coeur gauche constitué d'une oreillette et d'un ventricule gauche communiquant par un **orifice mitral**.

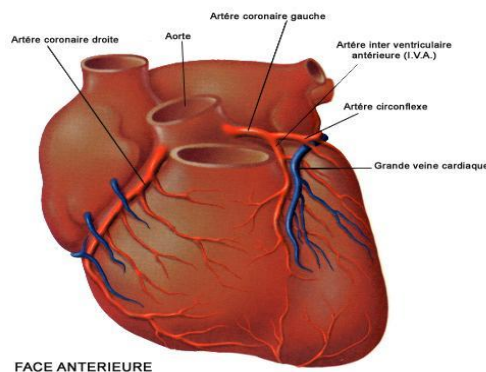
3 - Tissu nodal

Le tissu nodal est un tissu cardiaque intra pariétal qui donne naissance et conduit les impulsions électriques engendrant la contraction myocardique. Il est constitué du **nœud sino-auriculaire** dit de Keith et Flack localisé dans la paroi de l'oreillette droite au niveau de l'abouchement de la veine cave supérieure. Celui-ci est relié par 3 faisceaux de fibres cheminant dans la paroi de l'oreillette droite au **nœud auriculo-ventriculaire** dit d'Aschoff-Tawara à la jonction oreillette et ventricule droits, proche de la valve septale tricuspide et de l'abouchement du sinus coronaire. De ce nœud naît le tronc du **faisceau de His** qui se subdivise en 2 branches droite et gauche destinées respectivement et par l'intermédiaire du **réseau de Purkinje** à la contraction myocardique des ventricule droit et gauche.



4 - Vascularisation myocardique : réseau coronaire

La circulation coronaire correspond aux circulations artérielle (La circulation artérielle est assurée par les artères coronaires au nombre de deux) et veineuse systémiques propre au cœur.

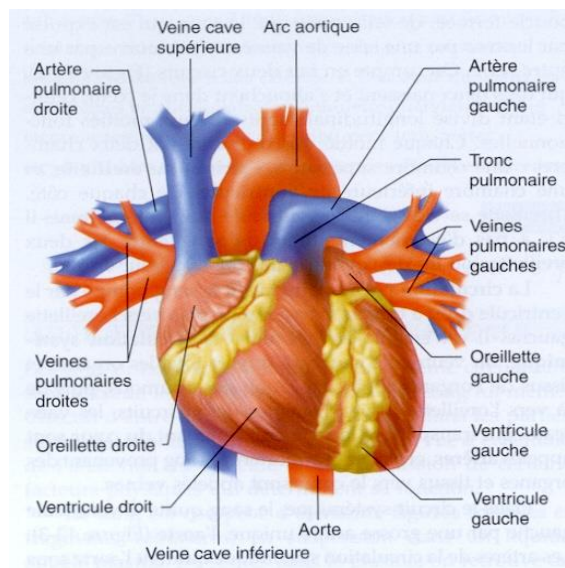


II - Physiologie cardiovasculaire

L'appareil cardio-vasculaire assure la circulation du sang pour véhiculer oxygène et nutriments vers les cellules et en évacuer les déchets permettant le maintien du métabolisme général.

1 - Physiologie générale

Schématiquement, l'appareil cardio-vasculaire se compose d'une pompe à fonctionnement alternatif (le cœur), d'un réseau de distribution à haute pression (**les artères**) où le sang est éjecté dans **l'aorte**, d'un circuit de retour à basse pression vers le cœur (**les veines**), la **Veine Cave Supérieure** ramène le sang veineux de la partie supérieur du corps et **la Veine Cave Inférieure** draine le sang veineux de la partie inférieure du corps, et d'un circuit de petits vaisseaux au niveau desquels s'effectuent les échanges (**les capillaires**)



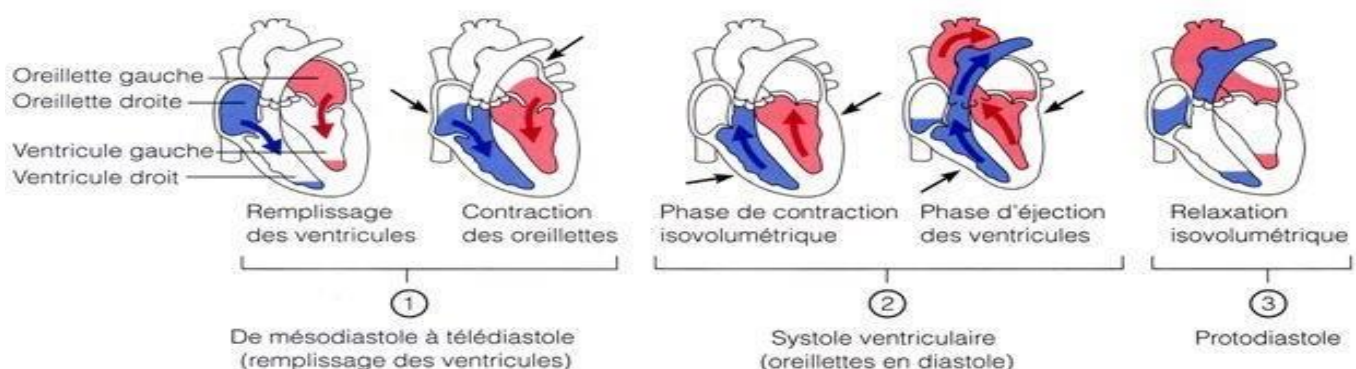
2 - Systole et diastole

La phase du cycle pendant laquelle le myocarde se contracte est appelée **systole**, celle pendant laquelle il se relâche, **diastole**. Il existe ainsi des systoles (suivies de diastoles) auriculaires droite et gauche, pratiquement simultanées, et des systoles (suivies de diastoles) ventriculaires droite et gauche, également quasi simultanées. En revanche, les activités auriculaires et ventriculaires ne sont pas simultanées : les activités auriculaires précèdent de quelques fractions de seconde les activités électriques ventriculaires. En pratique courante, on parle de systole ou diastole « cardiaques » pour désigner la systole ou la diastole ventriculaire, en englobant la contraction ou le relâchement des deux ventricules.



3 - Le cycle cardiaque

Le cycle cardiaque se compose de deux périodes : une pendant laquelle le muscle cardiaque se détend et se remplit de sang, suivie d'une période de contraction vigoureuse et le pompage du sang. Après s'être vidé, le cœur se détend immédiatement et se dilate pour recevoir un autre afflux de sang revenant des poumons et d'autres systèmes du corps, avant de se contracter à nouveau pour pomper le sang vers les poumons et ces systèmes. Un cœur qui fonctionne normalement doit être complètement dilaté avant de pouvoir pomper à nouveau efficacement. En supposant un cœur en bonne santé et un rythme typique de 70 à 75 battements par minute, chaque cycle cardiaque, ou battement de cœur, prend environ 0,8 seconde pour terminer le cycle.



4 - L'activité électrique cardiaque : automatisme et conduction

Le muscle cardiaque appelé myocarde est doué d'automatisme : il possède des cellules nodales ayant la propriété de produire une activité électrique répétitive spontanée. L'ensemble de ces cellules forme le **tissu nodal** qui produit donc des impulsions électriques entraînant une contraction myocardique.

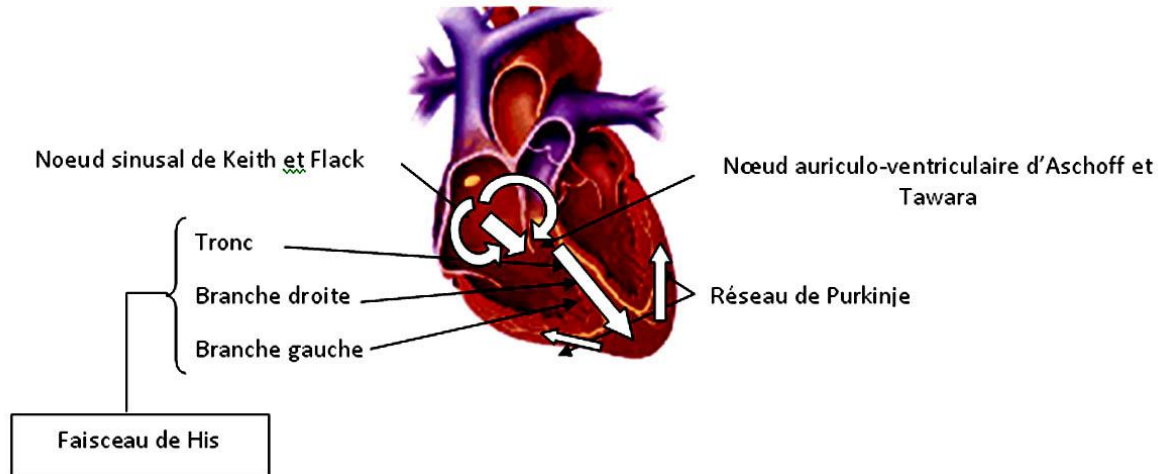
Le tissu nodal comporte un premier groupe cellulaire situé dans la paroi atriale droite supérieure : le **nœud sinusal de Keith et Flack** (également appelé sino-atrial). Il génère spontanément des potentiels d'action, à une fréquence modulée en permanence en fonction des besoins de l'organisme, provoquant une dépolarisation qui se propage de myocyte en myocyte dans les parois auriculaires droite et gauche entraînant ainsi la contraction atriale avant de buter sur le deuxième nœud. La fréquence de dépolarisation du nœud sinusal (entre 60 et 100 bpm) s'impose à l'ensemble du tissu nodal.

La stimulation est relayée par un deuxième amas de myocytes automatiques : le **nœud atrio-ventriculaire d'Aschoff et Tawara**, doué lui aussi d'automatisme et qui présente une fréquence de déclenchement spontanée des potentiels d'action plus basse, de sorte que la dépolarisation provenant du nœud sinusal l'atteint avant l'apparition de son potentiel d'action spontané.

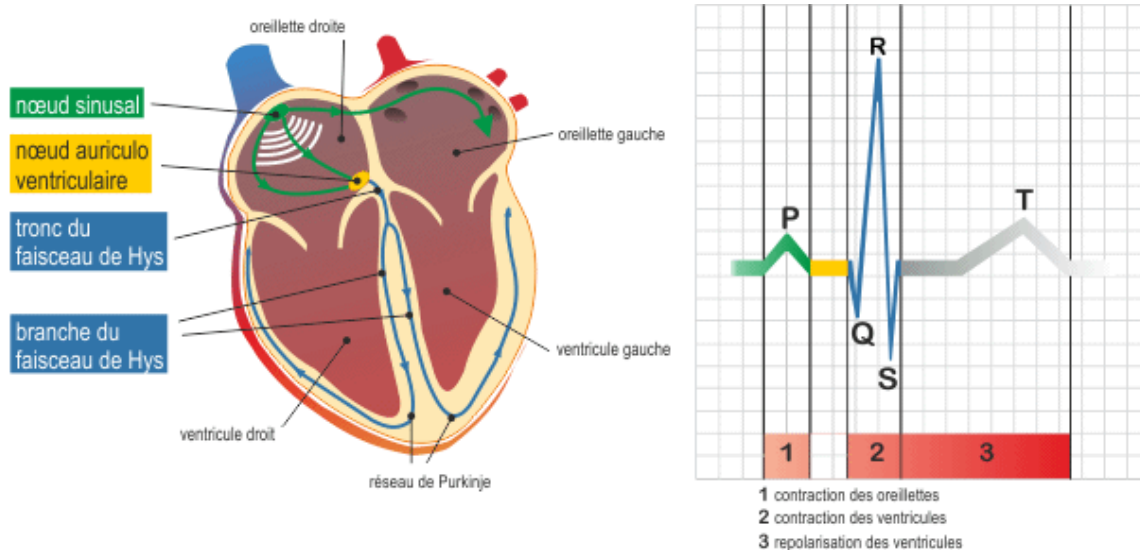
A partir du nœud atrio-ventriculaire, un réseau de myocytes automatiques assure la conduction rapide de la dépolarisation à l'ensemble du myocarde ventriculaire, par le **faisceau de His** : tronc, branches droite et gauche (elle-même subdivisée en



hémi branches antérieure et postérieure gauches) puis les **fibres de Purkinje**. Le septum interventriculaire est dépolarisé de la gauche vers la droite puis les ventricules de l'endocarde vers le myocarde. La contraction des ventricules se produit quelques fractions de seconde après celle des oreillettes, compte tenu du temps de propagation de l'onde de dépolarisation.



l'activité électrique du cœur peut être étudiée plus précisément par un examen permettant l'enregistrement de celle-ci à partir d'électrodes conductrices placées sur la surface de la peau.





5 - La fonction cardiaque

Le « service rendu » par le cœur à l'ensemble des organes et tissus est un **débit** sanguin, Ce débit doit être fourni sous une certaine **pression**, permettant le réglage de la distribution sanguine dans chaque organe en fonction de ses besoins propres sans compromettre l'équilibre général. Grace à ce débit les fonctions suivantes s'effectuent :

- Apport d'oxygène de nutriments
- Elimination du dioxyde de carbone et des déchets métaboliques
- Transport d'hormones des glandes endocrines jusqu'aux organes cibles
- Thermorégulation
- Régulation de l'équilibre acide-base de l'organisme et des fluides corporels
- Fonctions immunitaire

6 - Adaptation à l'effort

Pendant l'effort, les besoins en oxygène augmentent. A l'effort 2 mécanismes vont permettre d'augmenter les apports en oxygène au muscle : l'augmentation du débit sanguin des muscles, et l'augmentation de l'extraction d'oxygène par le muscle du sang qui le vascularise.

Cette adaptation musculaire peut être améliorée par un entraînement physique régulier.

7 - Mécanismes régulateurs

Pour réguler le système cardiovasculaire en fonction des conditions physiologiques de nombreux mécanismes neurologiques et/ou humoraux interviennent parmi lesquels :

- Le système nerveux central
- Le système nerveux sympathique dont la stimulation augmente la fréquence cardiaque et la contractilité myocardique
- Le système nerveux parasympathique dont l'effet est inverse par rapport au système nerveux sympathique

III- Le sang

Les substances productrices d'énergie extraites de la nourriture par le système digestif et l'oxygène extrait de l'air par le système respiratoire doivent circuler dans le corps aussi rapidement que possible,

C'est le sang qui accomplit ce travail, propulsé par le cœur et circulant dans les vaisseaux à travers l'organisme, le sang nourrit, nettoie et défend tous les tissus et les organes de notre corps.



1- Définition

Le sang est un tissu conjonctif, liquide de couleur rouge, circulant dans le système vasculaire, irrigant tous les tissus, Il devient rouge clair lors de son oxygénation dans les poumons (couleur rouge dans les artères), il devient ensuite rouge foncé quand il perd son dioxygène au profit des tissus.

Ce tissu est formé d'éléments cellulaires libres (**éléments figurés**), et de substances fondamentales (**plasma**), cellules rouges, cellules blanches et liquide clair ont chacun un travail particulier.

2- Le rôle du sang

Le sang assure de nombreux rôles

- *Le transport des gaz respiratoires* : le dioxygène et le dioxyde de carbone
- *Le transport de nutriments* (eau, sels minéraux, glucose, protéines, acides gras et vitamines)
- *Le transport des déchets* produits par le métabolisme, comme l'urée.
- La communication entre cellules en acheminant les messagers chimiques grâce aux *molécules informatives* : les hormones sont sécrétées par des glandes endocrines et atteignent les cellules cibles.
- La défense de l'organisme au niveau cellulaire contre des éléments étrangers
- L'équilibre acido-basique de l'organisme et le contrôle du pH
- Le transport de chaleur et la thermorégulation au niveau de l'organisme chez les homéothermes (oiseaux, mammifères), poïkilothermes (autres espèces)
- L'hémostase et la coagulation

3- Constitution du sang

Le sang chez l'homme représente 7 à 8 % de sa masse corporelle. Le volume sanguin total varie entre 67 ml/kg chez la femme et 75 ml/kg chez l'homme. Un humain adulte est doté d'environ 5 litres de sang.

- c'est un tissu formé par

- une phase cellulaire 45 %: **les éléments figurés**. Volume d'environ 5 litres dont 45% par les cellules.
- une phase liquide 55 %: **le plasma**

Composition du sang



معهد التربية البدنية والرياضية - 2 شارع احمد واحد / 1604 دالي إبراهيم- الجزائر

البريد الإلكتروني : iepe@univ-alger3.dz الموقع الإلكتروني /www.univ-alger3.dz/iepe



3-1 Eléments figurés

Les cellules du sang ou éléments figurés du sang sont divisés en trois groupes :

- Les Globules Rouges ou Erythrocytes ou hématies.
- Les Globules Blancs ou leucocytes.
- Les plaquettes ou thrombocytes.

C'est la moelle osseuse qui produit les cellules sanguines

a- Globule rouge

Transporte l'oxygène du poumon après transfère depuis les alvéoles pulmonaires et le délivre au niveau tissulaire et il va récupérer du gaz carbonique éliminé par les tissus.

Ces gaz sont transportés dans le sang par **l'hémoglobine**, l'oxygène se transforme en oxyhémoglobine et le gaz carbonique en carboxyhémoglobine, Il est facile de comprendre que la concentration en hémoglobine conditionne le contenu en oxygène qui influence la quantité livrée aux muscles.

L'hémoglobine est une protéine contenue dans les globules rouges comprenant quatre sous unités composées de **fer** qui se combine une façon réversible avec une molécule d'oxygène,

Le fer: est un élément essentiel de la molécule d'hémoglobine car c'est sur lui que l'oxygène se fixe, l'organisme contient 4 à 5 g de fer au total, la majeure partie du fer de l'organisme (environ 70%) se trouve dans l'hémoglobine, le reste est mis en réserve dans le foie, la rate et la moelle osseuse.

Les apports en fer : l'équilibre en fer est maintenu par l'ingestion d'aliments contenant du fer, La carence en fer induit une anémie : c'est l'une des pathologies les plus fréquentes dans le monde

La durée de vie des globules rouges est de 120 jours, ils sont formés à partir de cellules souches situées dans la moelle osseuse sous l'influence d'une hormone : **l'érythropoïétine**, désormais célèbre chez les sportifs, cette donnée est donc essentielle car elle détermine grandement la puissance aérobie.

Parmi les diverses méthodes permettant d'augmenter Hb, certaines sont autorisées par le code antidopage tel que Stage en altitude, Hypoxie artificielle et d'autres non comme la prise d'érythropoïétine et La transfusion sanguine



b- Globules blancs

Globules blancs ou leucocytes forment un anneau blanchâtre lorsqu'on les sépare des autres cellules sanguines. Ils assurent par leur spécificité propre les fonctions de défense de l'organisme contre les agents pathogènes. Certaines de ces cellules phagocytent les vieilles cellules et les microbes, d'autres sécrètent des substances capables de neutraliser les poisons produits par les microbes.

Quand l'organisme est infecté par une quantité de microbes dangereux, le nombre des cellules blanches augmente considérablement, et fournissent ainsi d'avantage de troupes à la défense.

c- Les plaquettes

Les plaquettes sanguines (PS) sont des particules anucléées qui se forme dans la moelle osseuse, Leur durée de vie est de 7 à 10 jours,

Les plaquettes permettent d'arrêter les saignements, de prévenir ou de stopper les hémorragies. On en compte de 150 000 à 400 000 par mm³ de sang.

En cas de rupture de la paroi d'un vaisseau, ces minuscules cellules se collent dessus et colmatent la brèche. Ensuite, différentes protéines du plasma vont renforcer ce « bouchon » grâce au processus de coagulation, et servira de fondation pour la formation de nouveaux tissus qui vont guérir la plaie.

3-2 Le plasma

Le plasma est la partie liquide du sang dans laquelle baignent les cellules sanguines (globules rouges, globules blancs et plaquettes) Composé à 90 % d'eau salée, de 8 % de protéines, 0,8 % de minéraux (chlore, potassium, sodium, calcium, phosphore, magnésium), On a aussi des acides aminés, du glucose, des déchets.

Il permet aux globules rouges et aux plaquettes de circuler dans le système vasculaire

4- les groupes sanguins

Les antigènes présents à la surface des érythrocytes sont aussi appelés agglutinogènes, il existe deux types : le A et le B.

La présence d'un antigène à la surface des hématies d'un individu lui confère l'appartenance au groupe sanguin correspondant.



Le groupe A possédant l'antigène A sur l'érythrocyte Le groupe B possédant l'antigène B Le groupe AB possédant les deux antigènes A et B Le groupe O ne possédant ni l'antigène A ni l'antigène B

Le système rhésus tient son nom du facteur rhésus qui est un antigène découvert il y a 50 ans dans le sérum d'un singe le MACACUS rhésus. Le système rhésus comprend en fait plusieurs antigènes dont le principal est l'antigène D chez l'être humain les sujets qui possèdent l'antigène D à la surface de leurs globules rouges sont dits rhésus positifs, les autres sont dits rhésus négatifs, 85% des individus sont Rh+ et 15% sont Rh-.

Tableau de compatibilité des groupes sanguins

		Donneurs								
		Type	0-	0+	B-	B+	A-	A+	AB-	AB+
Receveurs	AB+	⬮	⬮	⬮	⬮	⬮	⬮	⬮	⬮	⬮
	AB-	⬮		⬮			⬮		⬮	
	A+	⬮	⬮				⬮	⬮		
	A-	⬮					⬮			
	B+	⬮	⬮	⬮	⬮					
	B-	⬮		⬮						
	0+	⬮	⬮							
	0-	⬮								

Il y a en fait une véritable synergie d'adaptation des grandes fonctions physiologiques asservies à l'exercice musculaire, et L'exercice répété aboutit à **des modifications de la fonction cardiaque** qui sont désormais bien connues sous le terme de cœur d'athlète. Et Ils dépendent du type d'activité.

Les réponses du système cardiovasculaires, comme celles des différents systèmes impliqués dans la réalisation d'un exercice physique ont pour point de départ commun les besoins musculaires. La cellule musculaire consomme de l'énergie lors des contractions nécessaires aux différents gestes ou déplacements sportifs.

C'est pour permettre la resynthèse énergétique que les adaptations des différents systèmes physiologiques vont se mettre en place, notamment les systèmes



ventilatoires, métaboliques, hormonaux, et celui qui nous intéresse dans ce présent cours : **le système cardiovasculaire**.

Le système cardiovasculaire occupe au sein de l'organisme une place essentiel puisqu'il est indispensable au bon fonctionnement de tous les autres systèmes, les fonctions principales du système cardiovasculaire sont au nombre de 5 :

- Apport ;
- Élimination ;
- Transport ;
- Régulation ;
- Prévention.

II-Rappel anatomo-physiologique

Le cœur est un muscle comme les autres, il réagit selon la sollicitation de l'entraînement en modifiant sa morphologie et son rythme, il peut augmenter de volume et abaisser son rythme cardiaque.

Le cœur est une pompe à 4 cavités : 2 oreillettes ou auricules, droit et gauche, et 2 ventricules, droit et gauche. Les parties droite et gauche sont séparées par un septum, empêchant la communication directe du sang d'un côté vers l'autre.

Chaque oreillette est séparée du ventricule par une valve cardiaque qui peut s'ouvrir ou se fermer selon les moments du cycle cardiaque, de sorte que le sang circule toujours de l'oreillette vers le ventricule sans reflux.

Le sang est éjecté du cœur gauche par la contraction puissante du ventricule gauche. On parle de systole,

L'alternance des périodes de contractions, appelée **systoles** et de relâchement, appelées **diastoles**, permet de mettre le volume sanguin en mouvement. Lorsqu'un ventricule est en systole, l'oreillette est en diastole et inversement.

Les systoles cardiaques sont induites par la contraction des cellules musculaires qui constituent la paroi cardiaque. La spécificité du muscle cardiaque, appelé également myocarde, est qu'il est capable de générer et de maintenir son propre rythme.

La dépolarisation part donc du ventricule droit grâce au **nœud sinusal** pour se propager progressivement et successivement à l'ensemble du cœur. C'est ce qui explique la succession des périodes de systoles et de diastoles au niveau des oreillettes et ventricules, chaque période d'excitation électrique induisant une systole étant suivie d'une période de latence à l'origine de la diastole. Cette activité électrique est détectée par l'**électrocardiogramme** (ECG)



Le contrôle nerveux se fait par le SN sympathique et parasympathique

III- Réponses cardiovasculaires à l'exercice

À l'exercice, les muscles actifs consomment beaucoup plus d'oxygène et de substrats énergétiques. Les processus métaboliques sont activés et génèrent des sous-produits qu'il faut éliminer.

L'exercice nécessite alors que le système cardiovasculaire soit l'objet d'adaptation divers et spécifiques. Toutes n'ont qu'un seul but : permettre au système cardiovasculaire de répondre au mieux à l'augmentation des besoins, en optimisant les conditions de transport.

Ces adaptations vont concerner :

- La fréquence cardiaque ;
- Le volume d'éjection systolique ;
- Le débit cardiaque ;
- Le débit sanguin ;
- La pression artérielle ;
- Le sang.

1-Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque (F_c) est l'un des paramètres cardiovasculaires les plus faciles à mesurer. Il suffit de prendre son pouls au niveau de l'artère radiale ou au niveau de l'artère carotide, la fréquence cardiaque reflète le travail qui doit être fourni par le cœur pour répondre à l'augmentation des besoins imposés par l'exercice. Pour s'en rendre compte il suffit de comparer les fréquences cardiaques de repos et d'exercice.

Cette fréquence peut varier avec de nombreux facteurs - âge - sommeil - sportifs - etc

1-1 Fréquence cardiaque de repos

La fréquence cardiaque de repos est d'environ 60 et 80 bat/min. chez des sujets d'âge moyen totalement inactifs, elle peut atteindre 100 bpm.

Chez des athlètes très endurants, des valeurs de 28 à 40 bpm ont été rapportées.

En général, la fréquence cardiaque de repos diminue avec l'âge, elle peut aussi varier avec les conditions environnementales. C'est ainsi qu'elle augmente avec la température ambiante et avec l'altitude

Pour déterminer le plus précisément possible la fréquence cardiaque de repos, il convient donc de la mesurer dans des conditions de relaxation totale, c'est-à-dire dès le matin au réveil. Les valeurs de fréquence cardiaque mesurées avant l'exercice ne peuvent refléter la fréquence cardiaque de repos

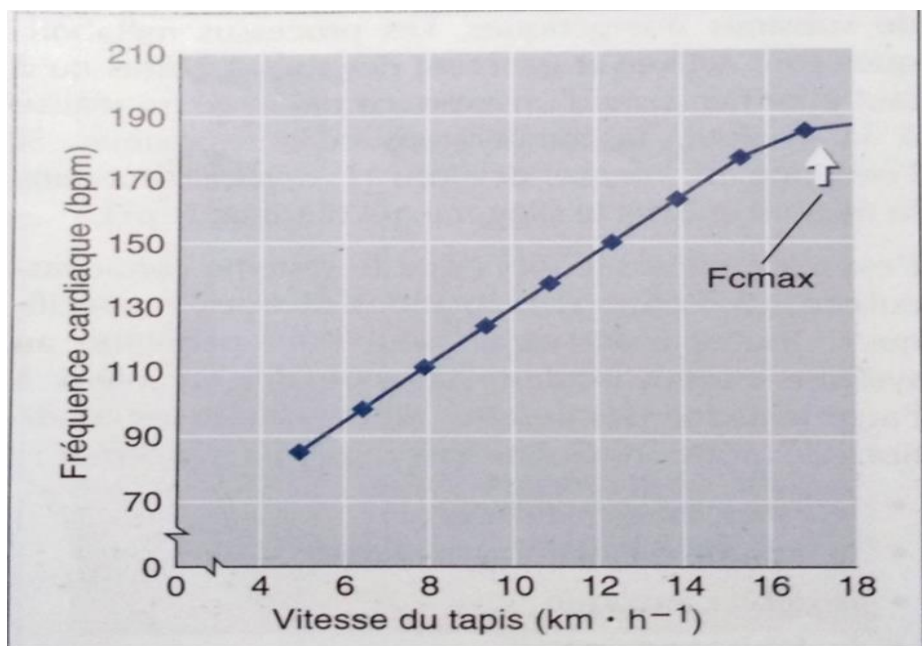


1-2 la fréquence cardiaque maximale.

À l'exercice la fréquence cardiaque augmente rapidement, a proximité du maximum, cette augmentation diminue puis s'annule. On a alors atteint **la fréquence cardiaque maximale**.

La valeur mesurée est la valeur la plus élevée qui peut être atteinte lors d'un exercice maximal.

C'est une valeur relativement stable qui change peu d'une année sur l'autre.



Variation de la fréquence cardiaque lors d'un exercice d'intensité croissante, d'après JACK H WILMORE, DAVID L COSTILL, Larry Kenney dans physiologie du sport et de l'exercice p192

L'un des changements physiologiques que l'on observe avec l'âge est le déclin de la fréquence cardiaque maximale, celui-ci diminue légèrement d'environ un battement par minute par année.

c'est à partir de cette constatation qu'a été formulée l'équation de Astrand et Rhymin (1954)

$$FC \text{ max} = 220 \text{ bpm} - \text{l'âge} (\pm 10\%)$$

Toutefois ce calcul ne fournit qu'une approximation grossière.

Pour les moins de 20 ans et plus de 50 ans la formule suivante permet de mieux évaluer la FC max



$$FC \text{ max} = 208 - (0.7 \times \text{âge})$$

ÂGE	220- ÂGE	[208 - (0,7 X ÂGE)]
20	200	194
30	190	187
40	180	180
50	170	173
60	160	166
70	150	159
80	140	152

Différence entre les deux calculs selon l'âge, d'après BOB MURRAY, W. LARRY KENNEY dans la préparation physique du sportif, p62

1-3 Fréquence cardiaque de l'exercice ou de l'entraînement est calculée comme suit:

$$\% \text{souhaité} \times (FC \text{ max} - FC \text{ de repos}) + FC \text{ de repos}$$

2-Le volume d'éjection systolique (VES)

C'est le volume sanguin pompé à chaque battement cardiaque par le ventricule gauche, exprimé en ml de sang par battement cardiaque (bt)

Dans un cœur de sédentaire en bonne santé l'étendue de son VES est de 70 à 90 ml de sang par battement, tandis que chez un sportif spécialiste des sports d'endurance a un VES de l'ordre de 125 ml/bt

Le VES est le principal déterminant de la capacité d'endurance cardiorespiratoire. Il est en fonction de quatre facteurs :

- Le retour veineux ;
- La capacité de remplissage ventriculaire ;
- La contractilité ventriculaire ;
- La pression sanguine dans l'aorte et le tronc artériel pulmonaire.

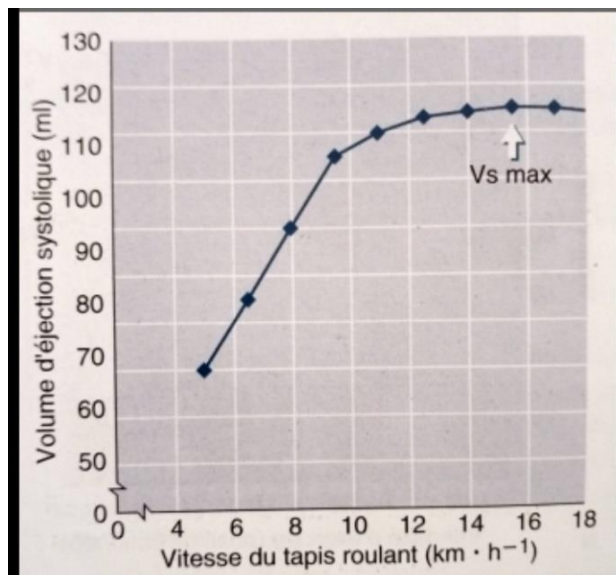
Ces quatre facteurs régulent directement les variations du volume d'éjection systolique en réponse à l'augmentation de l'intensité d'exercice

Le VES augmente avec l'intensité de l'exercice jusqu'à 40-60% de VO₂max, puis reste en plateau, un plateau qui se maintient même si l'exercice est poursuivi jusqu'au maximum le débit cardiaque augmente ensuite grâce à la fréquence



cardiaque qui croit proportionnellement à la consommation d'oxygène jusqu'à VO₂max.

À l'exercice, Le VES d'un sujet non entraîné est de 120ml mais peut monter sans problème au-dessus de 200 ml chez un sujet entraîné



Variation du volume d'éjection systolique lors d'un exercice d'intensité croissante, d'après JACK H WILMORE, DAVID L COSTILL, Larry Kenney dans physiologie du sport et de l'exercice p193

3- Le débit cardiaque (Qc)

Le débit cardiaque est définie comme la quantité du sang qui sort de l'aorte par minute, il dépend du volume de sang éjecté à chaque contraction (systole) du cœur et du nombre de battement cardiaque par minute

$$Qc = FC \text{ (bpm)} \times VES \text{ (ml/bt)}$$

Le débit cardiaque augmente à l'exercice en proportion directe avec les besoins métaboliques

Pour une fréquence cardiaque au repos de 72 bpm et un VES de 70ml par battement

$$Qc = 72 \times 70 = 5L/min$$

Le débit cardiaque augment linéairement avec l'intensité de l'exercice pour atteindre 20 à 40 L.min⁻¹

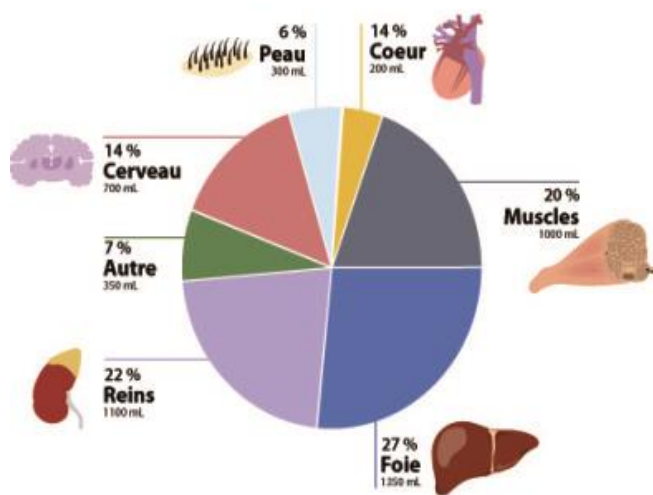


Sujets	Fc (bpm)		VES (ml/battement)		Q _c (l/min)
Repos					
Hommes non entraînés	72	×	70	=	5,0
Femmes non entraînées	75	×	60	=	4,5
Hommes entraînés	50	×	100	=	5,0
Femmes entraînées	55	×	80	=	4,5
Exercice maximal (à $\dot{V}O_2\text{max}$)					
Hommes non entraînés	200	×	110	=	22,0
Femmes non entraînées	200	×	90	=	18,0
Hommes entraînés	190	×	180	=	34,2
Femmes entraînées	192	×	125	=	23,9

Valeurs typiques au repos et à l'exercice du volume d'éjection systolique, de la fréquence cardiaque, et du débit cardiaque pour des sujets âgés de 20ans entraînés et non entraînés en endurance (poids du corps chez les hommes 70Kg et chez les femmes 50Kg. (D'après les travaux de Astrand et Rodahl, 1986 ; Rowell 1986). Dans physiologie et méthodologie de l'entraînement, p79

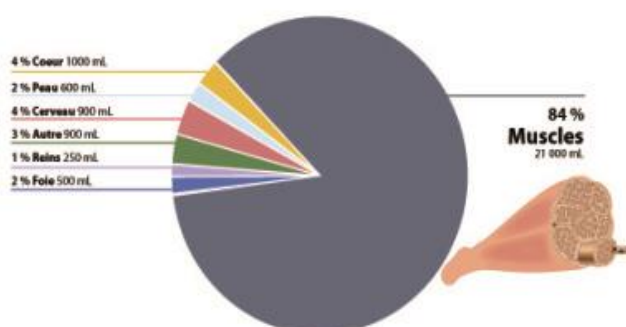
Distribution du débit cardiaque pendant l'effort

Repos : 5 000 mL



Au repos, les muscles n'utilisent qu'environ 20% des 5L éjectés par le cœur à chaque minute. Le reste est réparti entre le foie, les reins, le cerveau, la peau, d'autres organes et le cœur lui-même. Car il ne faut pas oublier que si le cœur est une pompe, c'est son activité contractile qui permet cette fonction, et qu'il faut bien que lui aussi soit correctement irrigué en sang pour cela.

Exercice : 25 000 mL



L'activité physique induit des modifications au niveau de la répartition du flux sanguin dans l'organisme.

Environ 80% du débit sanguin est distribué aux muscles actifs.



Le cœur doit être capable de répondre favorablement à l'exercice,
Il bénéficie d'une irrigation beaucoup plus importante durant l'exercice.
L'irrigation du cerveau doit également être préservée durant l'exercice.
Enfin, la peau voit la proportion de débit sanguin qui lui est réservée augmenter à l'exercice (rôle dans la dispersion de la chaleur).
Les autres organes : diminution de l'irrigation durant l'exercice.

4-Le débit sanguin

L'élévation du débit sanguin à l'exercice permet d'expulser une grande quantité de sang artériel, ce volume supplémentaire se destine aux organes qui ont le plus besoin, les muscles actifs.

C'est l'objectif de **la redistribution sanguine** ou **balancement circulatoire**.

Grâce à la mise en jeu du système sympathique, le sang est dérivé des territoires inactifs vers les territoires actifs dont les besoins sont accrus,

Les muscles qui ne reçoivent au repos que 15 à 20% du débit sanguin total peuvent ainsi percevoir jusqu'à 80 à 85 % de celui-ci.

Ceci n'est possible que par la diminution du débit sanguin à destination des viscères, foie, reins, estomac et intestins

5- la pression artérielle

La pression artérielle évolue entre deux valeurs, l'une maximale ou systolique, l'autre minimale ou diastolique.

Dans les activités les plus courantes, sollicitant une grande masse musculaire comme dans les exercices d'endurance, la pression systolique augmente proportionnellement à l'intensité de l'exercice, passant de 120mmHg environ au repos, à plus de 200mmHg à l'effort maximal.

L'augmentation de la pression systolique s'explique essentiellement par l'augmentation du débit cardiaque, elle permet d'assurer un débit suffisamment rapide dans tout le système vasculaire, jusque dans les capillaires les plus périphériques.

À l'inverse, la pression artérielle diastolique change peu dans ce type d'activité, même si l'intensité augmente.

Toute augmentation de cette pression au-dessus de 15 mmHg à l'exercice, doit être considérée comme pathologique et constitue un des critères obligeant à stopper toute épreuve d'effort



6- Le sang

Les modifications sanguines induites par l'exercice montrent que le milieu circulant s'adapte parfaitement afin d'améliorer l'apport de sang aux muscles actifs, les principales adaptations observées sont :

6-1 Le contenu en oxygène : au repos, le contenu du sang en oxygène est de 20mL pour 100mL dans le système artériel et de 14mL pour 100mL dans le système veineux. La différence entre ces deux valeurs ($20\text{mL} - 14\text{mL} = 6\text{mL}$) constitue la différence artério-veineuse, cette valeur représente la quantité d'oxygène prélevée dans le sang par l'ensemble de tissus.

Cette différence augmente en réponse à l'augmentation de la quantité d'oxygène prélevée dans le sang par les tissus actifs.

6-2 Le volume plasmatique : diminue avec l'exercice, deux facteurs y contribuent :

L'augmentation de la pression artérielle et avec elle la pression hydrostatique qui s'exerce sur la paroi des capillaires qui tend à faire sortir l'eau du secteur sanguin vers le secteur interstitiel.

L'accumulation des sous-produits métaboliques dans les muscles actifs, ce qui élève la pression osmotique et crée un appel d'eau du secteur sanguin vers le secteur musculaire.

6-3 l'hémoconcentration : toute perte d'eau plasmatique détermine une hémoconcentration (toute réduction du volume plasmatique), l'effet résultant est une augmentation apparente du nombre de globules rouges, (leur nombre absolu restant inchangé)

6-4 Le pH sanguin : à l'exercice, le pH sanguin peut devenir nettement plus acide, passant de 7,4 au repos à 7 voire souvent moins, l'acidose sanguine résulte essentiellement à la mise en jeu du métabolisme anaérobie qui s'accompagne de la production d'acide lactique.

V. L'adaptation du cœur à l'effort

1- L'adaptation à court terme du cœur pendant l'effort

Avant même le début de l'exercice physique, la fréquence cardiaque peut augmenter légèrement. Cette accélération anticipée est due à la tension nerveuse du sportif. Après le début de l'exercice, la fréquence cardiaque augmente rapidement puis se stabilise au niveau requis par l'exercice.



Cette accélération du cœur est provoquée par une stimulation nerveuse et par des hormones comme l'adrénaline, sécrétée par des glandes situées au-dessus des reins (les surrénales).

L'augmentation de la fréquence cardiaque augmente le débit sanguin vers les muscles et, ainsi, permet un approvisionnement suffisant en oxygène et en nutriments. Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation de la puissance de chaque contraction cardiaque.

À la fin de l'exercice, la fréquence cardiaque diminue en deux temps : rapidement (en quelques secondes ou minutes) puis plus lentement (en une ou deux heures) pour revenir à la valeur de repos.

2- L'adaptation à long terme du cœur avec le sport

Cette adaptation concerne essentiellement les sportifs de bon niveau. Avec la pratique régulière, le muscle cardiaque se développe (la taille du cœur augmente), ses contractions sont plus puissantes et il utilise l'énergie plus efficacement.

Au repos, la fréquence cardiaque diminue : elle est de 50 à 60 battements par minute, voire même en dessous de 35 battements par minute pour quelques cyclistes ou marathoniens de très haut niveau.

À l'effort, le débit sanguin maximal augmente, permettant des performances supérieures.

À fréquences cardiaques maximales, le cœur d'un sportif de haut niveau va pomper beaucoup plus de sang : jusqu'à 36 litres par minute contre 25 litres par minute pour une personne peu entraînée. Ce débit élevé permet un travail musculaire plus intense.



Adaptation du système respiratoire à l'exercice

I- Introduction

La vie de la cellule nécessite de l'énergie, celle-ci est produite dans les mitochondries en consommant de l'O₂ et produisant du Co₂

Au sens large, la respiration est un phénomène qui concourent à assurer les échanges gazeux entre le milieu ambiant et la cellule vivante

Le système respiratoire travaille conjointement avec le système circulatoire afin de fournir l'oxygène au corps entier et afin de le débarrasser du gaz carbonique, cet échange gazeux se fait au niveau des poumons à l'aide du processus de la respiration

II- La composition de l'appareil respiratoire

L'extraction de l'oxygène de l'air par le poumon est une opération importante et délicate. Aussi l'air qui arrive au poumon doit être aussi pur que possible. Sur le court trajet qu'il parcourt du nez à la poitrine, l'organisme dispose de plusieurs procédés (conduits véhiculant l'air : les voies respiratoires, et organes où s'effectuent les échanges gazeux : les poumons) pour éliminer la poussière, les impuretés et les microbes.

1- Les voies respiratoires.

Nous distinguons : les Voies respiratoires hautes (Fosses nasales. Pharynx. Larynx.) et les Voies respiratoires basses (Trachée. Bronches souches)

Fosses nasales : Le nez est la seule partie du système respiratoire visible de l'extérieur, l'intérieur du nez est divisé en deux cavités nasales qui sont séparées par une cloison appelée le septum nasal,

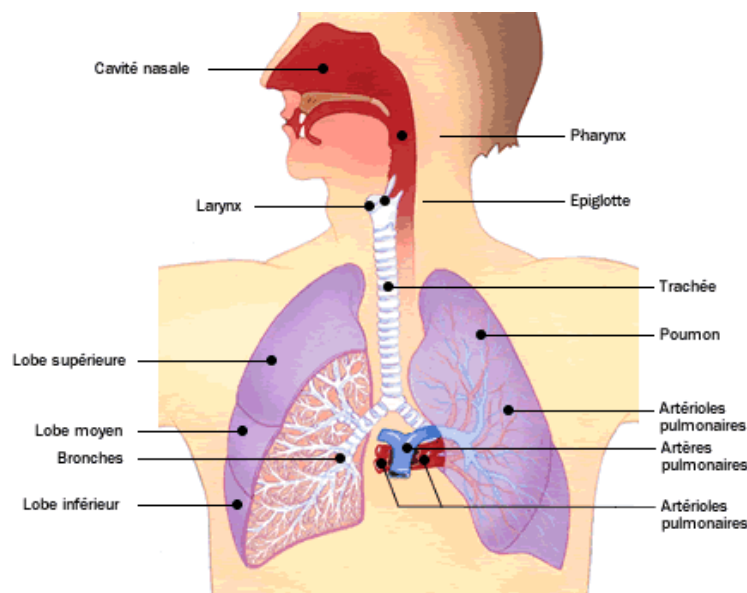


L'intérieur du nez est recouvert de muqueuse, cette muqueuse est très vascularisée, cette vascularisation sert à réchauffer l'air qui pénètre dans le nez et emprisonne les bactéries dans les narines,

Pharynx : appelé communément la gorge, il est constitué de muscle et ressemble à un entonnoir, mesure environ 13cm chez l'adulte.

C'est le chemin empreinté par l'air et les aliments, l'air est dirigé vers le larynx (La voie aérienne) et les aliments vers l'œsophage (La voie digestive).

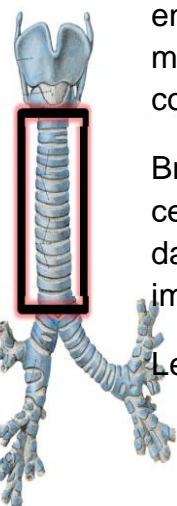
Larynx : Situé à la partie médiane et antérieure du cou, il est également tapissé de muqueuse, Une partie de cette muqueuse est formée de plis qu'on appelle les cordes vocales, celle-ci ont la capacité de vibrer et d'émettre des sons lors de l'expiration

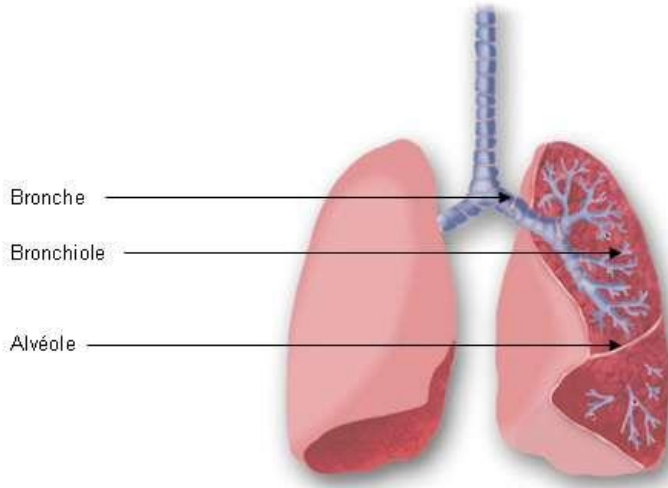


Trachée : est un tube cylindrique, allant environ jusqu'au milieu du thorax, il mesure environ 10 à 12 cm. Il est également tapissé de muqueuse recouverte de cils microscopiques, ces cils bougent continuellement et aident à propulser le mucus contenant de la poussière et des particules dans la direction du pharynx

Bronches principales : La trachée se divise ensuite en deux et donne naissance à ce que l'on appelle les bronches, chacune de ces bronches se dirige et s'enfonce dans un poumon, servant à humidifier, à réchauffer et débarrasser l'air des impuretés une dernière fois avant que cet air pénètre dans les poumons

Les bronches se subdivisent en bronchioles et terminent en alvéoles pulmonaires





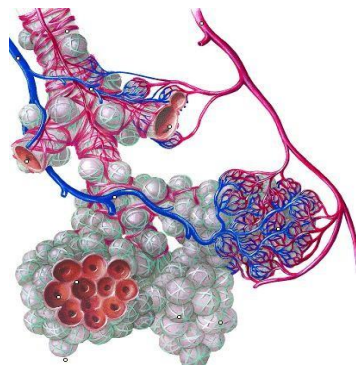
La ramification des bronches est hiérarchisée :

Les bronches principales qui partent de la trachée sont au nombre de deux, chacune allant vers un poumon ;

Les bronches lobaires qui vont vers les lobes pulmonaires ;

Les bronches segmentaires ;

Les bronchioles qui donnent naissance à des alvéoles pulmonaires (Minuscules sacs, tapissés par de nombreux capillaires. C'est à ce niveau que s'effectuent les échanges gazeux)



2- POUMONS

Ce sont les organes de la respiration. Au nombre de 2, droit et gauche. Leur capacité moyenne est de 5 litres, ils sont deux masses spongieuses et élastiques, logées dans la cage thoracique. C'est des organes passifs, ils suivent les mouvements de la cage thoracique

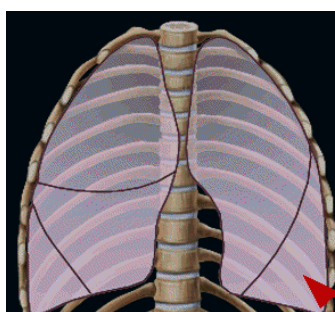
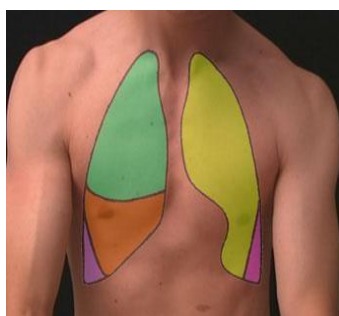


Chez l'enfant, les poumons sont rosés, chez l'adulte, ils prennent une coloration grisâtre, chez les fumeurs ou les gens exposés à une forte pollution atmosphérique, les poumons peuvent prendre une coloration d'un gris foncé, brun et même noir,

Les poumons sont divisés en lobes par les scissures :

Le Poumon droit présente 2 scissures (oblique et horizontale) et 3 lobes, supérieur, moyen et inférieur.

Le Poumon gauche présente 1 scissure (oblique) et 2 lobes, supérieur et inférieur.



Chaque poumon est isolé hermétiquement de l'extérieur par une enveloppe à double feuillet. Un feuillet viscéral entoure les poumons et un feuillet pariétal recouvre la paroi interne de la cage thoracique. Ces deux feuillets sont appelés plèvre. Elle facilite le glissement des poumons sur la paroi thoracique.

III- La physiologie du système respiratoire

Les principales fonctions du système respiratoire sont de fournir de l'oxygène à l'organisme et de le débarrasser du gaz carbonique. Ceci est possible grâce à la respiration,

La respiration

C'est un processus entièrement mécanique qui dépend des variations du volume survenant dans la cage thoracique, elle se fait par deux actions distinctes : l'entrée d'air lors de l'Inspiration et la sortie d'air lors de l'Expiration.

Inspiration

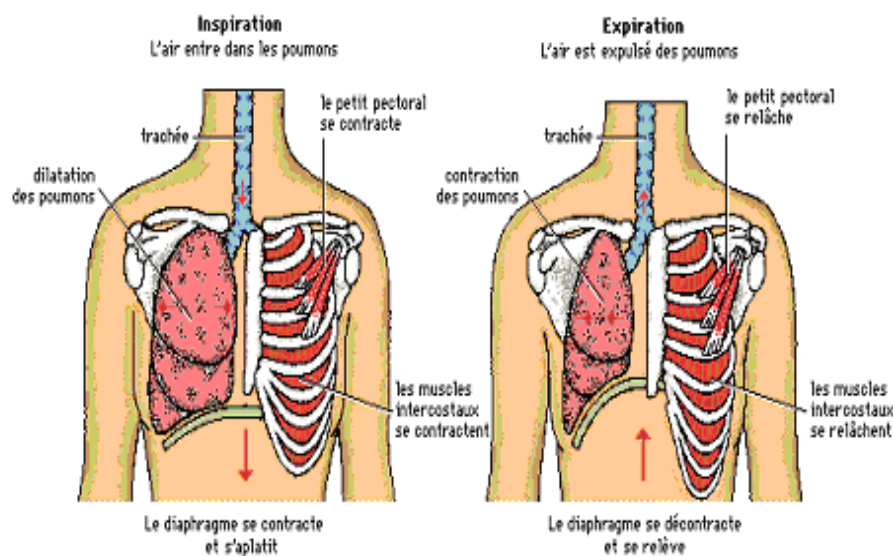
Consiste à faire entrer de l'air dans les poumons en contractant le diaphragme (abaissement) et les muscles intercostaux externes (soulèvement), Les plèvres suivent le mouvement de la cage thoracique et du diaphragme et entraînent avec



elles les parois des poumons. En s'étirant, un vide se produit et les poumons forcent l'air à pénétrer

Expiration

Consiste à chasser l'air des poumons, c'est une action passive et repose surtout sur l'élasticité des poumons et moins sur la contraction musculaire. A la suite de l'inspiration, les muscles du diaphragme et intercostaux se relâchent, Les poumons, étant élastiques, retrouvent leurs tailles et expulsent de l'air hors des poumons



La respiration nécessite 4 phénomènes :

La ventilation pulmonaire

La respiration externe

Le transport des gaz respiratoires

La respiration interne

- La ventilation pulmonaire : le terme de ventilation fait référence au processus mécanique des déplacements de l'air à l'intérieur et à l'extérieur des poumons, La fonction première de la ventilation pulmonaire est d'assurer les échanges gazeux entre les poumons et le sang afin de satisfaire les besoins de l'organisme en oxygène et, par conséquent, de maintenir un état métabolique stable.



Elle contribue aussi à la régulation thermique : quand il fait froid l'air inhalé est réchauffé dans la cavité nasale. En climat tempéré l'air est expiré par la bouche ou le nez à une température moyenne de 34°C, la ventilation baisse ou augmente, selon la demande.

- La respiration externe (la respiration pulmonaire) : désigne l'échange gazeux qui se produit entre les capillaires des poumons et les alvéoles pulmonaires
- Le transport des gaz respiratoires : c'est ce qui désigne l'entrée de l'oxygène et du gaz carbonique dans les poumons et les tissus, et leur sortie par la circulation sanguine,
- La respiration interne (respiration cellulaire) : c'est l'échange entre les cellules et le sang

La respiration est la plupart du temps inconsciente, régulée par le système nerveux autonome

1- Echange gazeux

Le sang pauvre en oxygène et riche en gaz carbonique vient du ventricule droit du cœur jusqu'aux capillaires et est échangé dans les alvéoles pulmonaires contre du sang riche en oxygène. Celui-ci alimente alors le corps via le ventricule gauche. Le sang veineux rouge foncé qui vient du corps a rejeté du gaz carbonique dans l'air inspiré. Simultanément, de l'oxygène provenant de l'air inhalé a enrichi le sang artériel devenu de ce fait rouge vif. Il afflue des poumons dans le cœur et est pompé par ce dernier dans la grande circulation.

2- Quantité d'air requise

La profondeur et le nombre d'inspirations par minute dépendent du besoin individuel en oxygène du corps. Les activités éprouvantes nécessitent une plus grande quantité d'oxygène, car les cellules musculaires ne peuvent travailler sans apport d'oxygène frais. La quantité d'air requise peut de ce fait fortement varier. Ainsi nous avons besoin par exemple que d'environ 4,7 litres d'air par minute lorsque nous dormons. Mais nous avons besoin d'environ 12 fois plus pour une marche rapide, à savoir env. 60 litres d'air par minute.

Chez les athlètes de très haut niveau, ce volume peut même atteindre 250 litres par minute. Simultanément, de nombreux capillaires pulmonaires se dilatent pour augmenter le débit du sang dans les poumons. Cette adaptation permet de prélever et de fixer plus d'oxygène sur l'hémoglobine des globules rouges.



3- Rythme respiratoire

La fréquence respiratoire est le nombre de cycles respiratoires (inspiration et expiration) par unité de temps, mesurés chez un individu.

La fréquence respiratoire normale est, selon l'âge, chez un enfant, elle varie en fonction de son sexe, son âge, son poids et sa taille. Pendant le sommeil lent, la fréquence respiratoire diminue.

Normes de fréquence respiratoire chez l'enfant.

Âge	FR (/min)
< 1 mois	30–50
1–6 mois	20–40
6–24 mois	20–30
2–12 ans	16–24
13–18 ans	12–25

Le système respiratoire permet les échanges gazeux entre l'atmosphère et le sang. Selon Brooks G.A (2004) quatre fonctions spécifiques sont assurées par la respiration et donc le système respiratoire : L'échange d'O₂, l'échange de CO₂, le contrôle de l'acidité du sang et la communication orale.

Une des fonctions principales du système respiratoire est bien sûr les échanges gazeux, à savoir fournir de l'O₂ à l'organisme et de le débarrasser du CO₂, cette fonction fait intervenir quatre processus qui sont à la base de la respiration :

1. La ventilation pulmonaire
2. La respiration externe
3. Le transport des gaz respiratoires
4. La respiration interne

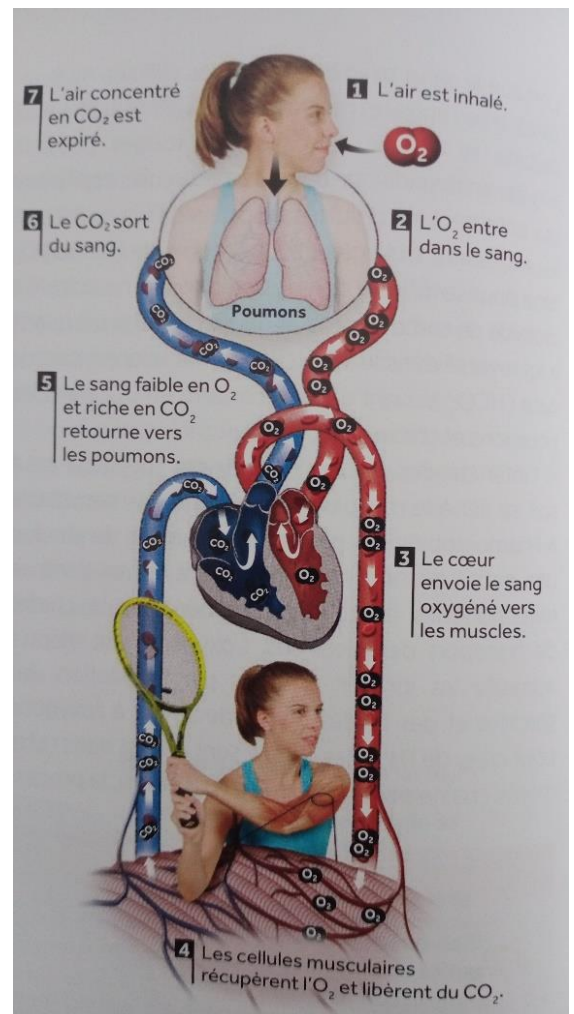
Les muscles ont besoin d'oxygène, et l'oxygène contribue à la production permanente de molécules d'ATP, qui sont indispensables au bon fonctionnement de toutes les cellules et à la contraction musculaire.

Le cœur, les poumons, le sang et le système vasculaire sont parfaitement conçus pour apporter aux muscles l'oxygène nécessaire pour un effort aérobie



Le chemin de l'oxygène vers les muscles passe d'abord par le nez (et est purifié, humidifié et réchauffé), la trachée, les bronches et les alvéoles pour ensuite entrer dans le sang. Là, l'oxygène est transporté par les globules rouges et la rapidité avec laquelle ils vont être distribués vers les muscles dépend de l'état du réseau sanguin, lequel dépend évidemment de la pompe qui le met en mouvement, le cœur.

Plus exactement, le temps nécessaire pour que l'oxygène parvienne aux muscles dépend donc de la vitesse du flux sanguin ainsi que de la distance entre le cœur et les muscles en question.



VI- Le transport de l'oxygène aux muscles

Au repos, quand on respire doucement et que le cœur bat lentement, le flux est calme. Le temps nécessaire pour que l'oxygène fasse le chemin du nez vers la cuisse par exemple sera d'une dizaine de secondes. En revanche, pendant un exercice intense, le flux augmente, on respire plus vite, plus profondément et les battements cardiaques s'accélèrent.

Pendant l'effort, la respiration n'est plus passive mais nécessite à son tour l'implication de muscle accessoire pour accélérer l'expiration de l'air et augmenter ainsi le débit ventilatoire, surtout chez un athlète avec un débit cardiaque élevé, l'oxygène ne met plus qu'une poignée de secondes pour aller du nez jusqu'aux muscles des cuisses.



Lorsque le sang oxygéné atteint les cellules musculaires, les molécules d'oxygène sont libérées de l'**hémoglobine** pour se diffuser dans le muscle. Il sera pris en charge par la myoglobine au niveau du sarcoplasme des cellules musculaires. Il se dissocie ensuite de la myoglobine pour être libéré au niveau des mitochondries qui l'utiliseront pour re-synthétiser l'ATP.

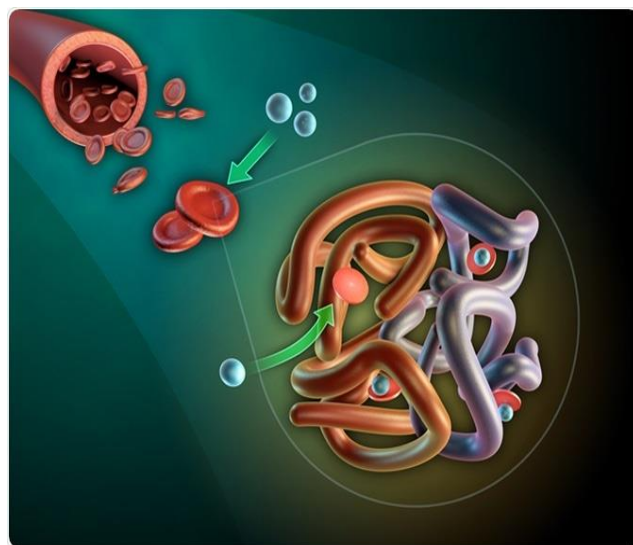
Le dioxyde de carbone produit par ces cellules est quant à lui reversé dans le sang et traverse à son tour les membranes des poumons pour être évacué.

1. La concentration en hémoglobine

Le sang transporte l'oxygène combinée à l'hémoglobine, une protéine présente au niveau des globules rouges

L'hémoglobine est constituée de 4 chaînes polypeptidiques contenant chacune un atome de fer. Chacun de ces atomes de fer peut capter un atome d'oxygène.

la quantité d'oxygène transportée dépend de ce facteur essentiel: la concentration en hémoglobine, autrement dit, la masse d'Hb par litre de sang



En moyenne, Hb est environ 16g.dl-1 chez l'homme et de 14 g.dl-1 chez la femme, cette différence explique l'écart de 10 à 15% de puissance aérobie entre les sexes, Les scientifiques attribuent cette différence du Hb entre les genres au fait que l'**érythropoïétine** (Epo) qui conditionne la production d'érythrocytes (globules rouges), est sous l'influence de *la testostérone*.

En revanche il n'existe pas de différence entre les sportifs et les sédentaires, le contenu total en Hb peut être supérieur pour les sportifs d'endurance mais ceci est compensé par un plus grand plasma : au final la concentration est similaire.

Chaque gramme d'Hb peut fixer 1,39 ml d'oxygène



VII- Volumes et capacités pulmonaires

Un certain nombre de mesures permettent de connaître les capacités ventilatoires ou le niveau de ventilation d'un sujet

- **Le volume courant (V_T)** C'est la quantité de gaz ventilé à chaque mouvement respiratoire sans faire d'inspiration ou d'expiration forcée, il est environ 500ml (0,5l) chez l'adulte au repos, mais ce chiffre peut être multiplier par 5 lors d'un exercice intense
- **La fréquence ventilatoire (Fr)** Le nombre de cycle (ou mouvement) respiratoire par minute, un adulte au repos possède une fréquence respiratoire de 12 à 16 cycles.min⁻¹, valeur pouvant atteindre 50 cycles.min⁻¹ à l'exercice intense.
- **Le débit ventilatoire (VE)** ou appelé Ventilation minute, c'est le volume courant mobilisé à chaque mouvement respiratoire par minute. On a donc :

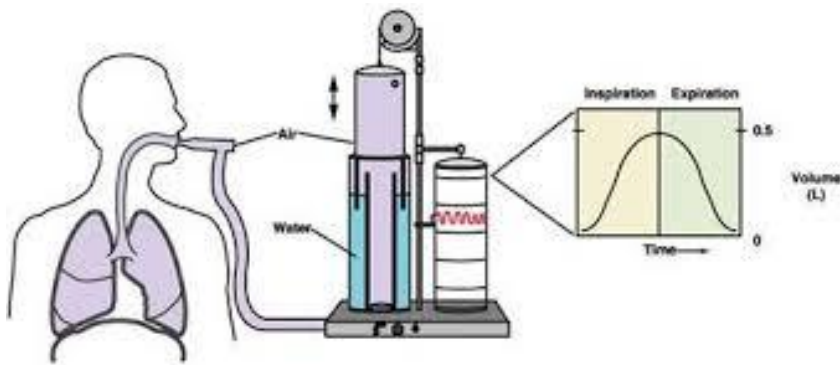
$$VE = V_T \times Fr$$

$$VE = 0,5 \times 12 = 6 \text{ L.Min}^{-1} \text{ au repos}$$

$$VE = 2,5 \times 50 = 125 \text{ L.Min}^{-1} \text{ à l'exercice intense}$$

Des valeurs supérieures à 200 L.Min⁻¹ ont déjà été observées

1. **Le volume pulmonaire** peut être mesuré avec précision grâce à une technique appelé spirométrie, il est équipé de capteur de débit et volume, associé à un analyseur d'O₂ et de CO₂ : l'un doté d'un embout buccal et l'autre d'un analyseur de gaz. À l'issue de ces examens, on obtient un graphique avec différentes courbes représentant les mouvements respiratoires d'un sujet au repos, la consommation d'O₂, la fréquence cardiaque (FC), la ventilation/min et le rejet de CO₂



- **Le volume de réserve inspiratoire (VRI)** : quantité d'air qui peut être inspirée avec un effort après une inspiration courante. Environ 3100 mL chez l'homme adulte et 1900 mL chez la femme adulte.
- **Le volume de réserve expiratoire (VRE)**: quantité d'air qui peut être expirée avec un effort après une expiration courante. Environ 1200 mL chez un homme adulte contre 700mL pour une femme adulte;
- **Le volume résiduel (VR)**: quantité d'air qui reste dans les poumons après une expiration forcée, 1200 mL pour un homme adulte, 1100 mL chez une femme adulte.

2. **Capacités respiratoire** sont obtenues en combinant les volumes respiratoires de différentes façons ;

- **Capacité inspiratoire (CI)**= $V_T + VRI$

Quantité totale d'air qui peut être inspirée après une expiration courante (homme=3600mL, femme= 2400mL)

- **Capacité résiduelle fonctionnelle (CRF)**= $VRE + VR$

Quantité d'air qui reste dans les poumons après une expiration courante (homme= 2400 mL, femme= 1800mL)

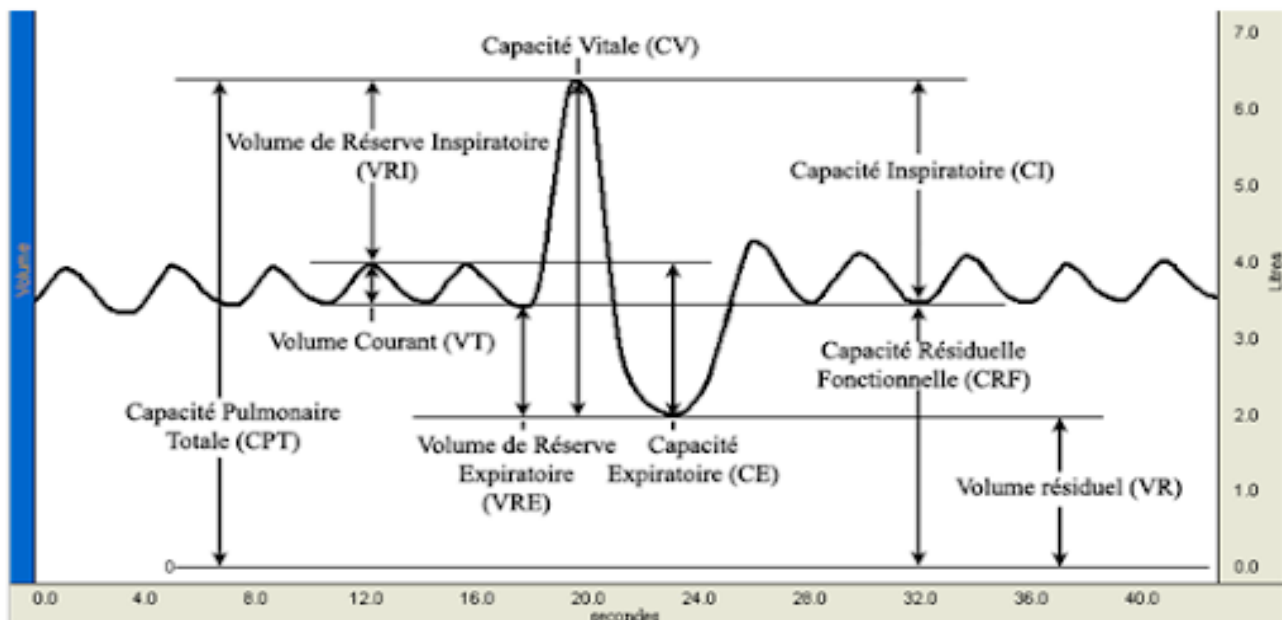
La capacité vitale (CV)= $V_T + VRE + VRI$

Quantité maximale de gaz chassé par une expiration forcée après une inspiration maximale, (Homme=4800 ml, Femme=3100ml). En théorie, elle devrait représenter 80% de la capacité pulmonaire totale.

CV est dépendante de la taille : $CV = k \cdot \text{taille}^3$ (k est une constante en général, $k=1$)

**Capacité pulmonaire totale= VT+VRI+VRE+VR**

Somme de tous les volumes pulmonaires, quantité maximale d'air contenue dans les poumons après un effort inspiratoire maximal (Homme=6000mL, Femme= 4200 mL)

**VIII- Liens entre l'utilisation de l'oxygène, la condition physique et la dépense d'énergie**

La capacité du corps à utiliser l'oxygène est un indicateur de santé et de condition physique. Les athlètes d'endurance de haut niveau ont une excellente capacité à utiliser l'oxygène disponible. Ce qui reflète dans leur consommation maximale d'oxygène très élevée, à l'inverse, les personnes à court de forme ont une VO₂ max faible. Ainsi la VO₂ max reflète la condition aérobie d'une personne.

Connaitre la consommation d'oxygène permet de déterminer la quantité d'oxygène utilisée par la personne en une minute. Cette donnée peut être mesurée au repos ou pendant un effort d'intensité et de durée variable.



La consommation d'oxygène mesurée pendant une activité permet aussi aux scientifiques de calculer **le coût énergétique**, C'est pourquoi les tests de consommation d'oxygène sont également qualifiés de calorimètre indirecte.

Le coût énergétique (dépense énergétique) est exprimé en kilocalories, celui d'une course à 12km/h pour une personne de 70kg est environ 14 KCalories par minute, comme le révèlent les tests de consommation d'oxygène.

Métabolisme de base et l'exercice

Le métabolisme (ou le taux métabolique) est le rythme auquel l'organisme utilise l'énergie.

Autrement dit la dépense énergétique, le métabolisme et la consommation d'oxygène sont des concepts équivalents.

Le métabolisme de base (basal) indique la dépense d'énergie au repos, et la consommation d'oxygène peut être utilisée pour estimer la dépense d'énergie au repos. Le métabolisme basal diminue avec l'âge, de 2 à 3 % par décennie après l'âge adulte

Exemple : une femme de 58kg, consomme 0,25L d'oxygène par minute, donc en une journée elle consomme $0,25 \times 1440 = 360$ L d'oxygène /jour

Sachant qu'un litre d'oxygène équivaut 4,8Kcalories

Le métabolisme de base de cette femme est de $360 \times 4,8 = 1728$ Kcalories/jour

Cette dépense d'énergie au repos dépend surtout de la corpulence d'une personne (notamment de sa masse maigre et de la surface totale du corps), En d'autre terme la consommation d'oxygène au repos est plus importante chez les personnes de grand gabarit, qui compte plus de cellules corporelles requérant de l'oxygène, Quant au métabolisme de l'exercice, il s'agit d'une dépense calorique consécutive à un effort physique ou du cerveau pendant un travail intellectuel ou de concentration intense (examens, conduite automobile...). Ce besoin est difficilement quantifiable étant donné qu'il varie d'un individu à l'autre et d'une situation à l'autre.

Néanmoins, on peut dire qu'un exercice nécessite **5 fois** plus d'énergie que de rester tranquillement assis



IX- La ventilation et la performance

Le système pulmonaire n'est généralement pas considéré comme un facteur limitatif de la consommation maximale d'oxygène et de l'aptitude à la soutenir longtemps,

Le débit cardiaque est le principal facteur limitatif à VO_2max .

Ce sont des sportifs qui possèdent une forte aptitude aérobie (VO_2max supérieure à $60ml.min^{-1}.kg^{-1}$) et qui, à force d'entraînement, ont repoussé les limites de la fonction cardiovasculaire, habituellement limitante à l'effort, jusqu'à ce qu'apparaissent les limites d'une autre fonction : la fonction pulmonaire

Cette limite se traduit par une chute de la pression artérielle en O_2 (PaO_2), en provoquant une **hypoxémie** (la diminution de l'apport en O_2 vers les muscles)

Cette diminution du niveau d'oxygénation artérielle apparaît à partir d'intensités d'exercice de l'ordre de 60 à 80 % de VO_2max (Prefaut, Durand *et al.*, 2000) et aurait un impact sur la performance.

D'autres termes peuvent être associés à la consommation d'oxygène, le premier est **le quotient respiratoire (QR)** : c'est le rapport entre l'oxygène utilisé et le dioxyde de carbone produit, et s'obtient en divisant le volume de CO_2 produit à chaque minute par le volume d' O_2 utilisé à chaque minute : $QR = V CO_2 / V O_2$

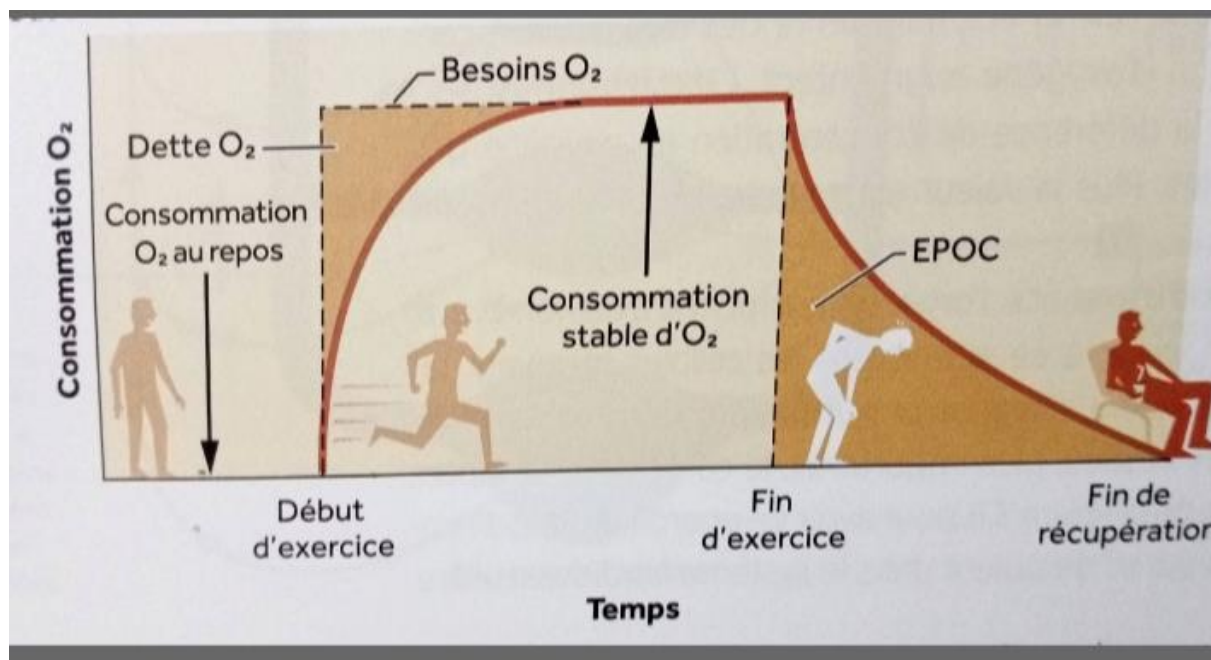
Le QR est utilisé pour connaître les quantités de lipides et de glucides oxydés afin de produire de l'ATP, ce processus se déroule en continu dans le corps, mais les proportions de ces deux sources varient selon l'intensité de l'exercice,

Au repos, quand le besoin d' O_2 est faible et que les lipides sont oxydés pour produire de l'ATP, le QR est faible, pendant l'exercice intense, quand les muscles utilisent principalement des glucides, le QR est plus élevé,

Le QR reflète donc la différence d'oxydation de ces deux éléments.

La dette d'oxygène : Au début de tout effort ou lors d'un effort rapide et violent, le corps ne peut compter que sur ces réserves locales pour fournir de l'énergie au muscle, La filière aérobie possède une grande inertie pour se mettre en route (plusieurs minutes).

A la fin d'un exercice la vitesse métabolique reste élevée, cette réaction correspond à **l'excès de consommation d'oxygène post-exercice (EPOC)**

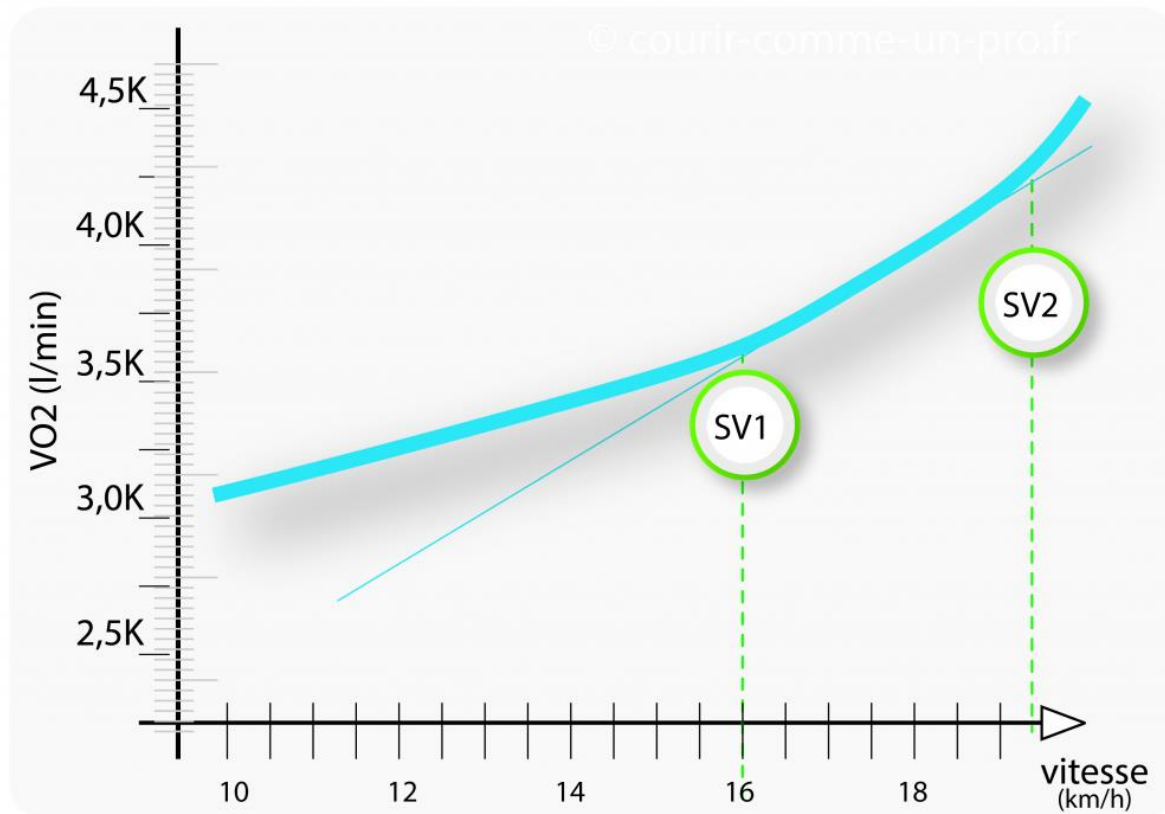


Dans "physiology of sport and exercise", 6^e éd. Human Kinetics, P129

La respiration et le métabolisme énergétique

Aujourd'hui dans le domaine de l'entraînement sportif, connaître le moment de l'apparition du premier seuil ventilatoire (SV1) et le deuxième seuil ventilatoire (SV2) au cours d'un effort physique est indispensable pour l'optimisation de la performance des sportifs. Cette notion du seuil ventilatoire est un indice important pour connaître l'aptitude et la capacité aérobie et anaérobie de chaque athlète, afin d'avoir une meilleure orientation et planification de l'entraînement ainsi qu'une bonne adaptation de la charge de travail physique pour améliorer l'endurance de l'athlète.

Un effort physique progressif allant d'une faible intensité à une intensité élevée, il y a trois phases qui définissent les sources d'énergie qui contribuent à tolérer un effort physique



Seuil aérobic (ou SV1 - 2 mmol) et seuil anaérobic (ou SV2 - 4mmol)
© courir-comme-un-pro.fr

La source d'énergie de la première phase dérive entièrement du processus métabolique aérobic. La première cassure représente le début de la phase 2 où la source d'énergie dérive des deux processus métaboliques aérobic et anaérobic. Ainsi avec l'augmentation de l'intensité de l'exercice au-dessus de ce premier point d'arrêt, il y a une production de lactate qui est supérieure à la capacité de métabolisation de la cellule musculaire

Cette première cassure de la courbe est désignée comme le “ **seuil aérobic** ” (Kinderman et al. 1979 ; Skinner & McLellan 1980)

La deuxième cassure qui représente le seuil d'accumulation du lactate dans le sang. Selon Kindermann et al. (1979), a été nommée “**seuil anaérobic**”.



X-Problème respiratoire induit par l'exercice

Dans l'absolu, la respiration est censée s'adapter pour favoriser la performance. Malheureusement, un certain nombre de problème peuvent accompagner et perturber l'exercice physique.

1. La dyspnée

La dyspnée induite par l'exercice, est perçue comme une incapacité respiratoire dont la cause est une incapacité à réguler le pH malgré une importante stimulation nerveuse ventilatoire, les muscles respiratoires se fatiguent et ne peuvent rétablir l'homéostasie rendant impossible la baisse de ces stimuli à l'exercice.

2. L'hyperventilation

Beaucoup de personnes prennent des inspirations forcées ou une série de courtes inspirations rapides avant de tenter de retenir leur respiration au pendant une période prolongée. C'est ce que l'on appelle l'hyperventilation, Elle peut excéder les besoins en oxygène, c'est le cas lors de l'anxiété qui précède l'exercice, et cela peut perturber l'équilibre entre l'O₂ et le CO₂ dans l'organisme.

3. La manœuvre de Valsalva

Elle est utilisée dans certains types d'exercice, en particulier en musculation ou en haltérophilie, lorsqu'il s'agit de soulever des charges lourdes.

Si cette manœuvre se prolonge, elle peut entraîner une diminution importante du retour veineux au cœur et donc un volume d'éjection systolique. C'est pourquoi elle s'avère dangereuse pour les individus ayant des pathologies cardiaques

XI- L'adaptation du système respiratoire à l'effort

Lors de l'effort, les zones du cerveau qui contrôlent la respiration sont stimulées par plusieurs facteurs : des informations provenant des récepteurs présents dans les muscles et les tendons, l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans le sang et la diminution de celle d'oxygène, l'accroissement du taux d'adrénaline et l'augmentation de la température.

Les sportifs, en particulier ceux qui pratiquent régulièrement un sport d'endurance, apprennent à privilégier l'augmentation du volume d'air inspiré (en respirant plus profondément) plutôt que l'accélération de la fréquence ventilatoire.



- il est plus efficace d'augmenter le volume d'air ventilé que la fréquence de la respiration
- L'approvisionnement en oxygène à chaque inspiration est amélioré, et demande moins d'énergie (les muscles intercostaux et le diaphragme se contractent plus fortement mais moins souvent).
- La fréquence ventilatoire au repos diminue et elle est plus rapidement retrouvée après l'effort
- La quantité d'air ventilée par les poumons augmente légèrement avant le début de l'exercice, elle atteint ensuite un point d'équilibre quelques minutes après le début de l'exercice
- À la fin de l'exercice, le volume d'air ventilé diminue rapidement en quelques secondes, mais le rythme de repos n'est retrouvé qu'après plusieurs minutes.
- le volume d'air brassé par les poumons passe d'environ 6 à 8 litres par minute au repos à 80 à 150 litres par minute pendant l'effort, selon l'intensité de l'exercice. Chez les athlètes de très haut niveau, ce volume peut même atteindre 250 litres par minute. Simultanément, de nombreux capillaires pulmonaires se dilatent pour augmenter le débit du sang dans les poumons. Cette adaptation permet de prélever et de fixer plus d'oxygène sur l'hémoglobine des globules rouges.



Adaptation à l'exercice physique en fonction de l'accroissance

I-Introduction

II-Rappel anatomo-physiologique

III-Réponses cardiovasculaires à l'exercice

V- L'adaptation du cœur à l'effort

I- Introduction

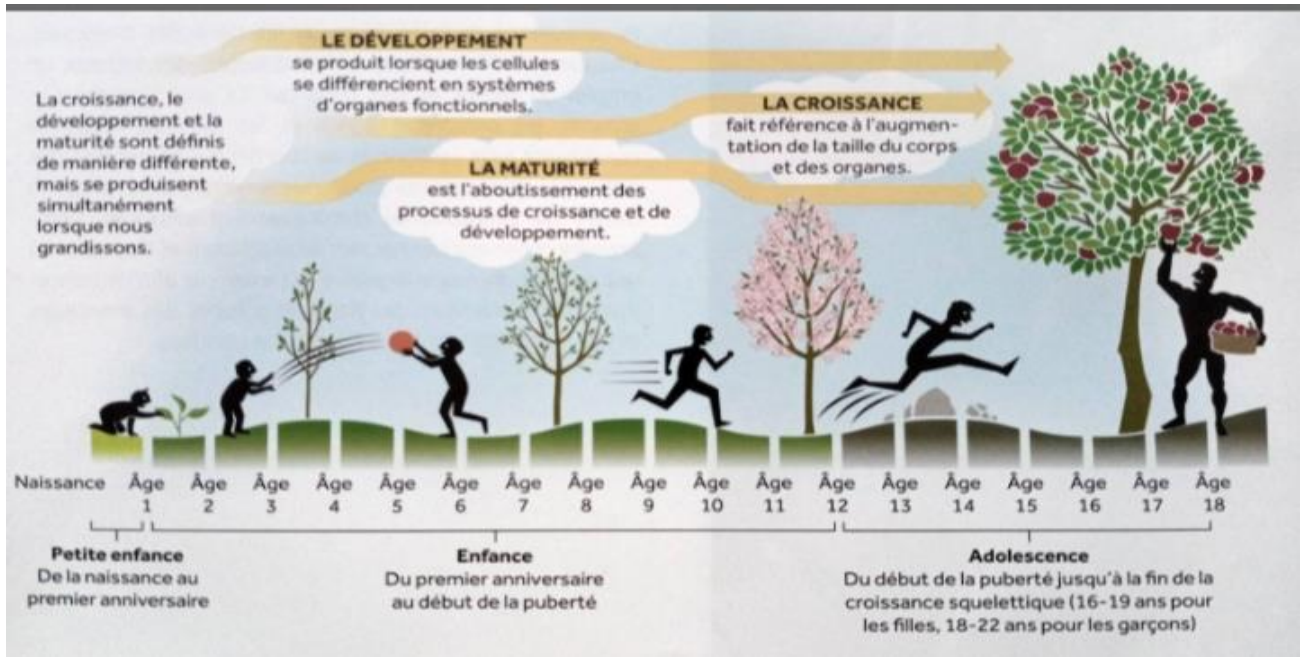
On a longtemps considéré que les adaptations étaient semblables chez les enfants et chez les adultes.

L'enfant n'est pas un adulte en réduction. Il a des particularités physiologiques dont l'évolution principale représente la croissance, développement et la maturation.

La croissance concerne l'évolution des dimensions corporelles

Le développement définit l'évolution des différentes fonctions

Enfin la maturation décrit les différentes étapes qui conduisent un tissu, ou un système, le degré de maturation d'un enfant ou d'un adolescent est défini par : l'âge biologique, l'âge osseux et le niveau de maturation sexuelle



Croissance, développement et maturation sont les termes utilisés pour décrire les modifications qui surviennent, dans le corps humain, de la conception à l'âge adulte.

L'enfant possède de grandes possibilités d'adaptation. Lors de la croissance, l'enfant stocke des millions d'informations afin de mettre en place doucement et à son rythme les différents éléments qui feront de lui un être unique et autonome.

Il est possible de l'aider pour optimiser le développement de ses futures capacités psychomotrices et préparer sa croissance.

L'activité physique et sportive est utile au développement physiologique et psychologique de l'enfant.

L'entraînement régulier n'a pas d'effet apparent sur la croissance en taille, il peut, par contre, influencer le poids et la composition corporelle.

Concernant la maturation, l'âge auquel survient le pic de croissance n'est pas modifié par la pratique physique, pas plus que la maturation squelettique.

Les résultats concernant l'influence de l'entraînement sur la maturation sexuelle ne sont pas encore très clairs.

On doit toutefois respecter les différentes étapes de la croissance sans imposer à l'enfant un sport compétitif trop précoce.

L'importance des compétitions sportives, chez les jeunes, oblige à connaître les bases physiologiques de leur croissance et de leur développement. Chaque âge, chaque stade de développement est unique.



Les capacités physiologiques sont édictées par le développement et la croissance des différents tissus et organes, qu'ils soient osseux, musculaires ou nerveux.

La croissance de l'enfant amène une évolution de **la force**, de ses **aptitudes aérobies et anaérobies** mais aussi **motrices**

Et pour bien définir les aptitudes physiques de l'enfant et l'impact que peut avoir sur lui l'activité sportive, il faut en premier lieu décrire la croissance et le développement des différents tissus

II-Composition corporelle : croissance et développement des différents tissus

1-La taille et le poids

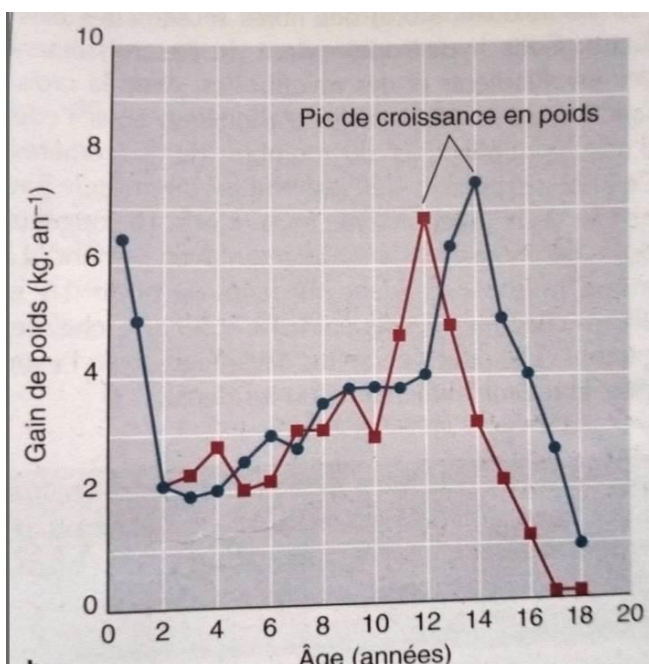
La croissance en taille est très rapide pendant les 2 première année. A deux ans l'enfant atteint à peu près la moitié de sa taille d'adulte. Ensuite la vitesse de croissance se ralenti pour s'accélérer à nouveau en période pubertaire avant de diminuer ensuite très rapidement, jusqu'à s'annuler lorsque la taille définitive est atteinte.

Le pic de vitesse de croissance en taille se situe aux environs de 12ans chez les filles et 14 ans chez les garçons. La taille maximale est en généra atteinte vers 16.5 ans chez les filles et de 18 ans chez les garçons.

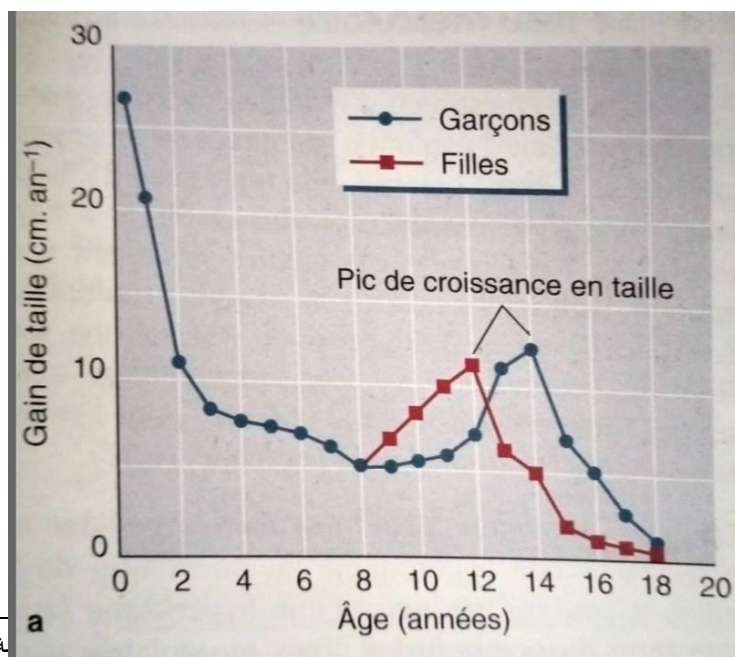
La courbe de croissance en poids suit une cinétique semblable à celle de la taille. Le pic de vitesse de croissance en poids survient en effet vers 12ans chez les filles et 14.5 ans chez les garçons.

La maturation des filles est en avance de 2 à 2.5 ans sur celle des garçons

Variation avec l'âge du gain de taille (a) et de poids(b)



ة-2 شار





2-Le tissu osseux

Les os, les articulations, les cartilages et les ligaments forment le support structural du corps. Les os fournissent aux muscles leurs points d'ancrage, protègent les tissus délicats, et sont des réservoirs de calcium et phosphore ; certains sont aussi impliqués dans la formation des lignées cellulaires du sang.

L'ossification varie dans le temps, en fonction des différents os, ceux-ci commencent à se souder au début de l'adolescence et l'ossification totale est achevée vers 20 ans, ce processus est terminé, en moyenne, quelques années plus tôt chez les filles.

Le calcium est un nutriment essentiel, tout particulièrement en période de croissance osseuse, puis plus tard dans la vie lorsque les os commencent à se fragiliser sous l'influence de l'âge. Une alimentation correcte est indispensable à la croissance normale des os.

L'exercice favorise une bonne croissance osseuse, il favorise le développement en épaisseur et augmente la densité et donc la résistance de l'os.

On considère que la puberté est une période particulièrement propice au développement de l'os en réponse à l'exercice.

3-Le tissu musculaire

La majorité des gains en masse musculaire surviennent à la puberté. Ils correspondent à la soudaine multiplication par 10 de la production de testostérone. On n'observe pas ce phénomène chez Les filles.

La prise de masse musculaire est le résultat d'une hypertrophie des fibres musculaires existantes dont le contenu en myofilaments et en myofibrilles augmente.

Le muscles s'allonge grâce à l'apparition de nouveaux sarcomères et à l'augmentation de longueur des sarcomères préexistants.

La masse musculaire atteint son maximum entre 16 et 20 ans chez les filles, et entre 18 et 25 ans chez les garçons. Il est cependant possible de l'augmenter au-delà de ces âges par l'entraînement et le régime alimentaire

4-Le tissu adipeux

Les cellules adipeuses peuvent accroître en taille et en nombre tout au long de la vie

Le stockage des graisses s'effectue par l'augmentation de volume des cellules adipeuses préexistences. Lorsque celles-ci sont saturées cela déclenche l'apparition de nouvelles cellules.

L'importance des dépôts de graisse accumulée dépend :

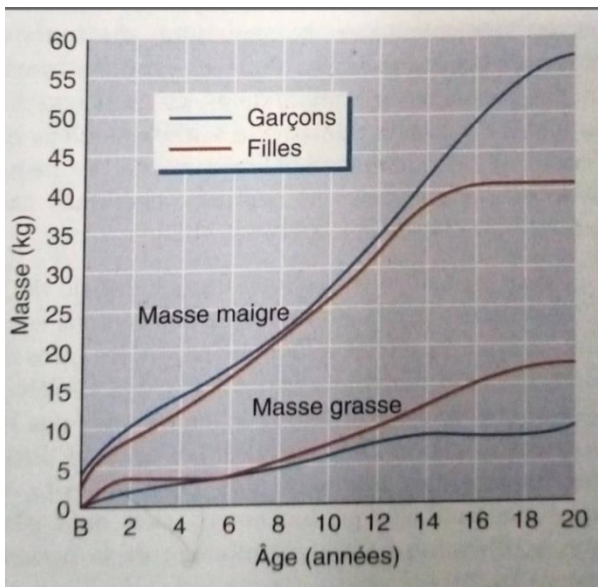
- du régime alimentaire
- de la qualité d'activité physique
- de l'hérédité



On ne peut rien contre l'hérédité mais on peut agir sur le régime alimentaire et sur le niveau d'activité physique

A maturation le taux de graisse corporelle est de 15% pour les garçons et de 25% chez les filles, ces différences sont d'origine hormonale propre a chaque sexe.

L'élévation des œstrogènes, à la puberté, chez les filles, affecte la masse musculaire et favorise surtout l'augmentation du tissu adipeux



Evolution de la masse maigre et la masse grasse, pendant les premières années, dans les deux sexes

5-Le tissu nerveux

Au fur et à mesure que se développe le système nerveux, les qualités d'équilibre, de souplesse, de motricité et de coordination s'améliorent,

Il faut atteindre la fin de la myélinisation des fibres nerveuses pour que puissent se développer les actions rapides et les mouvements spécialisés.

III- Adaptations physiologiques à l'exercice

La plupart des fonctions physiologiques évoluent jusqu'à la maturation, elles se maintiennent ensuite au même niveau, avant de décroître au fur et à mesure de l'avance en âge.

Certaines performances évoluent pendant la période de croissance, tel que :

- la force ;
- les fonctions cardio-vasculaire et respiratoire ;
- la fonction métabolique dont la capacité aérobie et la capacité anaérobie.



1- La force

La force augmente au fur et à mesure que la masse musculaire s'accroît avec l'âge, le pic de la force est atteint vers 20 ans chez les femmes et entre 20 et 30 ans les hommes.

La force s'améliore beaucoup plus à la puberté chez les garçons, en raison des modifications hormonales qui surviennent à cette période et qui entraîne un développement beaucoup plus important de la masse musculaire chez les hommes.

Les capacités musculaires dépendant de la maturation du système nerveux, il est impossible de développer des forces et puissances très importante, tant que le système nerveux de l'enfant n'a pas atteint sa pleine maturité

Chez les jeunes on ne note pas d'augmentation de la masse et dimensions musculaires mais les progrès seraient dus plutôt à:

- Une amélioration de la coordination motrice ;
- Une activité plus importante des unités motrices (et augmentation du nombre) ;
- À des adaptations nerveuses encore indéterminées

Les gains de force chez les adolescents sont d'abord liés aux adaptations nerveuses et à l'augmentation des dimensions musculaires, à partir de 20 à 35 ans les performances dans les activités de force diminuent environ 1% à 2% par an.

Afin de développer la force chez les enfants pré pubères certaines règles à prendre en charge

- Il est préférable de s'entraîner 2 à 3 fois par semaine à raison de 20 à 30 min
- Il ne faut jamais augmenter les charges tant que la technique n'est pas maîtrisée, chaque exercice peut comporter 2 à 3 séries de 6 à 15 répétitions ;
- Lorsque l'enfant est capable de répéter l'exercice 15 fois, on peut augmenter la charge de 0,5 à 1,4 kg

2- les fonctions cardio-vasculaire et respiratoire

Au repos et à l'exercice la pression artérielle est plus faible chez les enfants, elle évolue vers les valeurs adultes pendant l'adolescence.

La pression artérielle est en relation avec les dimensions corporelles.

Les dimensions du cœur ainsi que le volume sanguin total de l'enfant sont plus faible, donc son volume d'éjection systolique est aussi inférieur à celui de l'adulte.



En compensation, la fréquence cardiaque est plus élevée chez les enfants pour permettre un approvisionnement suffisant en oxygène pendant l'effort, Un plus fort pourcentage du débit cardiaque est dérivé vers le territoire musculaire

Les volumes pulmonaires augmentent jusqu'à l'âge adulte, à l'âge adulte la ventilation à l'exercice maximal est en relation directe avec la taille

3- La fonction métabolique/ l'aptitude aérobie

L'objectif des adaptations cardiovasculaires et respiratoire qui surviennent à différents niveaux d'exercice, et de satisfaire la demande musculaire en oxygène,

L'entraînement en aérobie chez les sujets prépubères n'a pas d'effet sur les valeurs de VO_{2max} . Pourtant sans augmentation de VO_{2max} , on constate une amélioration des performances en course avec des allures plus importantes. Mais toujours nettement plus faible (5% à 15%) que celles des adolescents et des adultes (15% à 25%).

Les progrès concernant VO_{2max} ne surviennent qu'à la puberté, et la capacité aérobie augmente parallèlement.

C'est La maturation des fonctions cardiaques et respiratoires pendant la croissance qui contribue à développer la capacité aérobie

Exprimée en $L \cdot min^{-1}$, VO_{2max} atteint sa valeur maximale entre 17 et 21 ans chez le garçon, entre 12 et 15 ans chez la fille puis décroît progressivement

- La fonction métabolique/ l'aptitude anaérobie

Les enfants ont des aptitudes anaérobies limitées, à l'exercice maximal ou sou-maximal, l'enfant n'atteint pas les mêmes concentrations de lactate que l'adulte, que ce soit dans le muscle ou dans le sang.

Cela traduit une activité glycolytique inférieure. Et les concentrations plus faible du lactate reflètent des concentrations inférieures en phosphofruktokinase, une enzyme clé de la glycolyse.

Les concentrations en ATP et en PCr, qui sont un des facteurs essentiels de la performance dans les activités explosives sont identiques à celles de l'adulte.

Par contre l'enfant est désavantagé dans les activités sollicitant la glycolyse



Les points faibles

- Manque de coordination motrice augmentant les dépenses énergétiques lors du mouvement ou de la course.
- Une adaptation thermique faible avec un risque de déshydratation supérieur à l'adulte et une sensibilité au froid plus grande.
- Une puissance musculaire plus faible.
- Une vo2Max plus faible.
- Une fréquence cardiaque de repos plus haute.
- Une sensibilité de type asthmatique plus fréquente.
- Une faiblesse posturale pouvant entraîner des troubles rachidiens.
- Une exposition aux maladies de croissance.

Les points forts

- Un gout spontané de découverte de son corps et de ses possibilités physiques.
- Avant la puberté peu de différenciation entre filles et garçons donc mixité possible lors de la pratique des jeux ou du sport.
- Une sagesse naturelle freinant le surentrainement
- Une bonne récupération.
- Une souplesse générale plus grande avec une laxité ostéo articulaire.
- Un gout pour le jeu sans notion de performance.

Conclusion

Il convient de rester prudent quant aux entrainement appliqués aux enfants pour limiter les risques d'accidents, de surentrainement, de démotivation, etc....

Il est certainement judicieux de proposer, aux jeunes, des activités physiques variées et ludiques, qui développent leur motricité et leur coordination. En obligeant leur système nerveux à s'adapter à différentes exigences

Pour cette raison, les enfants devraient pratiquer différentes activités afin d'acquérir de nouvelles compétences, apprendre de nouveaux mouvements et améliorer leur condition physique.

Les compétences acquises très jeunes pourront être utilisées tout au long de la vie



L'effet de l'altitude sur l'organisme : entraînement et stage

I-Introduction

II- Effets de l'altitude sur l'organisme

III-Protocole de stage et d'entraînement en altitude

IV-Hypoxie artificielle

V- L'alimentation en altitude : Réactions de l'organisme

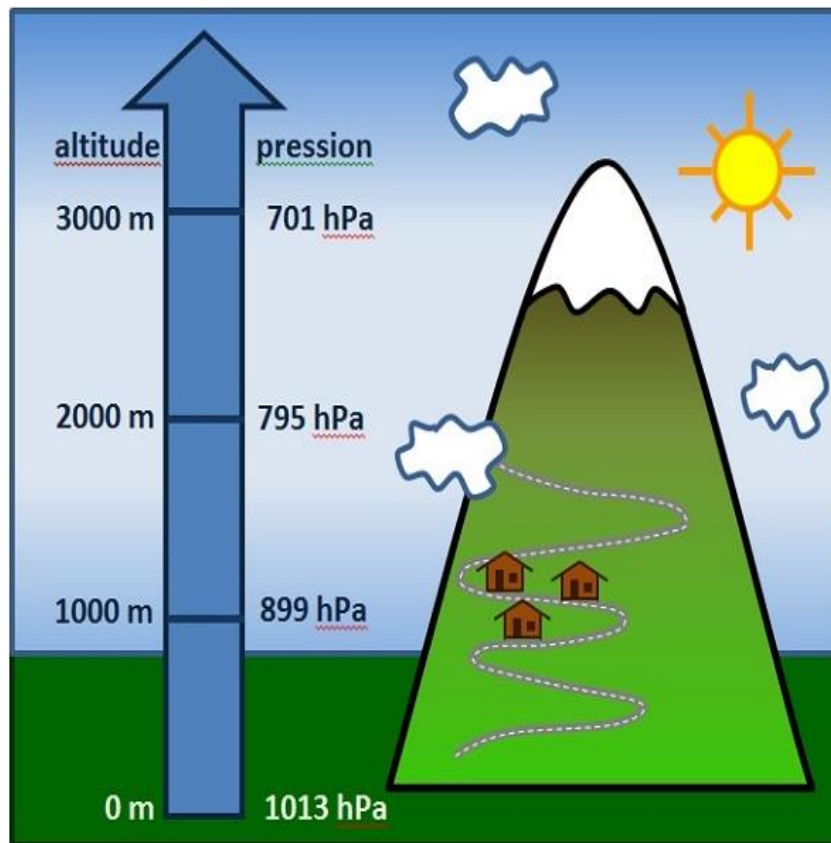
I- Introduction

Depuis les jeux olympiques de Mexico en 1968, les stages en altitude font partie de l'entraînement d'un grand nombre de sportif.

Parmi les effets recherchés se trouve l'augmentation de Hb en raison de l'environnement hypobare. Les répercussions sur l'organisme apparaissent au-delà de 1500m.

En plaine, dans une station de ski ou au sommet d'une montagne, l'air contient toujours la même quantité d'oxygène (20,9 %). Mais plus on monte en altitude, plus la pression atmosphérique et donc la pression en O₂ que nous inspirons diminuent

Elle réduit l'oxygénation de notre sang qui alimente l'ensemble de notre organisme. Heureusement, pour pallier ce manque, un certain nombre de réponses compensatoires se mettent en place à court et moyen termes.



L'altitude est un étonnant laboratoire à ciel ouvert du fait des différences de tolérance à l'hypoxie, très importantes entre les individus. Si certains sont capables de monter à plus de 8 000 mètres d'altitude alors que la pression en O₂ y est très faible, d'autres pourront tomber malades parfois gravement, lors d'un séjour à 3 500 mètres d'altitude, c'est le mal aigu des montagnes (MAM).

Plus on monte en altitude, moins la pression atmosphérique est forte.

Cette baisse de la pression atmosphérique entraîne une baisse de la pression en oxygène.

Moins de pression en oxygène = moins d'entrée d'oxygène dans les poumons et donc dans le sang.

II- Effets de l'altitude sur l'organisme :

L'hypoxie (manque d'O₂ dû à l'altitude) va provoquer des effets nuisibles sur l'organisme.

- Une diminution de la capacité à réduire les ions H⁺ à l'effort (on appelle cela la "fuite du pouvoir tampon")



- une saturation artérielle en oxygène anormale.
- Une augmentation du débit ventilatoire pour limiter un peu la baisse d'oxygène.
- le rein qui est sensible à cette baisse, libère en réponse une enzyme dans le sang (l'érythropoïétine) qui transforme une protéine plasmatique en érythropoïétine. La production d'EPO stimule alors la formation des globules rouges donc augmente Hb
- La viscosité du sang augmente sous l'effet de l'hypoxie
- le dérèglement neurovégétatif par une baisse de l'activité parasympathique et stimulation de l'activité sympathique.

Toutes ces adaptations que met en place l'organisme pour faire face à un exercice en situation d'hypoxie se maintiennent pendant quelques semaines et sont le fondement de l'entraînement en altitude.

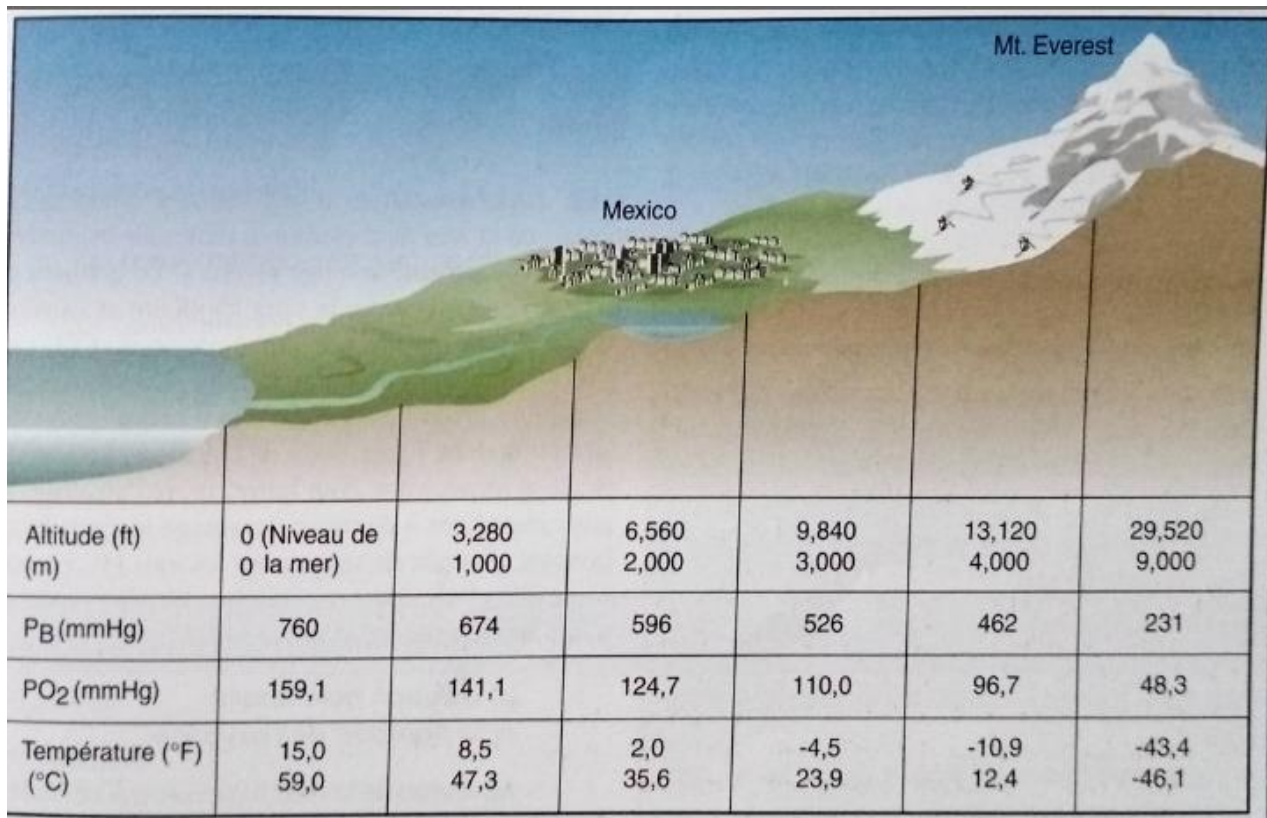
Plus l'altitude est élevée au-dessus de 2 000 m plus la réaction d'activation de l'EPO est sensible. Le pic de sécrétion est obtenu en 48 heures puis décroît progressivement sur 3 semaines.

L'effet maximal est donc obtenu en 3 semaines, et le nombre de globules rouges n'augmente plus après ce délai, même si le séjour en altitude se prolonge. Et si le taux d'hématocrite (rapport du nombre des cellules sanguines sur le volume sanguin) augmente légèrement au-dessus de 50 % (52 à 54 %) il n'atteint jamais les pourcentages que peuvent entraîner les injections d'EPO effectuées au titre du dopage (supérieurs à 60 %).

Autres effets de l'altitude

Diminution de la T° (1 °C/150 m), l'air froid est moins humide, en conséquence, l'air est plus sec, ces deux facteurs augmentent le risque liés au froid et à la déshydratation

- l'atmosphère étant moins dense et plus sèche, les radiations solaires sont plus intenses (UV et ionisantes).
- Diminution de l'hygrométrie.
- Diminution de la densité de l'air.
- Diminution de la gravité.



Différences des conditions atmosphériques entre le niveau de la mer et 9000m d'altitude.

Les conditions offrant des résultats optimaux semblent être les suivantes :

- Une durée d'exposition à l'hypoxie supérieure à 12 heures par jour.
- Une durée de stage entre 15 et 18 jours minimum
- Une altitude d'exposition comprise sur la zone proximale des 2700 mètres

Un consensus se dégage pour penser que la zone proximale des 2700 m (fourchette de 2500 à 2900 m) est celle qui va permettre le meilleur stimulus pour l'entraînement ou pour y résider.

III- Protocole de stage et d'entraînement en altitude :

En réaction à cette hypoxie, l'organisme s'organise progressivement :

Phase 1 : 2-3 jours, très important !

Dans cette phase d'acclimatation l'entraînement doit IMPÉRATIVEMENT reposer sur une dominante aérobie afin de respecter la période d'adaptation au stress liée au manque d'oxygène "stress hypoxique.



Il est INDISPENSABLE de laisser le temps pour que l'activité neurovégétative se régule.

Ce stress hypoxique sera pris en compte en diminuant les intensités de 10% environ et le volume d'entraînement de 25% pour ne pas perturber un organisme fragilisé. La prise en compte des valeurs de la variabilité de la FC sera très importante.

Il convient de respecter un temps de récupération un peu plus long que d'habitude entre les séances d'entraînement très intenses.

A chacun son rythme d'acclimatation

Sur cette phase d'adaptation il existe de très grandes variations entre les athlètes, l'individualisation est donc indispensable

Avec l'hypoxie on observe une augmentation de la ventilation alvéolaire, cette augmentation est très variable d'un athlète à l'autre, et cet aspect est malheureusement trop souvent négligé au cours des stages d'altitude ou les séances sont souvent faites en groupe

Pour certains sportifs 2-3 jours suffisent, pour d'autres la période dure jusqu'à 8 jours, cela a été développé par les travaux de JACK et WILLMORE vulgarisés dans la revue « Sport et Vie » (Sport et Vie n°124, Janvier 2011 "La montagne n'est pas la même pour tout le monde")

Phase 2 : 10 à 21 jours

La période d'acclimatation de cette période se découpe en deux temps :

Étape 1 : 5 à 6 jours avec des charges d'entraînement augmentant progressivement.

Étape 2 : sur les derniers jours de la période, les niveaux d'entraînement sont proches de ceux réalisés en plaine.

Phase 3 : au-delà des 3 semaines ce sera la phase d'adaptation avec notamment l'augmentation du nombre de capillaires musculaires.

La fin des stages des athlètes, est une phase de surcompensation ; donc un allègement des entraînements 1 à 2 jours avant la fin du stage pour prévenir la fatigue qui se mettra en place au moment de la redescente



Le retour à la maison

Attention si pendant quelques jours les bénéfices seront présents, aux environs du 10ème jour après le retour en plaine il existe parfois une nette baisse des performances.

Le séjour en altitude doit donc se structurer habilement par rapport à l'objectif

IV- Hypoxie artificielle

« Dormir en haut et s'entraîner en bas »

Une variante intéressante : la stratégie « Living High – Training Low » (LHTL) Levine et Stray-Gundersen (chercheurs américains) ont étudié ce principe qui permet de maintenir des séances d'entraînement en plaine, en dehors du stress de l'hypoxie, tout en tirant partie des avantages de l'hypoxie sur les temps de repos.

L'intérêt de cette méthode est donc de permettre de continuer à s'entraîner à des hautes altitudes

Pas facile à réaliser en environnement naturel... D'où la proposition de certains centres disposant de caissons hypobare ou de chambres dépressurisées aménagées pour mettre en place un environnement artificiel recréant les conditions de l'altitude en dehors des temps d'entraînement (centre de PREMANON en France par exemple).

V- L'alimentation en altitude : Réactions de l'organisme

Il faut donc porter une attention très particulière à l'hydratation et l'alimentation lors de séjour en altitude.

La viscosité du sang augmente sous l'effet de l'hypoxie. Au cours d'un stage en altitude le nombre de globules rouges (transporteur d'oxygène) augmente rapidement sur les 3-4 premiers jours puis plus lentement, c'est ce que l'on appelle une polyglobulie. (Les travaux de Friedmann).

Pour faire très schématique : l'espace dans les veines entre ces globules va donc mécaniquement se réduire ce qui aura pour conséquence la dégradation des membranes.

D'où l'intérêt d'avoir les membranes des globules rouges les plus souples possibles pour permettre une déformation qui limitera le processus de dégradation des membranes de ces globules.



On soignera ses apports en acides gras insaturés

Les acides gras insaturés ont la particularité d'assouplir et fluidifier les membranes des cellules et donc celles de nos globules rouges.

Il est conseillé donc lorsque vous êtes en altitude de consommer des aliments riches en antioxydants (Vitamine E, C par exemple) et tous les aliments riches en acides gras insaturés.

Conclusion

La programmation d'un séjour en altitude dans la préparation d'une compétition est toujours bénéfique, à condition d'avoir fait vérifier sa condition physique. Un tel séjour est en effet salutaire car il stimule les capacités d'adaptation de l'organisme à l'altitude, le soustrait à la pollution et lui vaut de bénéficier d'un environnement naturel attrayant.