

L'EXERCICE PHYSIQUE EN ALTITUDE

2. Les métabolismes énergétiques

C.Y. GUEZENNEC ; P. BOUISSOU

Dans le numéro précédent, nous avons évoqué les adaptations cardiovasculaires et respiratoires de l'athlète en altitude. Nous poursuivons cette série par l'étude du métabolisme énergétique en situation d'hypoxie. Les résultats expérimentaux présentés laissent entrevoir certaines contradictions : dans certaines situations, l'exposition à l'altitude stimule le métabolisme aérobie; dans d'autres cas, particulièrement en très haute altitude, l'hypoxie marquée rendrait plutôt prépondérantes les voies de la glycolyse anaérobie.

CONTRIBUTION RELATIVE DES DIFFÉRENTES SOURCES ÉNERGETIQUES

Le coût énergétique, pour une même puissance absolue de travail, est identique au niveau de la mer et en altitude. Il a été suggéré que la fraction d'énergie produite par le métabolisme aérobie diminue, et que la fraction produite par le métabolisme anaérobie est augmentée.

Ainsi, des auteurs ont montré une augmentation du temps nécessaire au VO₂ (consommation d'oxygène) pour atteindre l'état stable, et une augmentation du déficit d'oxygène en début d'exercice. Cette modification du rapport énergie aérobie/énergie anaérobie en altitude résulterait essentiellement en une augmentation de la composante lactacide (Figure 1).

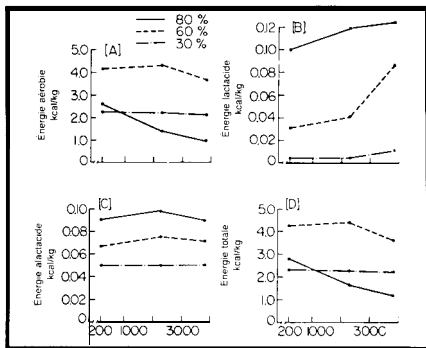


Figure 1: Contribution des diverses voies métaboliques à la fourniture d'énergie au cours d'exercices de puissances variées (exprimées en % de VO₂max), en fonction de l'altitude

UTILISATION DES SUBSTRATS ENERGETIQUES EN ALTITUDE

Les modifications des réserves tissulaires de glycogène dépendent du niveau d'hypoxie, de la durée d'exposition et du tissu considéré. A l'état de repos, on constate une réduction des réserves de glycogène musculaire chez des sujets maintenus 2-3 semaines à plus de 4000 m d'altitude. De

GLYCOGENE MUSCULAIRE : les réserves baissent...

même, chez le Rat soumis à un environnement hypoxique prolongé, apparaît une réduction des réserves hépatiques de glycogène, alors que la concentration en glycogène myocardique, après une baisse les premiers jours, tend à s'élever. La baisse des réserves de glycogène hépatique et musculaire peut s'expliquer par un effet inhibiteur de l'hypoxie sur l'activité des enzymes limitants de la glycogénèse, mais aussi par les effets anorexiques de l'altitude.

Au cours de l'exercice physique, l'hypoxie réduit l'utilisation du glycogène musculaire. Il est bien connu qu'une économie des réserves de glycogène musculaire apparaît dans les situations provoquant une mobilisation accrue des acides gras, telles que l'entraînement ou l'administration de caféine. Dans chacune de ces situations, le niveau de mobilisation des acides gras détermine directement leur utilisation comme substrat énergétique. La mobilisation des acides gras est augmentée en altitude et leur concentration plasmatique est plus élevée qu'au niveau de la mer, au cours d'exercices réalisés en situation d'hypoxie aiguë ou chronique, ainsi que chez les sujets natifs et résidant en altitude.

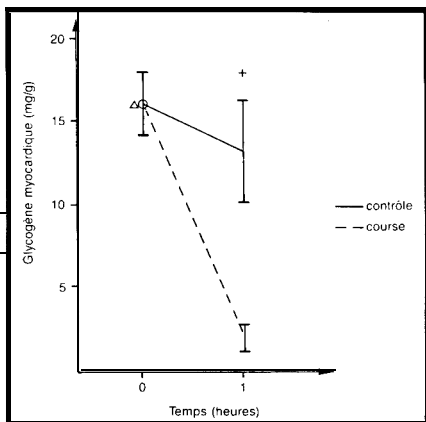


Figure 2 : Réduction des réserves de glycogène myocardique chez le Rat au cours d'une course en hypoxie.

Les fortes concentrations plasmatiques d'acides gras libres, en altitude, pourraient être dues à une réduction de la captation et de la combustion d'acides gras par le muscle squelettique. Bien qu'il n'existe pas de mesures directes du taux de renouvellement des acides gras au cours de l'exercice en altitude, cette hypothèse semble peu vraisemblable.

LIPIDES : la mobilisation

Premièrement, l'élévation des concentrations plasmatiques de glycérol que l'on constate également, est un indice indirect d'une augmentation réelle de la mobilisation des acides gras. Deuxièmement, certaines observations indiquent une nette diminution de la

consommation de glycogène musculaire lors d'un exercice de 30 minutes en altitude, consommation qui ne peut être compensée par l'utilisation accrue du glucose extra-cellulaire.

Toutefois, l'hypothèse d'une utilisation accrue des lipides en situation d'hypoxie peut, à plusieurs égards, sembler paradoxale. Dans certaines études, l'utilisation de puissances absolues de travail identiques, en hypoxie et en normoxie, constituait des puissances relatives d'effort (en pourcentage de VO_{2max}) plus élevées en hypoxie et pour lesquelles la dépense énergétique était essentiellement assurée par la dégradation du glycogène musculaire. De plus, ces observations peuvent être comparées à celles faites en situation d'hyperoxie, dans les-

quelles la mobilisation et l'utilisation des acides gras libres à l'exercice sont aussi rapportées augmentées. Il faudrait donc admettre que des stimuli opposés quant à la disponibilité en O₂, pour les muscles en activité, produiraient des effets identiques sur la mobilisation et l'utilisation des acides gras libres à l'exercice.

La production hépatique de glucose, au repos, est plus élevée chez les résidents en altitude, mais elle est inchangée chez les sujets acclimatés. Des données récentes montrent qu'au cours d'un exercice prolongé en hypoxie aiguë, la production hépatique de glucose est doublée par rapport à celle observée lors d'un même exercice en situation de normoxie.

Cette libération accrue de glucose hépatique est associée à une plus grande captation de lactate par le foie. Cela confirme la possibilité d'une gluconéogenèse augmentée sous l'effet de l'hypoxie.

La baisse des réserves de glycogène hépatique observée en altitude, qui est un puissant stimulus de l'activité des enzymes de la gluconéogenèse, pourrait favoriser la production de glucose néoformé en altitude. Par ailleurs, l'augmentation de l'activité nerveuse sympathique et de la catécholaminémie, au cours d'un effort en situation d'hypoxie, pourrait également stimuler la production hépatique de glucose.

Dans le cas d'une hypoxie sévère (5000 m), on note qu'une heure de course sur tapis roulant épuise les réserves de glycogène myocardique alors qu'elles sont peu affectées en normoxie (Figure 2). Cette observation témoigne d'une forte augmentation de la glycogénolyse dont le stimulus pourrait être la chute de

la pression partielle d'oxygène (PO₂) tissulaire en-dessous d'un "point critique" à partir duquel les oxydations mitochondriales décroissent fortement. Des tra-

HYPOXIE : il existe un point critique pour les oxydations cellulaires.

vaux réalisés sur le Rat ont montré que le "point critique" est atteint quand la saturation en oxygène de l'hémoglobine est inférieure à 50% et, plus particulièrement pour le myocarde, lorsque la PO₂ capillaire est proche de 10 mmHg. Or, une telle désaturation de l'oxyhémoglobine intervient à une pression partielle d'O₂ beaucoup plus basse que celle résultant d'une exposition à une altitude de 5000 m.

La stimulation de la glycogénolyse myocardique à l'effort survient donc avant que la disponibilité en O₂ soit un facteur limitant du métabolisme tissulaire, ce qui suggère que l'hypoxie stimule la glycogénolyse indépendamment de l'utilisation de l'oxygène par la cellule. Ce phénomène peut être attribué soit à une stimulation neuro-hormonale, soit une diminution de la charge énergétique de la cellule (baisse du rapport ATP/ADP).

Il est donc probable que la stimulation de la glycolyse, sous l'effet d'une hypoxie modérée, soit le résultat d'une stimulation de l'activité des enzymes limitantes de cette voie, par le biais d'une régulation dépendante de l'état énergétique de la cellule.

Afin de résumer ces données qui paraissent contradictoires, on peut essayer de dresser un tableau de l'orientation des voies métaboliques, en fonction de l'altitude.

- Lors d'un exercice à une **altitude moyenne (inférieure à 4000 m)**, la lipolyse et la gluconéogenèse sont stimulées, entraînant une épargne du glycogène musculaire et myocardique.

- Si l'hypoxie s'accroît (**altitude supérieure à 5000 m**), des processus intracellulaires stimulent fortement la glycolyse, entraînant une déplétion rapide des réserves tissulaires en glycogène.

Enfin, pour des altitudes extrêmes (> 7000 m), il est probable que l'on atteigne le seuil critique de la PO₂ tissulaire à partir duquel l'oxydation mitochondriale diminue fortement et la glycolyse anaérobie devient prépondérante.

Toutefois, il faut noter qu'il existe très peu de données expérimentales concernant l'exercice physique dans ces conditions d'altitudes extrêmes.

LEXIQUE :

- **Glycogène** : forme de stockage hépatique et musculaire de l'énergie glucidique.

- **Gluconéogenèse** : réactions biochimiques permettant la resynthèse de glucose à partir de divers substrats (lactate, glycérol, acides aminés...)

* **Acides gras libres** : forme circulante de l'énergie lipidique.

* **Oxydations mitochondriales** : réactions spécifiques du métabolisme aérobie