

Entraînement en altitude : théorie, modèles et conséquences nutritionnelles

Stéphane PALAZZETTI

(Docteur ès Sciences du Sport, Coach spécialiste des activités de longue distance,
ldpcoaching@free.fr)

Chez les spécialistes des activités d'endurance, il est de croyance bien répandue qu'un séjour d'entraînement en altitude permet d'améliorer la capacité de performance au niveau de la mer et/ou en plaine. Ce sujet très passionnant, et fort complexe, continue de faire débat dans la communauté scientifique. Nous allons au cours de ce développement présenter les aspects théoriques qui sous-tendent cette croyance et évoquer les nouvelles stratégies appliquées et perspectives.

Aspects théoriques...

L'air atmosphérique est constitué d'oxygène (O_2), de dioxyde de carbone, d'azote et de gaz rares. L' O_2 présent dans l'air atmosphérique est le comburant essentiel de la contraction musculaire. Il favorise la transformation de l'énergie chimique, issue des aliments ingérés, en énergie mécanique. La fraction d' O_2 (ou % d' O_2) (FO_2) contenue dans l'air atmosphérique n'est pas modifiée par l'altitude. En effet, que l'on soit au sommet du Mont-Blanc à 4807 m ou sur la promenade des Anglais à Nice, la FO_2 est égale à 20,95%. En revanche, avec l'altitude, c'est la pression barométrique qui diminue. Cela a pour conséquence, entre autre, de diminuer la pression partielle en O_2 (PO_2) de l'air atmosphérique. Cette diminution de la PO_2 est responsable de la diminution de la pression alvéolaire en O_2 et donc de la baisse de la saturation de l'hémoglobine en O_2 ; l'hémoglobine étant la protéine de transport de l' O_2 dans l'organisme *via* les globules rouges (ou érythrocytes). L'apport en O_2 aux tissus est donc diminué, et en conséquence le travail mécanique musculaire. Ces réactions en chaîne, consécutives au phénomène d'hypoxie, sont responsables de la diminution de la capacité de performance en endurance. Si l'exposition à cette situation de stress environnemental se poursuit dans le temps, des processus adaptatifs vont se mettre en place.

Dans un premier temps, afin de compenser la baisse de la pression alvéolaire en O_2 , le débit ventilatoire va augmenter, et cela dès les premières heures d'exposition à l'altitude. Cette première adaptation va permettre de contrebalancer le processus de désaturation de l'hémoglobine en O_2 et donc d'améliorer le travail mécanique musculaire. Dans un deuxième temps, après quelques jours d'exposition à l'altitude, la masse érythrocytaire totale et la concentration en hémoglobine du sang vont augmenter. Ces adaptations hématologiques, responsables de l'amélioration de la capacité à fournir de l' O_2 aux tissus, résultent de la stimulation de l'érythropoïèse, favorisée par une hormone naturelle produite au niveau rénal principalement : l'érythropoïétine (ou EPO). La sécrétion de cette hormone est dépendante de l'apport d' O_2 aux cellules sécrétrices, et donc de la PO_2 . Enfin, dans un troisième temps et après plusieurs semaines d'exposition à l'altitude, des adaptations tissulaires locales, responsables de l'amélioration de la capacité à utiliser l' O_2 au niveau des tissus, vont apparaître telle qu'une augmentation de la capillarisation musculaire, de la concentration en myoglobine et de la densité mitochondriale.

Toutes ces adaptations physiologiques et cellulaires, observées en réponse à un séjour en altitude (ou hypoxie), sont réversibles après quelques jours d'arrêt d'exposition. Ces adaptations sont bien évidemment dépendantes de l'altitude d'exposition, de la durée du séjour d'exposition et de la charge d'entraînement imposée lors du séjour d'exposition. Tous ces facteurs mettent en éveil la complexité du processus.

Approche traditionnelle de l'entraînement en altitude...

L'approche traditionnelle de l'entraînement en altitude est de vivre et de s'entraîner à une altitude modérée (1600 à 2500 m) en milieu naturel. On trouve de part le monde de nombreux sites d'entraînement en altitude qui sont localisés notamment en Amérique du Nord (Colorado Springs (1850 m), Boulder (1600 m), Albuquerque (1600-2200 m)), en

Europe (Font Romeu (1850 m), Sierra Nevada (2320 m)) et sur le continent africain (Ifrane (1650), Nyahururu (2350 m)).

Cette approche traditionnelle de l'entraînement en altitude n'est pas toujours accompagnée des effets positifs escomptés sur la capacité de performance en endurance au niveau de la mer et/ou en plaine.

Plusieurs explications peuvent être proposées :

- En altitude, nous l'avons vu, la saturation de l'hémoglobine en O₂ diminue. A même intensité relative d'exercice, l'intensité absolue en altitude est diminuée comparativement au travail réalisé en plaine. Exemple, courir à 100% de VO₂ max à Font Romeu et à Nice ne s'effectuera pas à la même vitesse de course. Ainsi, à cette intensité d'exercice, la fréquence et l'amplitude de la foulée seront modifiées en altitude. Cette diminution des stimulations mécanique et neuromusculaire aura inévitablement des répercussions négatives sur la performance au niveau de la mer et/ou en plaine.
- Dormir en altitude en milieu naturel ou en condition simulée (tente hypoxique) peut altérer la qualité du sommeil. Cela aura inévitablement des répercussions négatives sur la capacité de récupération et pourrait générer un état de surentraînement « involontaire ».
- L'acclimatement à la chaleur, préalable à un séjour en altitude, va être altéré après quelques jours d'exposition. Un élément à ne pas négliger, lorsque l'objectif compétitif se déroule dans des conditions chaudes.

Conséquences nutritionnelles d'une exposition à l'altitude...

Jusqu'à 5000 m d'altitude, la diminution de la masse corporelle, consécutive à une baisse de la masse grasse et de la masse musculaire, peut facilement être prévenue par le maintien d'une alimentation adéquate. Aucune altération de l'absorption intestinale en macronutriments n'est rapportée jusqu'à cette altitude. Une altitude qui est bien évidemment incompatible avec un séjour d'entraînement, tel que nous l'entendons. Toutefois, en dehors des principes alimentaires que nous avons déjà précisé lors des précédents numéros de Trimag Europe, certains d'entre eux méritent que l'on y apporte une attention toute particulière.

A) **L'hydratation...** En altitude, la baisse de la pression barométrique influe non seulement sur la pression partielle en O₂, comme nous l'avons vu précédemment, mais également sur la pression partielle en eau. L'air en altitude est sec et l'organisme se déshydrate plus rapidement. Il est donc fortement recommandé de veiller à adopter une stratégie hydrique optimale afin (1) de limiter la diminution du volume sanguin (plasmatique) dont les répercussions sur le travail mécanique seront négatives (la viscosité sanguine étant responsable de l'altération de l'apport en O₂ aux tissus) et (2) d'optimiser le processus de récupération qui est fondamental pour pouvoir entreprendre un entraînement de qualité.

B) **Le fer...** Comme nous l'avons vu lors du précédent numéro de Trimag Europe, cet élément trace est un élément structural majeur de l'hémoglobine. Lors de la première phase d'un séjour en altitude, l'érythropoïèse va être activée. Afin que ce processus soit optimisé, les réserves en fer de l'organisme doivent être suffisamment importantes pour permettre notamment la synthèse d'hémoglobine. De ce fait, Il faudra particulièrement veiller à apporter suffisamment de fer dans sa ration alimentaire les semaines qui vont précéder un séjour programmé en altitude. Par ailleurs, durant le séjour, il est recommandé d'accroître ses apports en fer afin de limiter l'épuisement des réserves, dont les conséquences pourraient être fâcheuses à moyen et long terme.

Pour rappel : Davantage que la quantité de fer présente dans un aliment, c'est la forme chimique du fer qui constitue le facteur déterminant de sa vitesse et de son taux d'absorption. Le fer héminique présent dans l'hémoglobine et la myoglobine des chairs animales (viandes, poissons, fruits de mer, volailles, abats) est absorbé entre 5 et 35%. Le fer non héminique présent dans les céréales complètes, les légumes secs (lentilles...), les fruits secs (abricots, dattes, figes, raisin...), les légumes (épinards, fenouils, petits pois,

germes de soja...), les produits laitiers est absorbé entre 2 et 20%. La consommation de certains aliments va faciliter l'absorption intestinale du fer non héminique tels que la viande, la volaille, les poissons et différents acides organiques, en particulier l'acide ascorbique (ou vitamine C). En revanche, la consommation de polyphénols, de tannins présents dans le thé et le café, d'acide phytique présent dans les graines complètes, les légumes, les lentilles, les noix..., de calcium, de zinc, de sels de calcium et de phosphates, et certains types de protéines telles que les protéines de soja, ainsi que différentes formes de fibres alimentaires (son...), va réduire l'absorption du fer non héminique notamment en raison des interactions alimentaires.

C) **Les antioxydants**...En altitude, le « stress oxydant », qui traduit le déséquilibre entre la production de radicaux libres et la capacité de protection antioxydante cellulaire, est augmenté. L'exercice physique, combiné à de faibles apports alimentaires en antioxydants contribuent à renforcer ces effets. Il est donc particulièrement recommandé de privilégier une alimentation riche en fruits et légumes lors d'un séjour en altitude afin de diminuer les dommages cellulaires et optimiser la qualité de l'entraînement. Pour rappel, les antioxydants exogènes, que l'on retrouve dans les fruits et les légumes, tels que les vitamines (C, E), les caroténoïdes, les oligoéléments (sélénium, zinc, cuivre, manganèse) et les phytonutriments jouent, de façon complémentaire et en synergie, un rôle majeur dans la régulation du système de défense antioxydant endogène.

D) **Les glucides**... La réalisation d'un exercice en altitude induit une plus forte oxydation des glucides comparativement au même exercice réalisé en plaine. Il faudra donc être vigilant à apporter suffisamment de glucides (1) pendant l'entraînement, afin de limiter l'épuisement des réserves glycogéniques et optimiser le travail musculaire et (2) après l'entraînement, afin de permettre la reconstitution des réserves et d'optimiser la qualité des séances d'entraînement suivantes. Il sera donc recommandé d'apporter au minimum 7 à 10 g de glucides par kg de masse corporelle et par jour lors d'un séjour en altitude.

Nouvelles approches d'exposition à l'altitude...

Au milieu des années 90, une nouvelle approche scientifique de l'entraînement en altitude a été proposée. Celle-ci permet aux athlètes de vivre et de récupérer en altitude modérée (2500 m) et de s'entraîner à de faibles altitudes (< 1250 m). Par cette approche, la qualité de l'entraînement (intensité) est maintenue, et donc le risque de désentraînement est réduit. Toutefois, tous les sportifs n'ont pas la possibilité d'appliquer en milieu naturel cette stratégie du « vivre haut, s'entraîner bas » et en particulier en raison des contraintes géographiques et matérielles que cela impose. Par ailleurs, afin de réduire le coût financier et la logistique nécessaire à la mise en place d'une telle procédure d'exposition à l'altitude, les manufacturiers en collaboration avec les scientifiques ont développé des « environnements d'altitude artificiels » qui simulent les conditions d'hypoxie. Ces tentes ou chambres hypoxiques, particulièrement développés aux Etats-Unis, permettent de recréer un environnement d'altitude en condition normobare (niveau de la mer ou en plaine).

L'utilisation de systèmes permettant de recréer artificiellement les conditions d'altitude permet de réduire les déplacements entre le lieu d'habitation et les sites d'entraînement, qui parfois peuvent être importants, et donc favorise le processus de récupération.

Différents modèles d'entraînement en altitude sont proposés dans la littérature scientifique. Nous en avons retenus 4 (voir tableau ci-dessous) :

	<i>Modèle</i>	<i>Procédure</i>	<i>Principaux effets rapportés dans la littérature scientifique</i>
1	Vivre bas et haut , s'entraîner bas	Exposition intermittente à l'hypoxie au repos en plaine (hypoxie simulée en condition normobare ¹) de longue durée (> 12 heures/j)	<ul style="list-style-type: none"> * Amélioration du coût énergétique à l'exercice sous-maximal ; * Amélioration de la capacité de performance à l'exercice sous-maximal et maximal. * Adaptation ventilatoire ; * Stimulation de l'érythropoïèse ; * Augmentation de la capacité tampon du muscle squelettique.
2	Vivre bas et haut , s'entraîner bas	Exposition intermittente à l'hypoxie au repos en plaine (hypoxie simulée en condition normobare) de courte durée (1 à 3 heures/jour)	<ul style="list-style-type: none"> * Amélioration du coût énergétique à l'exercice sous-maximal.
3	Vivre haut , s'entraîner haut (lors des séances d'entraînement réalisées à des intensités d'exercice sous-maximales jusqu'au SV2) et bas (lors des séances d'entraînement réalisées à des intensités maximales voir supra-maximales)	Exposition intermittente à la normoxie en condition d'exercice en altitude (normoxie simulée en condition hypobare ²) ou en milieu naturel	<ul style="list-style-type: none"> * Augmentation du VO2 max ; * Amélioration de la capacité de performance en endurance. * Stimulation de l'érythropoïèse.
4	Vivre bas , s'entraîner haut (lors des séances d'entraînement réalisées au SV2) et bas (lors des séances d'entraînement réalisées à des intensités maximales voir supra-maximales et des intensités inférieures au SV2)	Exposition intermittente à l'hypoxie en condition d'exercice en plaine (hypoxie simulée en condition normobare) ou en milieu naturel	<ul style="list-style-type: none"> * Augmentation du VO2 max ; * Augmentation du temps limite au VO2max ; * Augmentation de la vitesse de course au seuil de la lactatémie maximale d'état stable. * Amélioration de la fonction mitochondriale.

SV2 = seuil d'inadaptation ventilatoire (~ seuil anaérobie)

¹ Hypoxie simulée en condition normobare : altitude simulée au niveau de la mer en modifiant le mélange d'air respiré et recrée par un générateur relié à un masque ou sous une tente hypoxique ; un mélange enrichi en azote et reproduisant la PO₂ d'altitude souhaitée.

² Normoxie simulée en condition hypobare : niveau de la mer simulé en altitude en respirant un mélange d'air enrichi en O₂ par l'intermédiaire d'un masque.

Pour la 1^{ère} procédure présentée, dans le tableau ci-dessus, la durée minimale d'exposition intermittente requise, permettant d'induire les adaptations, est de 18 jours, dont 6 nuits passées à 2500 m (phase de pré-acclimatation) et 12 nuits passées à 3000 m.

Il est à noter que les signes d'adaptation observés disparaissent 15 jours après l'arrêt d'une telle procédure d'exposition intermittente. Il existe toutefois des prédispositions génétiques de certains athlètes qui s'adaptent avec de moindres doses d'exposition.

Par ailleurs, les premiers résultats préliminaires relatifs à la 4^{ème} procédure (2 séances hebdomadaires d'interval training au SV2 en hypoxie durant 6 à 8 semaines combinées avec des séances réalisées en normoxie au niveau de la mer) nous laissent penser que cette stratégie pourrait être la plus efficace pour induire des adaptations musculaires à l'étage

moléculaire. Cette procédure a l'avantage de perturber au minimum les habitudes de vie des athlètes et de permettre de conserver la qualité de l'entraînement.

Quelle pourrait être la meilleure stratégie ?

Au vu des données de la littérature scientifique, une procédure d'exposition en 2 phases pourrait être proposée :

Phase 1 : application de la procédure 3, en milieu naturel, durant une dizaine de jours, afin d'induire des adaptations ventilatoires et hématologiques ;

Phase 2 : application de la procédure 4, en simulant la condition d'hypoxie, durant 6 à 8 semaines, afin d'induire des adaptations cellulaires. Une phase qui se terminerait une dizaine de jours avant l'objectif compétitif.

Réponses adaptatives variables selon les individus...

Les réponses adaptatives consécutives à une procédure dite « d'exposition à l'altitude » sont variables. Cette variabilité interindividuelle dépend (1) de la capacité physiologique d'acclimatement à l'hypoxie (stimulation de l'érythropoïèse) et (2) de la capacité à s'entraîner à des intensités proches de celles du niveau de la mer (ou en plaine). En d'autres termes, on va retrouver des athlètes qui vont « répondre » et d'autres pas à une procédure d'exposition à l'hypoxie. Des causes génétiques sont avancées par les scientifiques.

En résumé...

Les modalités d'entraînement en altitude ont évolué ces dernières années. A l'approche traditionnelle de l'entraînement en altitude « vivre haut, s'entraîner haut » s'est substituée une approche d'exposition intermittente à l'hypoxie, en condition naturelle ou artificielle, en condition de repos ou d'exercice. La stratégie nutritionnelle à adopter lors d'un séjour en altitude ou lors d'une exposition intermittente à l'hypoxie n'est pas très différente de la stratégie alimentaire à adopter chaque jour. Il est toutefois important de veiller très précisément à optimiser ses apports hydriques, en fer, en vitamines et minéraux antioxydants et en glucides.

Références bibliographiques

Billat V (2003) Physiologie et méthodologie de l'entraînement – De la théorie à la pratique (2^{ème} Edition). De boeck edition, 224 p.

Brugniaux JV, Schmitt L, Robach P, Nicolet G, Fouillot JP, Moutereau S, Lasne F, Pialoux V, Saas P, Chorvot MC, Cornolo J, Olsen NV, Richalet JP (2006) Eighteen days of "living high, training low" stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners. *J Appl Physiol* 100(1): 203-11.

Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD (1998) Individual variation in response to altitude training. *J Appl Physiol* 85(4): 1448-1456.

Katayama K, Sato K, Matsuo H, Ishida K, Iwasaki K, Miyamura M (2004) Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol* 92: 75-83.

Kayser B (1994) Nutrition and energetics of exercise at altitude. *Sports Med* 17(5): 309-323.

Levine BD (2002) Intermittent hypoxic training: Fact and fancy. *High Alt Med Biol* 3(2): 177-193.

Ponsot E, Dufour SP, Zoll J, Doutreleau S, N'guessan B, Geny B, Hoppeler H, Lampert E, Mettauer B, Ventura-Clapier R, Richard R (2005) Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. Part II: Improvement of mitochondrial properties in skeletal muscle. *J Appl Physiol*

Rusko HK, Tikkanen HO, Peltonen JE (2004) Altitude and endurance training. *J Sports Med* 22: 928-945.