



**ASPECTS PHENOMENOLOGIQUES
DE
L'ASTREINTE MUSCULAIRE**

Michel LESBATS

Rappels : Cours de physiologie des régulations 1^o année

coeur / pression artérielle

Que se passe-t-il au niveau musculaire pendant un travail musculaire à puissance constante (document n° 1) ?

• *L'adaptation momentanée* (individu non entraîné ; courbe type II) est le résultat d'un ensemble de modifications transitoires de notre physiologie pendant l'effort (respiration, activité cardiaque etc...)

• *L'adaptation à long terme ou entraînement* (individu entraîné ; courbe type I) est le résultat du développement durable de notre capacité physique à effectuer un travail musculaire.

Ces adaptations sont possibles grâce à des mécanismes régulateurs (cf cours 1ère année) qui peuvent être assimilées à des rétroactions négatives (feed-back négatif) dont l'objectif est de maintenir l'organisme dans des limites compatibles avec la vie.

• *L'âge a une influence défavorable sur l'adaptation au travail musculaire.* L'individu jeune possède de meilleures capacités physiques (courbe type I) que l'individu âgé (courbe type II).

I) LES ADAPTATIONS MOMENTANÉES

- 1,2 Kcal/min au repos (métabolisme basal)
- 7,5 Kcal/min : travail modéré
- 10 Kcal /min : travail dur bien supporté
- 12,5 Kcal/min : travail fatigant
- 15 Kcal/min : travail épuisant

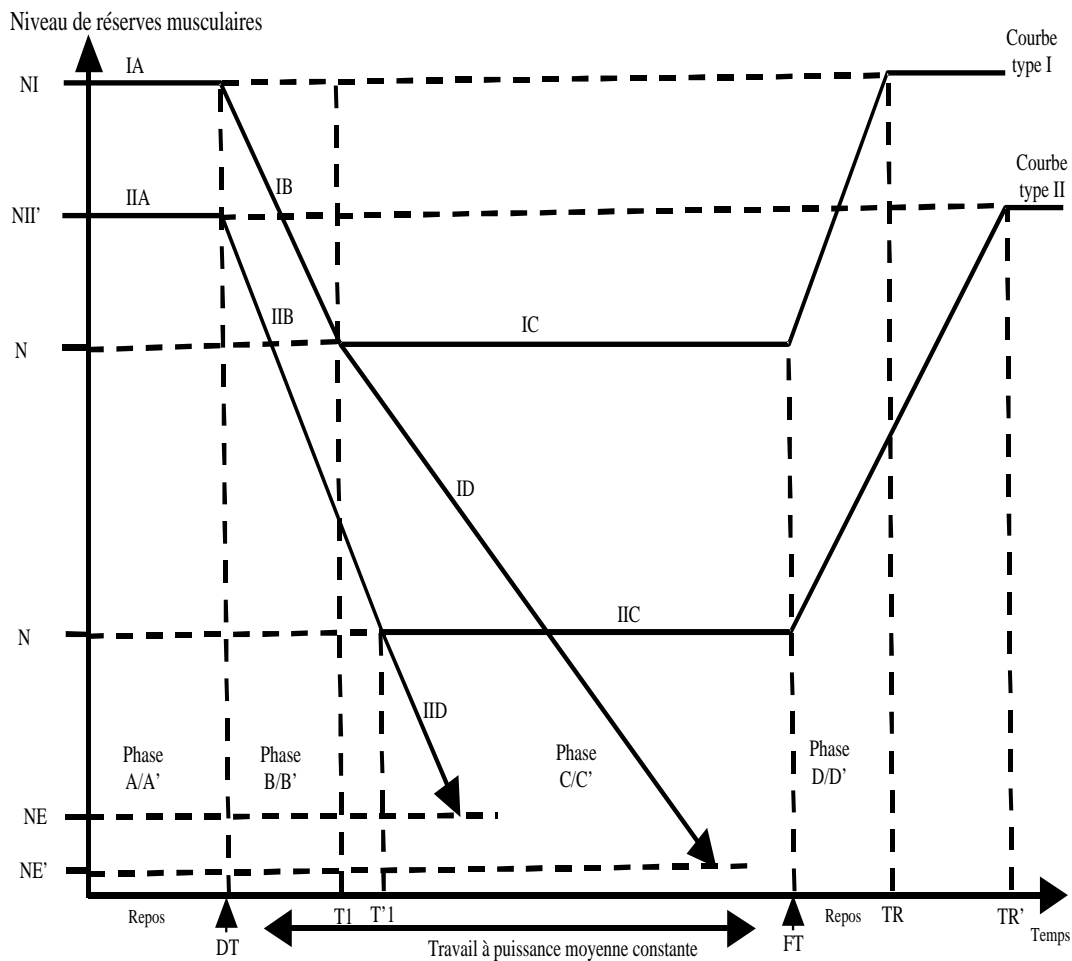
Au cours du travail musculaire une quantité importante d'énergie (ATP) est dépensée par unité de temps. Le rendement du *travail dynamique* est de 20 à 30 %. Donc 70 à 80 % de l'énergie totale transformée lors du travail se retrouve *gaspillée* sous forme de *chaleur qui augmente la température centrale de l'organisme.*

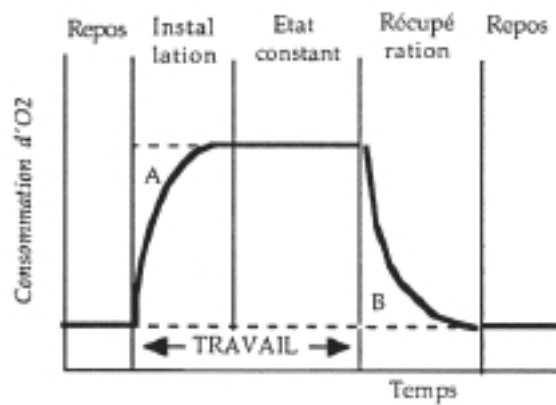
La dépense énergétique totale de l'organisme varie approximativement de 1,2 Kcal/min à 15 Kcal/min (cf tableau ci-contre) :

L'organisme doit, par unité de temps, fournir en abondance au muscle les métabolites dont il a besoin (oxy-

gène et glucose) et évacuer rapidement les déchets provenant de la contraction musculaire (CO₂ issu des mécanismes biochimiques de la respiration musculaire et l'acide lactique issu de la fermentation musculaire).

Ces exigences sont réalisées par *une augmentation des valeurs des paramètres ventilatoires (fréquence et amplitude)* ce qui fournit le supplément d'oxygène nécessaire et permet l'évacuation du CO₂, ainsi que par *une augmentation de la vitesse de la circulation sanguine* qui apporte les métabolites aux muscles et entraîne les déchets.





Augmentation de la consommation d'oxygène au cours du travail musculaire.

Au cours d'un travail modéré à puissance constante, la consommation d'oxygène n'augmente que progressivement. Le retour au niveau de repos est également progressif. La surface A correspond à la dette d'oxygène ; celle-ci est "payée" pendant la récupération. La surface B est supérieure à la surface A.

De plus l'organisme est confronté au problème de l'évacuation d'une importante quantité de chaleur résultant de l'activité musculaire. Ce problème est accentué lorsque le travail est effectué en ambiance chaude.

A - Les adaptations respiratoires

1. La consommation d'oxygène par unité de temps

Dès le début d'un travail musculaire réalisé à puissance constante on constate une *augmentation très rapide du débit ventilatoire* donc de la consommation d'oxygène (voir document ci-contre).

Mais la consommation d'oxygène ne s'établit pas d'emblée au niveau requis pour assurer un approvisionnement correct des muscles : l'état stable est atteint après un délai de 1 minute pour un travail léger, de 5 à 10 minutes pour un travail très intense. Pendant cette *période d'installation* la puissance fournie par les muscles est supérieure à celle que permet normalement la consommation d'oxygène : il s'installe donc un état de *dette en oxygène* (*surface A figure ci-contre*). Le muscle qui travaille en déficit d'oxygène doit :

- prélever celui-ci sur ses réserves (myoglobine) ; cette solution n'est efficace que pour un effort très bref.
- oxyder incomplètement le glucose en *acide lactique*, ce qui procure à peu près 18 fois moins d'énergie (ATP) qu'une oxydation complète, mais permet *de fournir momentanément la puissance complémentaire* nécessaire à la réalisation du travail musculaire lors de la phase d'installation (fermentation lactique).

Lors de cette phase d'installation, **de mise en régulation** ; les muscles sollicités fonctionnent en aérobiose partielle et en anaérobiose partielle.

Pendant la *phase de stabilité*, si la puissance de travail demandée n'est pas impossible à réaliser, les muscles reçoivent par unité de temps *l'oxygène nécessaire* à

leurs besoins, mais *la dette du début subsiste*, ce qui est marqué par la présence dans le sang d'une quantité plus élevée que la normale d'*acide lactique*. Cette augmentation de l'acidité du sang et l'augmentation de la pression partielle en CO₂, déclenche les réflexes interocceptifs d'adaptation ventilatoire à l'effort (cf cours 1ère année).

Lorsque le travail musculaire cesse, chacun sait que l'on ne *récupère* une ventilation *normale qu'après un certain délai*, qui peut dépasser 5 minutes pour un travail intense. Au cours de cette période *la dette en oxygène est compensée (surface B)* : la myoglobine récupère l'oxygène qu'elle stocke normalement, et le foie oxyde 1/5 de l'acide lactique du sang ce qui lui permet, grâce à l'énergie produite ainsi, de transformer à nouveau les 4/5 restants en glucose (*phase de récupération*). Le déficit énergétique musculaire est comblé : reconstitution des réserves musculaires en phosphocréatine.

La dette en oxygène peut atteindre au maximum 15 à 20 litres.

La consommation en oxygène, exprimée en cm³/minute est de :

- 250 : repos
- 1500 : travail "modéré"
- 2000 : travail "bien supporté"
- 2500 : "travail dur"
- 3000 ou plus : travail "épuisant"

Vers 3500cm³/minute environ, on constate que la consommation *ne peut plus augmenter*. Cette consommation maximale d'O₂ (VO₂ max.) ou *capacité aérobie* varie avec le degré d'entraînement et peut servir à apprécier celui-ci. Au-delà, le travail ne peut pas être prolongé plus de quelques minutes en raison d'un épuisement rapide (l'organisme augmente continuellement sa dette en oxygène). Il existe donc pour chaque individu une puissance de travail, appelé *puissance maximale aérobie* qui ne peut être dépassée, sauf pour des temps excessivement courts de l'ordre de la minute (voir document ci-contre).

2. Les adaptations ventilatoires

- 12 inspirations/minute au repos
- 15 pour un travail modéré
- 16 pour un travail dur bien supporté
- 20 pour un travail dur
- 30 ou plus pour un travail épuisant

Le débit ventilatoire est proportionnel à la consommation d'oxygène consommé par unité de temps, tant que celle-ci ne dépasse pas les 3/4 de la capacité aérobie. Au-delà les échanges deviennent moins efficaces et le débit ventilatoire *augmente plus vite* que la consommation d'O₂. Il peut atteindre 120 à 150 l par minute chez un individu moyennement entraîné et 170 l par minute chez un athlète (contre 6 l/minute au repos).

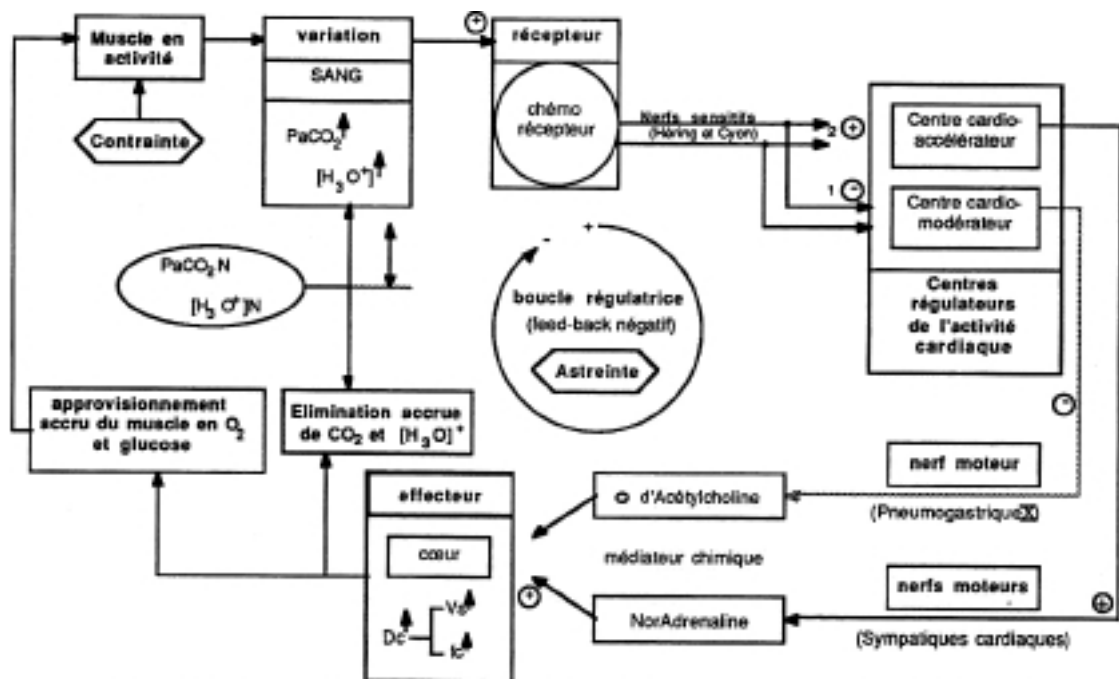
Le volume mobilisé par cycle respiratoire est de :

- 500 à 600 cm³ au repos (volume courant)
- 1800 pour un travail moyen
- 2500 pour un travail intense
- 5000 à 6000 pour le volume maximum mobilisable (capacité vitale)

Cette augmentation a pour origine *l'élévation de la fréquence* des mouvements ventilatoires (cf tableau ci-contre) :

Mais elle est due également à l'augmentation *du volume d'air* mobilisé à chaque cycle respiratoire (cf ci-contre). En effet on constate que pendant le travail musculaire les inspirations de l'opérateur deviennent plus amples et les expirations plus poussées (ventilation forcée).

Mais ce travail ventilatoire accru est lui-même fatigant : les muscles de la ventilation consomment d'autant plus d'oxygène qu'ils travaillent plus. Cette consommation s'ajoute à celle qui est due à la tâche accomplie par le sujet ; *la consommation d'oxygène* par minute ne croît donc pas proportionnellement à la puissance du travail effectué par le sujet, mais *plus vite* que celle-ci. On comprend que ceci impose une *limite* au rendement du travail musculaire.



Régulation nerveuse de l'activité cardiaque pendant l'effort musculaire : réflexes interoceptifs
 (PaCO₂ : Pression partielle en CO₂ dans le sang ; [H₃O⁺] : concentration sanguine en H₃O⁺ ; Dc, débit cardiaque ;
 Vs, volume d'éjection systolique ; fo, fréquence cardiaque)



On admet que la fréquence ventilatoire ne doit pas dépasser 18c/min pour qu'un travail soit acceptable (limite de sécurité). La zone ergonomique se situe aux alentours de 14c/min.

Cette *adaptation* de la ventilation pulmonaire aux besoins est *automatique*. Elle est déclenchée par la variation de la *composition chimique du sang* (accroissement de la pression partielle en CO₂ et de la concentration d'acide lactique), ainsi que par l'élévation de la température du corps.

Les *mouvements musculaires* effectués stimulent en outre des récepteurs sensoriels (mécanorécepteurs, propriorécepteurs) qui se trouvent dans les muscles et les articulations. Cette stimulation est le point de départ d'un réflexe qui aboutit à une augmentation du débit ventilatoire. Enfin un *effet psychologique* inconscient mais réel intervient également. Le simple fait de se concentrer sur la tâche à accomplir peut suffire à modifier le rythme ventilatoire. Ces deux derniers mécanismes expliquent le démarrage très rapide de l'hyperventilation pulmonaire au début du travail. Ils expliquent aussi pourquoi on a intérêt à "*s'échauffer*" (exercice modéré) avant d'entreprendre un effort important : on stimule ainsi à l'avance la ventilation, ce qui permet de *limiter la dette* en oxygène du début (cf explications cours 1ère année).

Dès l'arrêt du travail on constate que le rythme ventilatoire décroît plus vite que l'amplitude des mouvements ventilatoires.

B - Les adaptations circulatoires

L'augmentation d'efficacité ventilatoire serait inutile si le sang ne circulait pas plus vite et n'était pas plus abondant dans les muscles (afin d'y apporter plus d'oxygène et d'y éliminer plus de CO₂ par unité de temps). En outre le sang apporte le glucose nécessaire à l'énergétique de la contraction musculaire et élimine les

déchets, en particulier l'acide lactique dont l'accumulation dans le muscle cause les crampes.

1. Les modifications de rythme et de débit cardiaques

Le signe le plus spectaculaire, et le plus facile à mesurer, est *l'accélération du rythme cardiaque et du volume d'éjection systolique*. La fréquence cardiaque augmente dès les premières secondes du travail musculaire, puis au bout d'une trentaine de secondes, l'accélération se poursuit bien plus lentement. Lors des *exercices modérés* effectués à puissance constante la fréquence cardiaque finit par *se stabiliser* (plateau) ; une observation attentive montre qu'elle continue à augmenter très lentement (voir réflexe de base page précédente).

La fréquence cardiaque stabilisée est proportionnelle pour un individu donné, à la puissance demandée. Toutefois elle ne peut dépasser un maximum qui se situe entre 165 et 195 battements/minute. Cette *fréquence maximum* est atteinte pour un "travail" de puissance égale à la *puissance maximale aérobie*. Les **facteurs ventilatoires et le facteur cardiaque se conjuguent donc pour imposer une limite à la puissance maximum que l'on peut développer.** (voir tableau ci-après)

Puissance du "travail"	Fréquence cardiaque en Rc/mn	Température rectale en °C
Travail très léger	<75	37
Léger	75-100	37-37,5
Modéré	100-125	37,5-38
Dur	125-150	38-38,5
Très dur	150-175	38,5-39
Extrêmement dur	>175	>39

Il faut noter qu'une partie de l'accélération cardiaque est liée à *l'élévation de la température* du corps. Ceci explique que pour un travail très intense, l'augmentation du rythme cardiaque puisse être continue, surtout si la

température extérieure est élevée. (voir tableau ci-dessus)

On admet que la fréquence cardiaque en plateau ne doit pas dépasser, pour rester acceptable, dépasser la valeur de 120 battements/minute (limite de sécurité). La zone ergonomique se situe entre 75 et 90 battements/minute.

Mais le débit cardiaque est influencé non seulement par la fréquence, mais aussi par le *volume d'éjection systolique*. Pour un individu non entraîné ce volume est de 80 cm³ par battement, en moyenne. Il s'élève au maximum, toujours pour un individu non entraîné, à 105 cm³. Cette valeur est atteinte pour un travail effectué à 50 % de la puissance maximale aérobie. Au-delà, seule l'élévation de la fréquence permet d'augmenter le débit. Lorsqu'on arrive au voisinage de la fréquence maximum le volume d'éjection systolique diminue car le rythme est trop rapide pour que la contraction soit pleinement efficace. Le débit cardiaque maximum est de l'ordre de 21 à 28 l/minute.

Après l'arrêt du travail le rythme cardiaque revient progressivement à la valeur de repos, mais *la récupération est plus lente* que pour le rythme respiratoire car une partie de l'accélération cardiaque est liée à *l'évacuation de la chaleur* produite par l'exercice musculaire (voir la notion de pulsations cardiaques thermiques dans le cours d'hygrothermique).

Classification du niveau de travail musculaire (niveaux d'activité)

Dépense énergétique totale ; débit ventilatoire, V ; fréquence respiratoire, fr ; quotient respiratoire, Q.R. ; fréquence cardiaque fc et taux des lactates sanguins, au repos et pour différents niveaux d'activité

(modifié d'après WELLS et Cool. 1957)

Niveau d'activité	dépense énergétique totale		V (l/min)	fr (c/min)	Q.R.	fc (Rc/min)	Lactates (mg p.100)
	O ₂ (ml/min)	(kcal/min)					
Repos	250	1,2	8	12	0,83	70	10
Travail :							
Léger	750	3,5	20	14	0,85	100	10
Modéré	2500	7,5	35	15	0,85	120	10
Travail dur :							
optimal	2000	10	50	16	0,9	140	15
fatigant	2500	12,5	60	20	0,95	160	20
Travail intense :							
maximal	3000	15	80	25	1,00	180	50-60
épuisant	>3000	>15	120	30	>1,00	180	>60

2. Les modifications de la circulation vasculaire

L'activité musculaire entraîne une importante dilatation des artères et des capillaires des muscles en activité, ce qui permet d'augmenter fortement la circulation du sang à leur niveau ainsi que la surface d'échange sang-muscle. Le débit sanguin peut passer de 2,5 - 4 cm³/minute pour 100 g de muscle au repos à 200 cm³/minute pour 100 g de muscle pendant un travail important.

Dès que la force développée par le muscle atteint 50% de sa valeur maximum, la pression qui règne dans la masse musculaire bloque la circulation pendant la phase de contraction. Cet inconvénient devient particulièrement gênant pendant le travail statique. (explication de la gêne posturale).

On constate en effet que le débit sanguin devient nul pour un travail statique entraînant une contraction égale à 70 % de la force maximum du muscle.

Parallèlement à vasodilatation des muscles actifs, on observe une vasoconstriction généralisée de l'ensemble des territoires non actifs (précédée par une phase transitoire de vasodilatation). Cette vasoconstriction réduit la circulation sanguine dans ces régions au profit des muscles en activité.

Un phénomène comparable affecte l'ensemble du système veineux du corps afin de transférer une quantité non négligeable de sang vers les poumons et le réseau artériel. C'est pourquoi les personnes qui ont une déficience de la circulation veineuse sont peu aptes au travail musculaire.

Dans les poumons le débit sanguin augmente car de nombreux capillaires, habituellement fermés, s'ouvrent alors, ce qui augmente l'efficacité des échanges gazeux.

Enfin on observe une vasodilatation générale de la peau, dont le but est de favoriser les mécanismes d'évacuation vers l'extérieur de l'excès de chaleur dégagée par l'activité musculaire (voir documents sur l'astreinte hygrothermique).

En conséquence la pression systolique s'élève et peut atteindre 175 - 180 mm de mercure, la pression de diastolique est peu affectée.

3. Tableau récapitulatif (voir ci-contre)

Extrait de "Physiologie du travail" - J. SCHERRER
(Masson)

	VO ₂ max	V max
- individu moyen	3 l / minute	110 l / minute
- individu entraîné	4 l / minute	130 - 140 l / minute
- athlète	5 l / minute à 5,5 l / minute	170 l / minute et plus

	Vol. de repos (ml)	Vol. max. (ml)
- individu non entraîné	70	105
- individu entraîné	105	156

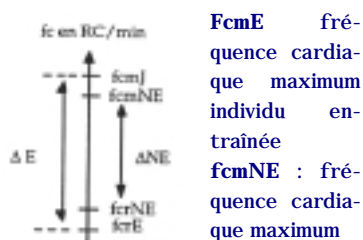
II) LES ADAPTATIONS A LONG TERME : L'ENTRAINEMENT

Les exercices physiques répétés, effectués dans de bonnes conditions (sport, marche à pied, travail physique) déclenchent progressivement chez le sujet tout un ensemble de modifications organiques qui *améliorent les capacités* de travail musculaire et l'état de santé général. Toutes les améliorations ont une **origine musculaire** (voir document 1 p. 17).

A - LES MUSCLES (muscles striés squelettiques)

Lorsque les muscles travaillent régulièrement *le réseau des capillaires se développe fortement* (l'augmentation peut atteindre 40 %). Ces muscles sont donc mieux alimentés pendant l'exercice, *la fatigue locale est moindre*. Ils sont également mieux irrigués au repos, ce qui permet un meilleur développement de leurs fibres, donc *une augmentation de la force maximale* qu'ils peuvent développer. Les muscles d'individus entraînés contiennent un taux de réserve plus élevé que les muscles des individus non entraînés (voir document 1. courbe I et courbe II au verso).

B - L'APPAREIL VENTILATOIRE (muscles inspireurs expirateurs)



individu non entraîné
fcrNE : fréquence cardiaque de repos
individu non entraîné
fcrE : fréquence cardiaque de repos
individu entraîné

Comme l'effort physique sollicite les muscles de l'appareil respiratoire, ceux-ci se développent à leur tour.

On observe une *augmentation de la capacité vitale* (qui passe de 5,5 litres chez un individu non entraîné à 7 ou 8 litres chez les athlètes) ainsi qu'une *augmentation du volume courant* (volume d'air mobilisé au repos). Ceci assure une *meilleure oxygénation* du sang par unité de temps. *L'accélération ventilatoire* est donc plus *modérée* que chez un individu non entraîné, ce qui entraîne un confort ventilatoire. Ces améliorations sont possibles car les muscles de la cage tho-

racique (inspirateurs et expirateurs) se développent sous l'effet du travail qui les sollicite, et leur action est plus efficace.

La capacité aérobie (VO₂ max) et le débit ventilatoire maximum (V_{max}) augmentent également (tableaux ci-contre).

C - LE COEUR (muscle strié cardiaque)

Le coeur bénéficie également de l'exercice physique : le myocarde se développe (c'est-à-dire que les parois se musclent) de telle sorte que *l'efficacité cardiaque augmente* : le volume d'éjection systolique est supérieur à celui d'un individu non entraîné. (voir tableau page précédente).

Ceci permet aux individus entraînés d'avoir *une fréquence cardiaque plus faible au repos* (coeur lent des athlètes par augmentation du tonus vagal). L'individu bien entraîné possède donc une *marge d'adaptation* E bien plus grande que l'individu non entraîné NE ; comme les contractions cardiaques sont plus efficaces l'accélération cardiaque reste plus modérée que chez l'individu non entraîné..

D - CONCLUSIONS

L'entraînement permet d'atteindre plus rapidement l'état stationnaire, et de réduire la durée de la phase de récupération des rythmes cardiaque et ventilatoire après l'effort : ceci entraîne une dette en oxygène plus faible donc une fatigue plus modérée pour la même contrainte musculaire.

L'entraînement améliore la puissance maximum qui peut être fournie pendant le travail, la durée maximum possible de l'effort pour une puissance donnée, la vitesse de récupération.

III) LES EFFETS DE L'AGE

A partir de 40 ans l'ouvrier doit faire l'objet d'une surveillance particulière car l'âge a une influence *défavorable* sur l'adaptation au travail musculaire (voir doc. 1 ci-après).

Volumes en litres	entre 20 et 30 ans	entre 50 et 60 ans	entre 60 et 65 ans
Volume résiduel	1,5	1,9	2,35
Capacité vitale	5,7	4,72	4,17
Débit ventilatoire max. en l / minute	122	65,3	64,7

A - EFFETS SUR LA VENTILATION PULMONAIRE

Un certain nombre de paramètres de la ventilation pulmonaire évoluent avec l'âge. On constate *une augmentation du volume résiduel*, ce qui entraîne un *renouvellement moins efficace* de l'air dans les poumons, une réduction de la *capacité vitale*, et *une diminution importante du débit ventilatoire maximum*.

La mesure d'autres paramètres montre que pour fixer par unité de temps la même quantité d'oxygène, le sujet âgé doit effectuer un travail ventilatoire plus important que le sujet jeune.

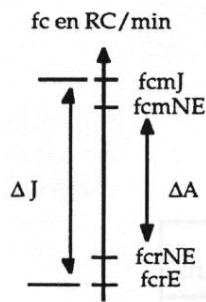
Enfin chez un sujet de plus de 40 ans ne se livrant pas de façon habituelle à une activité physique, *les possibilités d'adaptations respiratoires sont réduites...*

B - EFFETS SUR LA CIRCULATION

A partir de 40 ans *la fréquence cardiaque de repos s'accroît et le débit cardiaque diminue* (baisse d'efficacité du travail cardiaque). Pour une même contrainte musculaire, le coeur bat d'autant plus vite que le sujet est plus âgé. Or *la fréquence cardiaque maximale décroît avec l'âge* (195 Rc/mn à 20 ans, 185 Rc/mn à 30 ans, 165 Rc/mn à 60 ans).

La conjonction de ces divers phénomènes entraîne une sérieuse limitation de la puissance maximale fournie . Enfin la durée de la *phase de récupération est plus longue chez le sujet âgé*.

A ces variations physiologiques normales peuvent se superposer des *variations pathologiques*. A l'occasion



fcmJ : fréquence cardiaque maximum individu jeune.
fcmA : fréquence cardiaque maximum individu agé
fcrNE : fréquence cardiaque de repos individu non agé

d'une enquête portant sur un groupe de 100 ouvriers de 50 à 64 ans, on a pu observer 12 électrocardiogrammes anormaux au repos et 52 suspects ou franchement anormaux au cours du travail musculaire : enfin 32 sujets avaient une pression artérielle trop élevée.

En effet diverses maladies dégénératives peuvent toucher le coeur ou les vaisseaux. Leur fréquence augmente fortement avec l'âge. *L'hypertension* peut avoir plusieurs causes (cf cours 1ère année) ; elle rend le travail statique soutenu particulièrement dangereux car il s'accompagne d'une importante élévation de la tension. Diverses altérations des vaisseaux peuvent avoir une influence défavorable sur l'aptitude au travail musculaire : *l'artérioclérose* s'accompagne de fragilité des artères, de risques d'obstruction et d'hypertension, *l'artérite* des membres inférieurs entraîne une sévère réduction de la circulation dans les jambes, *l'atteinte des veines* qui rend le retour du sang vers le coeur difficile, est la cause de l'enflure des membres (oedème).

Enfin il est évident qu'avec l'âge les petites artères et les capillaires, dont la dilatation permet une abondante irrigation des muscles au travail, perdent leur élasticité. Pendant l'effort *la circulation locale est alors insuffisante*.

Les individus agés ont une fréquence cardiaque de repos (fcrA) plus élevée que celle d'un individu jeune (fcrJ). Les individus agés ont une fréquence cardiaque maximale (fcmA) plus faible que celle d'un individu jeune (fcmJ).

L'individu jeune possède donc une marge d'adaptation, J bien plus grande que l'individu agé, A.

BIBLIOGRAPHIE

- **Physiologie du travail (Ergo CIER, (Masson et Cie).nomie)**
J. SCHERRER, (Masson et Cie).

On pourra également consulter :

- **Précis de Physiologie, Tome 4**
H. HERMANN et J.F. CIERS