

LE METABOLISME AEROBIE EN ALTITUDE

1. Les adaptations cardio-respiratoires

C.Y. Guézennec ; P. Bouissou

Directeur du laboratoire de Physiologie Métabolique du Centre d'Etudes et de Recherches en Médecine Aérospatiale (CERMA) à Brétigny (91), spécialiste de l'endocrinologie de l'athlète, le professeur Yannick Guézennec est aussi un sportif accompli, grand amateur des disciplines d'endurance (marathon, triathlon...) et enfin cavalier passionné par la médecine sportive équine. Membre du Comité de Rédaction *d'EquAthlon*, il nous propose à partir de ce numéro une nouvelle rubrique qui donnera la parole aux médecins du sport. Pour débiter, nous vous présentons le premier article d'une série qui concernera les particularités de l'exercice physique en altitude, un sujet qui intrigue de nombreux cavaliers et entraîneurs : quels sont les effets bénéfiques ou néfastes de l'entraînement en altitude ? Quel intérêt pourrait présenter la préparation physique en situation d'hypoxie pour le cheval-athlète ?

MODIFICATIONS DE LA CAPACITE AEROBIE

La consommation maximale d'oxygène ($VO_2\max$), élément déterminant de la performance en effort prolongé (voir *EquAthlon* Vol. 1, 2, juin 1989), est diminuée par l'élévation en altitude. L'importance de cette réduction dépend principalement de l'altitude à laquelle est exposé l'individu (Figure 1), mais aussi de son degré d'acclimatation et de son niveau d'entraînement. Le $VO_2\max$ est diminué à partir de 1500 m d'altitude, et chaque élévation de 300 m entraîne une réduction de 1,5 à 3,5% du $VO_2\max$. Cette chute se produit généralement durant les trois premiers jours d'exposition à l'altitude.

Durant la période d'acclimatation, le $VO_2\max$ peut monter

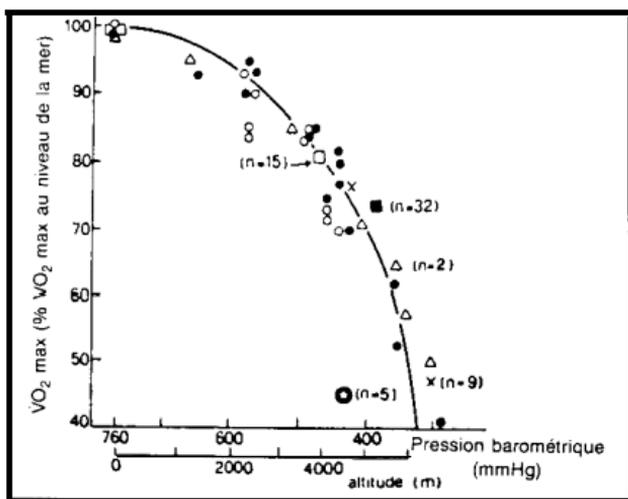


Figure 1 : Réduction de la consommation d'oxygène maximale en fonction de l'altitude ou de la pression barométrique (d'après CERRETELLI, 1981).

une amélioration, sans toutefois revenir à sa valeur initiale. Il existe une grande variabilité de comportement à cet égard, que l'on peut attribuer en partie au niveau d'entraînement initial des sujets. Certains travaux ont mis en évidence une réduction plus importante du $VO_2\max$ chez les sujets sédentaires que chez les sujets entraînés. A l'inverse, SALTIN (1967), en comparant des étudiants en éducation physique et des athlètes de haut niveau, a noté, à une altitude moyenne (2000 m), une diminution plus importante du $VO_2\max$ chez les athlètes.

Ces résultats ne sont pas nécessairement contradictoires. Il est, en effet, possible de penser que le stress hypoxique soit ressenti davantage par un sujet sédentaire que par un sujet entraîné, au cours d'un exercice maximal, si l'on considère que l'exercice représente, en soi, un stress plus important pour un sujet peu ou pas entraîné. Mais des facteurs liés à la motivation pourraient aussi entrer en ligne de compte.

oblige à une réduction de son niveau d'entraînement, et donc de sa capacité de travail.

Les ajustements ventilatoires et circulatoires qui affectent le transport de l'oxygène et le métabolisme énergétique aérobie, au cours de l'exercice, sont modifiés par l'élévation en altitude.

LA VENTILATION - LE TRAVAIL VENTILATOIRE.

Pour une même puissance absolue de travail, la ventilation pulmonaire (VE) est plus élevée en altitude qu'au niveau de la mer. Une plus grande VE est nécessaire en altitude pour atteindre d'oxygène (Figure 2).

L'élévation de la ventilation pulmonaire avec l'altitude est minimisée, si l'on compare les mêmes puissances relatives d'exercice (pourcentage du $VO_2\max$ mesuré respectivement en altitude et au niveau de la mer). A une puissance maximale de travail (100% du $VO_2\max$), VE croît avec l'altitude durant la

Même après une période d'acclimation prolongée, la VE reste plus élevée en altitude, mais correspond toutefois à une puissance de travail absolue plus importante.

Le coût énergétique du travail ventilatoire est directement proportionnel au volume ventilé, mais dépend aussi de la densité de l'air inspiré. Au niveau de la mer, le coût de la respiration, au cours d'un exercice maximal, a été estimé à 3,3% de la dépense énergétique totale pour un sujet sédentaire. Ce coût peut atteindre 8,3% chez un athlète entraîné possédant une ventilation pulmonaire importante. En altitude, il est bien établi que la VE augmente, cependant la résistance de l'air diminue parallèlement à sa densité. Bien que pour une VE donnée, le travail respiratoire soit réduit de 20% à 3500 m d'altitude du fait de la moindre densité de l'air, au cours de l'exercice, le coût du travail ventilatoire est plus élevé en altitude (de l'ordre de 2 à 5% en fonction de l'état d'entraînement). A un niveau maximal de consommation d'oxygène, le travail ventilatoire atteindrait une valeur maximale à 5800 m : il serait alors 30% plus élevé qu'au niveau de la mer. Ces calculs montrent que :

1) la diminution de la résistance de l'air ne permet pas de compenser pour l'augmentation de la ventilation ;

2) les athlètes possédant une VE élevée sont davantage pénalisés lors d'un exercice intense réalisé en altitude même moyenne.

D'un point de vue fonctionnel il ne semble toutefois pas que l'augmentation du travail ventilatoire en altitude constitue une limite réelle à la puissance aérobie. Cependant, cette réponse hyperventilatoire pourrait être

RESUME 1

La capacité du système aérobie est progressivement réduite à partir d'une altitude de 1500 m surtout pendant les premiers jours d'acclimation. Ensuite, les sujets s'adaptent aux nouvelles conditions et récupèrent, seulement partiellement, leur capacité aérobie habituelle. Curieusement, les athlètes auraient plus de difficultés à s'adapter.

Si des sujets entraînés sont comparés à des athlètes de haut niveau, le stress hypoxique devient plus pénalisant pour un athlète habitué à un entraînement journalier à haute intensité, et pour qui l'élévation en altitude

phase initiale d'exposition. Cependant, pour des altitudes extrêmes (supérieures à 6000 m), la VE mesurée au cours d'un exercice maximal est proche de celle mesurée au niveau de la mer.

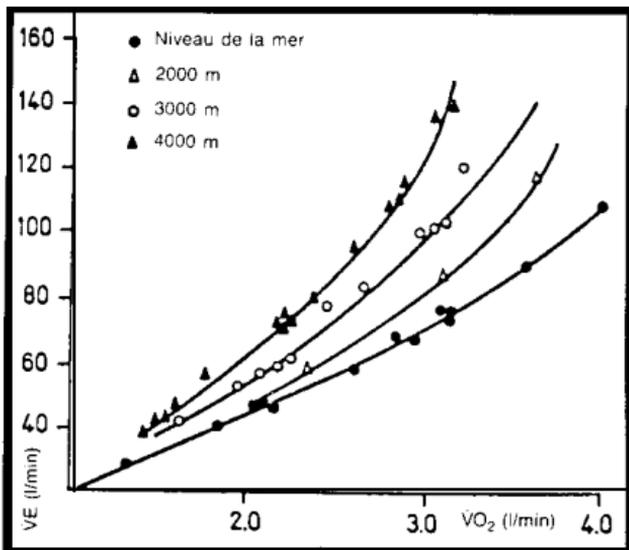


Figure 2 : Ventilation pulmonaire (VE) à l'exercice à différentes altitudes en fonction de la consommation d'oxygène.

associée à l'apparition précoce des signes de fatigue.

LA CIRCULATION.

Pendant un exercice sous-maximal.

Lors d'hypoxie aiguë, un plus grand débit cardiaque (Qc) est nécessaire pour soutenir une puissance absolue d'exercice sous-maximal. Pour une même puissance relative (en pourcentage de VO₂max), cette augmentation du Qc sous-maximal disparaît. Après une période de 10 à 15 jours d'acclimatation, le Qc, pour une même intensité absolue d'exercice, a été rapporté identique ou même diminué. Cette réduction du Qc sous-maximal peut s'expliquer par la réduction du volume d'éjection systolique (Qs) consécutif à la diminution du volume plasmatique observé en altitude.

La pression artérielle à l'exercice augmente plus en conditions d'hypoxie prolongée (15 jours à 3 semaines) qu'en normoxie ou en hypoxie aiguë ; dans les mêmes

peu sensibles au repos. La distribution du débit circulatoire aux muscles squelettiques actifs ne paraît cependant pas être modifiée en altitude.

Enfin, aucune augmentation de la libération d'oxygène aux muscles actifs ne vient compenser la réduction du Qc sous-maximal. Ces observations confirment indirectement l'augmentation de la contribution des sources énergétiques anaérobies et, en particulier, de la glycolyse, lors d'un exercice sous-maximal réalisé dans un environnement hypoxique. Toutefois, cette hypothèse est en contradiction avec un certain nombre d'études qui ont rapporté une VO₂ comparable au niveau de la mer et en altitude, au cours d'exercices sous-maximaux prolongés.

Pendant un exercice maximal.

Les données concernant les modifications du débit cardiaque maximal en altitude ne sont pas totalement concordantes. Une réduction de Qcmax a été obser-

RESUME 2

Les changements des qualités physiques de l'air en altitude induisent des modifications de la mécanique ventilatoire. Pour compenser la raréfaction en oxygène, le volume d'air ventilé dans les poumons augmente et les efforts respiratoires nécessaires s'accroissent également.

conditions, les résistances périphériques à l'exercice diminuent moins en hypoxie qu'en normoxie (il y aurait là un effet spécifique de l'hypoxie sur les récepteurs vasculaires). Il est à noter que ces variations de pression et de résistances, nettes à l'exercice, sont

vée après quinze jours d'acclimatation à 4300 m, chez des sujets sédentaires, entraînés et chez des athlètes de niveau international. A l'inverse, à une altitude similaire ou inférieure, d'autres travaux ne rapportent aucune différence de Qcmax. Lorsqu'une diminution

du Q_{cmax} a été observée, elle était associée à :

1) une diminution de la fréquence cardiaque maximale, qui pourrait résulter d'un effet direct de l'hypoxie sur le noeud sinusal, ou d'une augmentation des concentrations plasmatiques de potassium ;

2) une réduction du volume d'éjection systolique maximal (Q_{smax}) associée à la réduction du volume plasmatisque due à l'hypoxie.

Mais si l'on observe une réduction du volume plasmatisque en altitude, par contre le volume sanguin total n'est pas diminué, et même souvent augmenté. Il n'y a donc vraisemblablement pas de diminution du retour veineux. De plus, il a été montré une forte diminution du débit coronarien maximal, après acclimatation à 3000 m. Ce phénomène pourrait ne pas être totalement compensé par une augmentation de l'extraction de l'oxygène par le myocarde. Il pourrait donc en résulter une diminution de l'efficacité myocardique, et une diminution de l'état inotrope (la puissance de contraction) du myocarde.

Dans les prochains numéros d'*EquAthlon*, la série sur l'exercice physique en altitude abordera successivement l'utilisation des substrats énergétiques et les adaptations enzymatiques à l'altitude, puis les adaptations morphologiques et métaboliques du muscle squelettique. Nous l'achèverons par une réflexion sur l'intérêt de l'entraînement en altitude et des applications possibles au cheval-athlète.

LEXIQUE

Hypoxie : c'est la baisse de la pression partielle de l'oxygène (pO_2) dans l'air inspiré qui résulte de la réduction de pression atmosphérique en altitude. Cette hypoxie "environnementale" provoque une hypoxie artérielle (baisse de la pression partielle en O_2 dans les artères) et force l'organisme à s'acclimater à l'altitude en réponse à ce "stress hypoxique".

Normoxie condition de pression partielle d'oxygène normale (par exemple, au niveau de la mer)

VE ventilation pulmonaire exprimée en litres d'air ventilés par les poumons par minute.

VO₂max consommation maximale d'oxygène, exprimée le plus souvent en litres d'oxygène consommés par les tissus et par minute, ou rapportée au poids corporel (en litres / minute / kg)

Q_c débit cardiaque exprimé en litres de sang véhiculés par le coeur par minute

Q_s volume d'éjection systolique en millilitres, c'est le volume de sang expulsé à chaque contraction cardiaque

Puissance absolue puissance d'exercice exprimée en Watts

Puissance relative puissance d'exercice rapportée à la puissance maximale aérobie correspondant à la VO_2max (s'exprime donc en pourcentage de la VO_2max).

RESUME 3

En phase d'acclimatation à l'altitude, le débit cardiaque à l'exercice s'élève pour compenser la moindre charge en oxygène du sang, puis en 10 à 15 jours il redevient identique à celui observé à basse altitude. Au cours d'un exercice intense en altitude, le muscle cardiaque, moins bien irrigué, se contracte moins efficacement. On constate aussi une élévation de la pression artérielle, une baisse de la fréquence cardiaque maximale, une réduction du volume plasmatisque et une augmentation du volume sanguin total.