



ALTITUDE ET ENTRAÎNEMENT EN SKI...

INFO DOCUMENT :

Édité par le Département Sportif et Scientifique de la F.F.S
version : Avril 2003

Groupe de travail : Nicolas Coulmy, Paul Robach, Marie Philippe Rousseau Blanchi,
Laurent Schmitt, Samuel Vergès.

Introduction générale :

L'altitude - environnement dans lequel la disponibilité en oxygène est réduite par diminution de la pression atmosphérique (hypoxie hypobarique naturelle) - est utilisée dans la préparation physique des athlètes depuis plusieurs décennies (depuis la préparation des JO en 1968 à Mexico, altitude de 2200 mètres). La diminution de la pression barométrique induit une hypoxie barométrique naturelle : $PIO_2 = (PB - 47) \times FiO_2$ mmHg. (1)

Dans ce contexte, les équipes sportives résident et s'entraînent classiquement dans un centre situé en altitude moyenne (1800-2400m) pendant 2-4 semaines. Deux buts distincts peuvent être recherchés par cette méthode : 1) préparer une compétition et/ou améliorer une performance en altitude ; 2) augmenter la performance lors du retour en basse altitude. Ce type de préparation

physique, très particulier, s'adresse en premier lieu aux disciplines sportives aérobies. Néanmoins, l'altitude peut également présenter des avantages pour les sports à dominante anaérobie. Enfin, dans le cadre des différentes disciplines hivernales, les sites d'altitude constituent un moyen d'augmenter la quantité de pratique spécifique en dehors de la saison d'hiver (objectif de réduction du coût énergétique pour une gestuelle donnée).

Encore actuellement, l'entraînement en altitude reste un thème complexe, à la fois car les résultats des études divergent, et parce que certains aspects du problème ne sont pas connus avec certitude. De plus, de nombreuses modalités d'utilisation de l'hypoxie existent aujourd'hui, obligeant les entraîneurs à effectuer des choix parfois délicats.

Ce document se propose donc de donner des éléments de compréhension, en les classant par thèmes, sur les différentes méthodes d'utilisation de l'altitude, les effets pouvant être attendus de celles-ci, ainsi que les précautions à prendre face à cet environnement particulier.

(1) PB = pression barométrique ; PIO₂ = pression d'O₂ inspirée et FiO₂ = Fraction inspirée partielle en O₂. 47 mm Hg est la pression partielle en vapeur d'eau qu'il faut prendre en compte pour l'air alvéolaire.



Quels types de protocole de stage utiliser ? Avec quelles conséquences physiologiques ?

• Les stages d'entraînement en altitude (résidence et entraînement en altitude)

L'entraînement en altitude a connu un essor important depuis les années 70, dans de nombreux pays. La première utilisation de cette technique vise à préparer une compétition en altitude. Dans ce cas, ce procédé peut être assimilé à une préparation spécifique permettant de « s'habituer » aux contraintes du lieu de la compétition ; l'efficacité d'une telle démarche n'est alors pas à démontrer.

La deuxième utilisation de cette technique (la plus fréquente) va au-delà de la première. L'hypothèse sous-tendant cette méthode est qu'une exposition prolongée (plusieurs semaines) en altitude (1800-3000m), incluant des séances d'entraînement dans cet environnement, induit une combinaison d'effets physiologiques :

- une augmentation de la masse des globules rouges, du taux d'hémoglobine, du 2,3 DPG (④)
- une amélioration de la vascularisation périphérique (musculaire)
- une augmentation du taux de myoglobine, des enzymes aérobies, du fonctionnement mitochondrial,
- une amélioration du pouvoir tampon.
- une augmentation de la ventilation alvéolaire (ces aspect est souvent négligé et est très important pour l'acclimatation et également pour expliquer la différence de réponse à l'hypoxie des athlètes).

Il en résulterait alors une amélioration temporaire de la performance aérobie lors du retour en basse altitude. Bien que l'idée paraisse séduisante, les nombreuses publications scientifiques sur le sujet sont loin d'être consensuelles. En particulier pour les athlètes d'un haut niveau d'endurance, chez qui la performance plafonne malgré la charge d'entraînement, une augmentation significative des

(④) Ce composé est un dérivé de la glycolyse. Il baisse l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène en se fixant sur la forme désoxygénée

performances aérobies à l'issue d'un stage en altitude reste difficile à démontrer.

Quelles peuvent être les causes des divergences observées entre les différentes études et les cas rapportés par les entraîneurs ou les athlètes eux-mêmes ?

Tout d'abord, il est très important de rappeler que les athlètes, de par leur entraînement, disposent d'un profil physiologique particulier, propice à la haute performance, mais pas toujours favorable dans le cas d'un exercice en altitude. En effet, environ 50% des athlètes d'endurance développent une *hypoxémie induite par l'exercice (HIE)*, qui est présente même au niveau de la mer (Dempsey et Wagner, 1999). Ce phénomène, probablement lié à des facteurs pulmonaires et circulatoires, se traduit par une baisse de l'oxygénation sanguine à l'effort intense susceptible de pénaliser la performance totale. En altitude, les phénomènes d'hypoxémie sont majorés, ce qui met les athlètes sensibles à l'HIE à basse altitude dans une situation de moindre tolérance à l'altitude en terme de maintien des performances aérobies : chez ces athlètes, la diminution des performances est plus importante que chez les sujets ne présentant pas d'HIE à basse altitude. Sur le plan pratique, la gestion des charges d'entraînement au cours d'un stage en altitude peut devenir très problématique chez des athlètes présentant un tel profil. L'entraînement doit être modifié et plus que jamais, individualisé ; dans ce contexte, les risques de surentraînement ou au contraire, de désentraînement, ne sont pas négligeables. Au vu de ces considérations, une amélioration de performance post-stage n'est pas systématique.

En résumé : *l'entraînement en altitude classique (résidence et entraînement en altitude) est complexe à mettre en œuvre, et n'apporte pas des résultats positifs systématiques sur la performance des athlètes. Cette technique conviendrait à certains, et non à d'autres.*

• Nouvelles approches de l'utilisation de l'hypoxie dans le processus d'entraînement

Face à l'absence d'effet positif systématique à l'issue d'un stage d'entraînement en altitude (de type vivre et s'entraîner en haut), deux nouvelles approches ont été développées plus récemment. Même si les deux méthodes décrites ci-après sont « opposées » sur le plan organisationnel, elles ont toutes deux recours à l'exposition intermittente à



l'hypoxie. La première consiste à vivre en bas et s'entraîner en haut (exercice en hypoxie), alors que la deuxième est en quelque sorte le contraire de la première, c'est-à-dire vivre en haut et s'entraîner en bas (nuit en hypoxie).

Vivre en bas – s'entraîner en haut

Cette technique consiste à résider en basse altitude, mais à intégrer dans le programme d'entraînement un certain nombre de séances en hypoxie. L'objectif visé est alors d'augmenter le stimulus entraînement, en ajoutant à l'exercice un deuxième stimulus, le manque d'oxygène.

L'hypoxie peut être obtenue soit en se rendant en montagne (par exemple, une séance d'entraînement sur glacier en ski, avec redescente à la fin de la séance), soit par simulation (exercice sur ergomètre : 1) en caisson (hypoxie hypobarique induit) – difficile à mettre en œuvre - ou 2) en inhalant un mélange hypoxique (hypoxie normobarique induit) – plus pratique à réaliser).

L'altitude peut donc être simulée soit en diminuant la pression barométrique (PB), (caisson hypobare) ; soit en diminuant FiO₂, grâce à des mélanges hypoxiques (altitrainer, chambres hypoxiques par extraction d'oxygène ou enrichissement d'azote) (2).

Dans ce contexte, le temps d'exposition à l'hypoxie est trop court pour induire une augmentation de la masse de globules rouges, même si les périodes d'hypoxie peuvent être suffisantes pour provoquer une augmentation de la concentration en érythropoïétine (EPO) dans le sang. En revanche, il semblerait que ce type de préparation puisse avoir des effets bénéfiques au niveau musculaire (fonctionnement amélioré de certaines enzymes du métabolisme oxydatif) et/ou ventilatoire (amélioration du fonctionnement des muscles respiratoires).

De manière générale, pour ce type de préparation, l'entraîneur doit prévoir 2 à 3 jours sans exercice intense du fait des symptômes de Mal Aigu des Montagnes qui peut se développer (céphalées, perte d'appétit, nausées, insomnie).

(2) Car : $PiO_2 = (PB - 47) \times FiO_2$ mmHg, la somme des pressions partielles des gaz à tous les niveaux de l'organisme étant toujours égale à PB : $PB = PiO_2 + PiN_2 + PiH_2O$ (47 mmHg).

Toutefois, la majorité des études conduites à partir de ce modèle d'entraînement ne mettent pas en évidence une augmentation significative de la performance aérobie chez les sportifs très entraînés.

En définitive, il est possible que ce type de méthode soit efficace, mais cela n'a pas encore été clairement démontré. Le point crucial est certainement de trouver les bonnes « doses » d'hypoxie et d'exercice pour produire un effet. D'autre part, il se peut que cette technique améliore certaines qualités d'endurance, qui sont rarement évaluées dans la littérature existante.

Vivre en haut – s'entraîner en bas

Cette méthode, initialement développée par une équipe scientifique américaine (Levine), consiste à s'entraîner en basse altitude et à résider en altitude. Le but est de stimuler la fabrication de globules rouges pendant la nuit, tout en conservant une bonne qualité d'entraînement (en terme d'intensité notamment) le jour. A l'issue de ce type de préparation, l'augmentation de la masse de globules rouges (et donc de la capacité de transport de l'O₂ par le sang) semble améliorer la performance aérobie de façon convaincante, même chez des athlètes. Toutefois, des études récemment menées par une équipe australienne ne viennent pas confirmer ces résultats. De plus, une étude française en cours et dont les expérimentations se sont déroulées au CNSN de Prémaman (Richalet et al) montre que les résultats varient beaucoup d'un athlète à l'autre, et que sur plan hématologique, un effet systématique est bien constaté à la fin du stage, mais n'est plus décelable 15 jours après la fin d'un stage de 18 jours avec des nuits passées entre 2500m et 3500m.

Il est important de signaler que toutes les études qui ont constaté des effets bénéfiques sur la performance au retour en normoxie l'ont fait immédiatement au retour. Il n'existe pas d'argument scientifique pour dire que l'effet ne se fait sentir que 2 ou 3 semaines après.

Encore une fois, il est probable que cette méthode soit globalement bénéfique. Mais son efficacité dépend certainement de la dose d'hypoxie à laquelle les athlètes sont exposés (nombre d'heures par 24h, altitude atteinte, nombre de jours)

et de la nature de l'entraînement. Enfin, on ne sait toujours pas avec certitude quand se produit le pic (la période) de performance après un stage. Quoi qu'il en soit, cette méthode n'est apparemment pas tolérée de la même façon par tous les athlètes. Comme pour l'entraînement classique en altitude, il semble exister des répondeurs et des non-répondeurs. Une question à laquelle l'étude française en cours tente de répondre actuellement est de savoir quels indicateurs physiologiques pourraient prédire à priori la tolérance (et le bénéfice potentiel) des athlètes à ce type de préparation. En particulier, plusieurs variables sont étudiées à partir d'une exposition courte à l'hypoxie, comme les variations individuelles du pic d'EPO, des réponses ventilatoire et cardiaque, de l'expression de certains gènes induits par l'hypoxie, de la baisse de la performance ; ou encore, le niveau d'oxygénation du sang (saturation artérielle en O₂) au cours de la première nuit en altitude... L'objectif serait alors de guider les athlètes et entraîneurs dans le choix des différentes méthodes d'entraînement, afin d'éviter toute préparation inefficace, voire préjudiciable à la performance.

A quel niveau d'altitude faut-il s'entraîner ?

De nombreuses hypothèses par rapport à l'entraînement en altitude ne sont toujours pas vérifiées. La meilleure altitude, la durée optimale d'un stage, l'entraînement le plus approprié, la cinétique de la performance dans les semaines suivant la préparation (décompensation / surcompensation) sont autant de problématiques qui n'ont pas de réponses sûres.

A propos du niveau d'altitude, un consensus se dégage cependant pour admettre que la fourchette de 2500 à 3000 m permet un stimulus optimum pour l'entraînement ou pour y résider.

Quel est l'intérêt de l'hypoxie pour les « disciplines à prédominance anaérobie » ?

La majorité des données sur l'entraînement en altitude concernent l'effet sur la performance aérobie. Ceci peut s'expliquer en raison de l'existence d'une hypothèse de départ logique, à savoir l'augmentation de la masse de globules rouges, qui est un facteur de la performance aérobie. En revanche, il est plus difficile de mettre en relation l'entraînement en altitude et son impact sur la performance de type anaérobie. Pourtant, certaines données récentes (Nummela et Rusko, 2000) montrent que ce type de préparation peut être bénéfique pour la performance sur 400 m. Une explication, dans ce cas, pourrait être une augmentation du pouvoir tampon du muscle, permettant une plus grande accumulation de lactates.

Bien que les arguments scientifiques manquent encore, l'utilisation de l'hypoxie (intermittente ou continue) dans le cadre de la préparation sportive pour les disciplines à caractère anaérobie pourrait améliorer ce type de performance.

Tout le monde répond-il de la même manière à l'hypoxie ?

La tolérance à l'hypoxie d'altitude varie beaucoup d'un individu à l'autre, les athlètes n'échappant pas à cette règle. Un athlète considéré comme un bon répondeur à l'altitude présente généralement les caractéristiques suivantes lors du stage : bonne adaptation au repos (sommeil, alimentation, forme générale) et à l'exercice (maintien d'une intensité d'entraînement proche de celle réalisée en plaine, bonne récupération).

La réponse ventilatoire à l'hypoxie est également l'un des facteurs de bonne réponse individuelle. Celle-ci traduit la sensibilité des chémorécepteurs et peut être testée simplement en laboratoire par un test d'effort en hypoxie.

De plus, un bon répondeur voit sa masse de globules rouges significativement augmentée, ce



qui participe à l'augmentation de ses performances post - stages.

Un athlète non-répondeur a tendance à présenter les caractéristiques contraires, et ne retire généralement pas de bénéfice à l'issue de la période de stage. Celui-ci peut même voir ses performances et/ou son état de forme diminuer après le stage en altitude. En conséquence, l'absence de modification sur l'ensemble d'un groupe est à dissocier des résultats individuels, pouvant être augmentés, inchangés ou diminués.

Les scientifiques manquent toujours d'éléments pour classer avec certitude les athlètes dans la catégorie « répondeur » ou « non-répondeur ».

Quelle est la tolérance des jeunes à l'hypoxie ?

Ce paragraphe, qui mériterait un développement plus complet, rappelle malgré tout quelques caractéristiques du développement des capacités sportives en fonction de l'âge, ainsi que des types d'entraînement généralement mis en œuvre chez les jeunes (Wilmore et Costill 1998 ; Daulouède 1996). Ces données montrent que l'utilisation de l'altitude n'intervient pas comme première composante de l'optimisation des performances.

Il est premièrement important de noter que le début de la période pubertaire peut présenter des décalages de plus ou moins deux ans entre des jeunes du même âge (garçon ou fille). Un entraîneur doit en tenir compte lors des entraînements pour des jeunes se situant dans cette période.

Alors que les *facultés d'apprentissage* atteignent un maximum vers 10-12 ans, *le développement de la motricité* est relativement progressif, celle-ci se stabilisant à l'âge adulte chez les garçons, et à la puberté chez les filles.

La force se développe jusqu'à l'âge de 20 ans chez les femmes, alors que le pic de force est atteint entre 20 et 30 ans chez les hommes. C'est surtout lors de la puberté chez les garçons que les capacités de force augmentent de façon notable, en parallèle de l'augmentation de la masse musculaire (augmentation de la concentration de testostérone, surtout chez le garçon). Ce constat d'évolution de

maturation de la force ne doit pas cependant correspondre à un entraînement avec charge lourde. Seuls les exercices de placements trouveront un intérêt dans cette tranche d'âge.

La capacité aérobie se développe avec la croissance (taille des poumons, du cœur) et atteint un maximum vers 15 ans chez les filles et 21 ans chez les garçons (quand la consommation maximale d'O₂ est exprimée en litres/min). L'entraînement permet un développement supplémentaire au delà de ces âges repères. Il est à noter que les réserves en glycogène restent faibles chez l'enfant et s'améliorent lors de la puberté.

On constate une capacité glycolytique réduite chez l'enfant par rapport à l'adulte. La production de lactate pour une même intensité d'exercice relative est plus faible (Saltin 1974, Felmann 1990), notamment pour les lactates maximaux. Cela pourrait s'expliquer soit par une oxydation plus importante du pyruvate, soit par un pouvoir glycolytique plus limité (notamment un déficit en enzyme PFK) ; les deux n'étant pas incompatibles. La capacité à lutter contre l'acidose (en tamponnant les ions H⁺) est plus faible chez l'enfant que chez l'adulte. Elle va s'élever progressivement à raison de 0,01 à 0,02 unité pH par an entre 8 et 18 ans (Matejkova 1980).

La notion de seuil d'accumulation lactique ne peut être retenue chez l'enfant prépubère (Poortmans 2002). Il ne faut pas se fier aux lactates pour contrôler les intensités d'entraînement à cette période (le seuil défini serait alors trop élevé). Il est préférable dans cette phase prépubertaire d'utiliser le pourcentage de la FC maximale comme repère :

- DT1 < ou = 75 à 80% de FC max
- 80% < DT2 < 85% de FC max
- 85% < DT3 < 87% FC max

La règle de FC max = 220 – âge ne doit pas être retenue systématiquement. Il est nécessaire de vérifier cette valeur lors d'un 1500 ou 2000 mètres en athlétisme, par exemple.

L'économie de course, faible chez les enfants, augmente progressivement avec la croissance (longueur des os, masse musculaire).

La déperdition de chaleur lors d'une exposition au froid est plus grande chez l'enfant que chez l'adulte, en raison d'un rapport surface corporelle/poids beaucoup plus élevé. Chez l'adolescent, ce rapport peut rester supérieur.

Aux vues de ces considérations, une certaine chronologie est à respecter dans le processus d'entraînement de l'enfant à l'adulte.

De 8 à 12 ans : Phase de relative stabilité statopondérale, le schéma corporel est stable. C'est une période favorable aux apprentissages techniques, à l'amélioration des qualités de vitesse, coordination, souplesse ; également favorable au développement de l'endurance aérobie. Les enfants présentent de bonnes dispositions pour les activités d'endurance de moyenne intensité.

De 12 à 15 ans : la relation taille-poids est perturbée, le schéma corporel déstabilisé. Avec l'augmentation des productions hormonales (testostérone et progestérone), cette période est favorable au début du développement des capacités de force musculaire (sous la forme d'exercices de force vitesse ou force endurance sans charge additionnelle). Les capacités de souplesse et de coordinations sont en diminution.

A partir de 15 ans : les capacités glycolytiques s'améliorent progressivement par une augmentation notamment des enzymes de la glycolyse (PFK, LDH). Le développement musculaire est augmenté de même que le développement cardio-pulmonaire. La période devient favorable au développement de la consommation maximale d'oxygène. Le développement des capacités anaérobies lactiques ne devrait pas être envisagé avant la fin de la période d'adolescence (18 ans).

Exposition à l'altitude chez l'enfant.

Ce paragraphe reprend les principales conclusions d'un consensus international récent sur l'enfant en altitude (Pollard et al. 2001). D'une manière générale, peu de études longitudinales existent, de telle sorte que les recommandations actuelles s'appuient sur les données existantes, mais également sur les rapports de cas. D'une manière générale, chez les enfants natifs de basse altitude (sans antécédents de maladies ou malformations cardiaques ou pulmonaires) se rendant en altitude (altitude \geq 3000m), l'incidence 1) du mal aigu des montagnes (céphalée, anorexie, nausée et vomissement, fatigue.....) et 2) de l'œdème pulmonaire de haute altitude (dyspnée, faible tolérance à l'exercice, toux, cyanose...) souvent précédé par le mal des montagnes) n'est pas supérieure à celle observée chez les adultes. Pour

l'œdème cérébral de haute altitude, il n'existe pas de données disponibles aujourd'hui.

Il est à noter que ces informations concernent les enfants et sont donc valables pour les jeunes.

Enfin, l'exposition au froid et au soleil est moins bien tolérée par l'enfant que par l'adulte.

Entraînement en altitude chez les jeunes athlètes

Il n'existe pas ou peu d'études orientées sur les effets directs de l'entraînement en altitude chez les jeunes. Les conseils et suggestions données dans ce paragraphe s'appuient essentiellement sur des extrapolations faites à partir des connaissances de l'entraînement en altitude chez l'adulte, et sur l'expérience de terrain acquise par les entraîneurs.

De par l'environnement logique de l'activité, les jeunes skieurs alpins (dès poussin) s'entraînent souvent en altitude. L'ensemble des skieurs alterne d'ailleurs souvent l'entraînement du matin en altitude avec celui de l'après midi à altitude faible.

Les jeunes skieurs fatiguent vite en altitude ; ils compensent leur absence de développement anaérobie, par une mise en route du système aérobie plus précoce (cela se voit très bien sur des tests de Wingate qu'ils tolèrent d'ailleurs beaucoup mieux que des adultes jeunes).

Au-delà des questions relatives à l'impact sur les performances, l'organisation d'un stage en altitude (vivre en haut – s'entraîner en haut ou vivre en haut – s'entraîner en bas) nécessite certaines précautions chez l'adulte, qu'il faut respecter avec au moins autant d'attention chez les jeunes. En effet, même si les jeunes semblent tolérer l'altitude de la même façon que les adultes au repos, on connaît peu en revanche, le comportement des jeunes athlètes à l'exercice en altitude.

L'étude en cours au C.N.S.N. tend à montrer que, chez les athlètes étudiés (18-27 ans), ce sont les plus jeunes qui présentent *l'hypoxémie induite par l'exercice* la plus marquée lors d'un test maximal à 2500 m, et inversement. Ce phénomène est-il encore majoré chez les 15-17 ans ? Par précaution, on peut donc suggérer de limiter les intensités élevées lors de séances en altitude (réelle ou simulée) chez les jeunes.

Quels sont les indicateurs biologiques qui permettent un bon suivi de la charge d'entraînement en hypoxie ?

L'exposition en altitude entraîne une altération des capacités aérobies, s'exprimant par une diminution d'environ 1% de la VO₂ max par 100 mètres au-dessus de 1500 mètres, qui implique soit une diminution des intensités d'entraînement soit un risque de surentraînement.

Les variables physiologiques classiquement mesurées lors de l'entraînement (fréquence cardiaque, lactates) sont à interpréter avec prudence en altitude. En effet, la fréquence cardiaque de repos, ainsi que pour le même niveau absolu d'exercice sous-maximal, est supérieure en altitude (cela constitue une réponse physiologique normale). Une fréquence cardiaque plus élevée ne doit donc pas forcément être considérée comme un état de méforme dans ces conditions.

Notons que la fréquence cardiaque maximale en hypoxie aiguë reste identique à celle du niveau de la mer. Par contre, après quelques jours d'acclimatation (hypoxie continue ou intermittente), la fréquence cardiaque maximale baisse par rapport à la valeur du niveau de la mer. Ceci a été observé en haute et en moyenne altitude (Richalet et al, 1988 ; Antezana et al., 1994). Ce phénomène contribue à expliquer que VO₂max reste basse malgré l'acclimatation et l'augmentation progressive du nombre de globules rouges.

Lors d'une exposition aiguë, la lactatémie est supérieure pour des exercices sous-maximaux à celle produite au niveau de la mer ; cependant après une période d'acclimatation supérieure à 10 jours), la concentration de lactates dans le sang, pour un même niveau absolu d'exercice, diminue avec l'altitude.

Il peut donc être hasardeux de se fier à la concentration de lactates relevée lors des entraînements en altitude (et en tirer des conclusions sur l'état de forme) pour ajuster la charge d'entraînement. Notons qu'une augmentation de la lactatémie à l'effort est parfois relevée chez les skieurs alpins de la FFS au cours d'un stage en altitude de courte durée (inférieure à

10 jours). Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'accumulation des charges d'entraînement.

Au contraire, après quelques jours en altitude, la lactatémie (en particulier la lactatémie maximale) est plus faible qu'au niveau de la mer: c'est ce que certains ont appelé le "paradoxe du lactate": on pourrait s'attendre à ce que dans un environnement appauvri en oxygène, on utilise plus le métabolisme anaérobie: ce n'est pas le cas, les deux diminuent.

L'ammoniémie pourrait par contre constituer une mesure biologique intéressante dans la mesure où l'ion ammonium est associé à l'apparition de la fatigue par des mécanismes différents : stimulation de la glycolyse, inhibition du métabolisme oxydatif et de la néoglucogenèse. Ces manifestations, associées à la déplétion en ATP lors d'efforts intenses se répercutent au niveau du système nerveux central d'où la description de fatigue centrale. Le suivi des valeurs d'ammoniémie constitue donc une possibilité de détection de travail trop intense.

Attention : les mesures d'ammoniémie sont difficiles à faire et font appel à un matériel sophistiqué et un protocole de prélèvement précis. Ces mesures ne peuvent pas rentrer en compte dans le simple suivi d'entraînement assuré par un entraîneur. De même, les interprétations d'ammoniémie doivent être réalisées par du personnel médical compétent.

L'ammoniaque est un produit de dégradation d'acides aminés. Il s'agit d'un composé toxique pour l'organisme. Il est normalement transformé en urée par le foie (cycle de l'urée). L'ammoniaque semble avoir des effets sur le fonctionnement des cellules nerveuses en altérant les différents états de conscience, de concentration et ainsi des perturbations motrices (actions sur le GABA et la sérotonine, principaux neurotransmetteurs de l'encéphale).

Il est important de surveiller l'état de forme des athlètes au début d'un séjour en altitude (symptômes de mal aigu des montagnes, pouvant être présent à 2500-3000m), afin de modifier éventuellement le programme. Dans ce contexte, le recueil de la saturation artérielle en O₂ (SaO₂) au cours de la nuit, peut donner des informations utiles quant à la tolérance de chacun. Ce paramètre, mesuré de façon simple (capteur au doigt ou à l'oreille), renseigne sur l'oxygénation du sang au

cours du sommeil ; celui-ci varie beaucoup d'un athlète à l'autre.

D'autres signes d'intolérances sont également à surveiller : céphalée, insomnie, fatigue exagérée, manque d'appétit, diminution de la diurèse, ...

L'altitude (ou l'hypoxie) entraîne une augmentation de l'activité orthosympathique ; la production de catécholamines augmente, le catabolisme lipidique également (et en maintenant le même niveau absolu de puissance, l'athlète se rapproche de la zone glucidique (proche de VO₂max), donc utilise plus de glucides).

L'intensité élevée lors des séances d'entraînement produit un effet similaire (stimulation orthosympathique). Il est donc important de veiller à ce que l'organisme puisse supporter la charge de travail tenant compte à la fois de la situation hypoxique et de l'intensité de l'entraînement. Le risque d'une « surdose », venant soit d'un niveau d'altitude trop élevé, soit d'une intensité d'entraînement trop forte est de créer un effet fatigue allant dans le sens d'une hypertonie orthosympathique (augmentation de la fréquence cardiaque,...) et pouvant aller jusqu'au surentraînement. Des tests de fatigue axés sur la variabilité cardiaque sont d'ailleurs pratiqués à la FFS dans le cadre d'une évaluation objective du système neurovégétatif.

Un autre aspect important, valable chez les jeunes comme chez les adultes, dans le processus de fabrication des globules rouges en altitude, est la disponibilité en fer. Si le niveau initial des réserves en fer est bas ^(*), il est possible que l'augmentation de la masse de globules rouges à l'issue du stage en altitude soit limitée.

L'origine des carences en fer étant souvent multifactorielles, le diagnostic et le traitement sont à réserver au personnel médical.

Le suivi du fer est d'autant plus important en ski nordique que, selon plusieurs études, la pratique compétitive dans cette discipline en situation de normoxie est déjà une activité à risque en matière de disponibilité en fer. (Ellsworth et al.,

^(*) Plusieurs paramètres sont à surveiller, parmi ceux-ci : Le *taux d'hémoglobine*, -protéine présente dans les globules rouges qui, couplé au fer, permet de fixer et de transporter l'oxygène - la *ferritine* - protéine liée à du fer disponible pour l'élaboration de nouveaux globules rouges-, l'*haptoglobine* -protéine dont le taux bas témoigne d'une destruction des globules rouges- et la *transferrine* - protéine transporteuse de fer-).

1985 ; Haymes, 1986 ; Pattini et al, 1990, Candau 1992).

Comment adapter la nutrition à un séjour en hypoxie ?

Dans le cadre de séjour en altitude, des recommandations générales en matière de nutrition sont communément admises, ces données peuvent servir de bases au sportif s'entraînant en altitude même si peu de références scientifiques existent dans ce domaine particulier :

- une alimentation légèrement plus riche en **glucides** que par rapport au niveau de la mer.
- Une **hydratation** renforcée (utilisation de boissons énergétiques pour faciliter l'hydratation) du fait d'une hyperventilation pratiquée dans un air ambiant plus sec.
- En ce qui concerne les autres nutriments, il n'y a pas de données permettant de dire que l'apport de certains micro-nutriments devrait être augmenté en altitude. On suppose qu'une supplémentation en **vitamine E** (pouvoir antioxydant) améliorerait la déformabilité des globules rouges (accès aux petits vaisseaux sanguins) et la performance.
- Un apport journalier en **vitamine C** est également recommandé du fait de son action anti-oxydante et de ses propriétés de facilitateur d'assimilation du fer (voir encadré).
- D'autre part, une supplémentation en **fer** semble bénéfique en altitude. En particulier chez les filles qui peuvent avoir une perte concomitante de fer au cours des menstruations. Néanmoins, chez des athlètes initialement non carencés en fer, une supplémentation orale en fer lors d'un stage en altitude n'aboutit pas à une augmentation plus marquée de la masse de globules rouge (Friedman, 1999). Une alimentation orientée peut souvent suffire à éviter une carence pendant ou à la suite d'un stage en altitude (voir encadré).

*L'assimilation du fer présent dans la **chair animale** est bonne (pigeon, foie de veau, veau, boudin, fruits de mer). Il s'agit du fer « héminique ».*

*L'assimilation du fer présent dans les **végétaux** (« non héminique ») : -lentilles, tofu, germe de blé et de soja- dépend*

de la présence d'inhibiteurs et de facilitateurs (Rossander, 1979)

les inhibiteurs et facilitateurs d'assimilation du fer :

Les inhibiteurs : qui ont une action négative dans l'assimilation du fer :

Certains aliments contiennent des éléments qui inhibent ou ralentissent l'assimilation du fer absorbé :

- Les poly phénols (le thé, le café, certains fruits, le vin, et certaines épices)
- Le manganèse (thé, certains compléments alimentaires).
- Le calcium contenu dans le lait ajouté aux protéines du lait (Monsen et al. 1976)
- L'acide caféique (café)
- L'acide oxalique (contenu dans les épinards par exemple ou les blettes, l'oseille...).

Les facilitateurs : qui améliorent l'assimilation du fer ingéré.

- L'acide ascorbique (vitamine C) contenu dans le jus de citron ou certains fruits (quelques auteurs ne retrouvent cependant pas cette qualité de facilitateur pour cette vitamine : Pattini, Schena, 1990)
- L'acide citrique (jus de citron).
- Le fructose
- Certains acides aminés ramifiés comme la valine

La supplémentation en **acides aminés branchés** a été testée en haute altitude et semble prévenir la diminution de masse musculaire en épargnant la mobilisation des acides aminés branchés au sein du compartiment musculaire. Ce constat, fait à la suite d'anorexie due au mal aigu des montagnes, ne permet pas toutefois de transférer systématiquement cette pratique dans le cadre d'entraînements à moyenne altitude.

D'une façon générale, il est difficile de proposer des supplémentations particulières à l'athlète pour l'altitude. Ce dernier utilise déjà un certain nombre de supplémentations pour son entraînement habituel. Peut-être mieux vaut-il garder une habitude que de se lancer dans un procédé non vérifié, dont on ne connaît pas toujours les répercussions à moyen et long terme.

Rappelons qu'aucun traitement ne saurait être entrepris sans dosage biologique et que toute supplémentation doit se faire sous avis médical compétent.

Conclusion

Donner des informations précises aux entraîneurs sur l'entraînement en altitude tant chez l'adulte que chez les jeunes demeure une tâche ardue dans la

mesure où les données objectives manquent. Cet article vise à donner des pistes, plutôt que des modèles d'organisation, qui ne sont pas toujours consensuels, même pour un public d'athlètes adultes. Néanmoins, trois facteurs contribuent certainement à la réussite de ce type de préparation chez l'athlète : 1) la prise en compte du développement de chacun, de l'âge et du niveau de pratique ; 2) la connaissance de la tolérance de chacun face à l'altitude. A ce titre, un stage initial en altitude, loin des enjeux compétitifs, reste aujourd'hui le meilleur moyen pour les athlètes de découvrir ce milieu particulier et du comportement de chacun ; 3) l'expérience de l'entraîneur, qui devrait en particulier avoir travaillé avec des athlètes adultes avant de s'engager dans une préparation de ce type destinée aux jeunes. En effet, une attention particulière doit être portée à chacun, en vue de détecter tout trouble préjudiciable à la récupération et au bon déroulement du processus d'entraînement.

L'analyse des effets potentiellement positifs et des effets potentiellement négatifs montre que l'entraînement en altitude ne doit en aucun cas être considéré, dans les catégories jeunes comme un moyen d'entraînement « commun ». La priorité devra être donnée au développement des capacités aérobies en normoxie et le développement des autres facteurs de performances tels que les capacités de force musculaire, la diminution du coût énergétique par la gestuelle, etc. Ainsi, l'accès à l'altitude en terme d'entraînement chez le jeune peut se justifier avant tout comme un moyen d'améliorer les capacités techniques spécifiques en dehors de la saison hivernale, et non pas comme un moyen de développement systématique des capacités physiques (bioénergétiques).

Enfin, il faut bien appréhender le fait que l'entraînement en altitude, qu'il soit à destination d'un public jeune ou adulte, n'est pas nécessairement placé immédiatement avant une grande compétition. Il peut également être utilisé comme « catalyseur » de l'entraînement, en vue de pouvoir augmenter la charge d'entraînement dans la période consécutive au stage d'altitude.

Le CSS remercie vivement le
Pr JP Richalet pour sa
contribution active à l'élaboration
de ce document.

Bibliographie principale

Revues sur l'entraînement en altitude :

Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt Med Biol* 3(2):177-93, 2002

Hoppeler H, Vogt M. Hypoxia training for sea-level performance. Training high-living low. *Adv Exp Med Biol* 502 : 61-73, 2001.

Richalet J.-P., Robach P., Herry J.-P. Entraînement et compétition en altitude. *Science & Sports* : 14 : 233-241, 1999.

Article sur la performance anaérobie et l'entraînement en altitude

Nummela A, Rusko H. Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. *J Sports Sci* 18(6):411-9, 2000

Revue sur l'hypoxémie induite par l'exercice chez l'athlètes

Dempsey JA, Wagner PD. Exercise-induced arterial hypoxemia. *J Appl Physiol* 87(6):1997-2006, 1999

Consensus international sur l'enfant et l'altitude :

Pollard AJ, Niermeyer S, Barry P, Bartsch P, Berghold F, Bishop RA, Clarke C, Dhillon S, Dietz TE, Durmowicz A, Durrer B, Eldridge M, Hackett P, Jean D, Kriemler S, Litch JA, Murdoch D, Nickol A, Richalet JP, Roach R, Shlim DR, Wiget U, Yaron M, Zubieta-Castillo G Sr, Zubieta-Calleja GR Jr. Children at high altitude: an international consensus statement by an ad hoc committee of the International Society for Mountain Medicine, March 12, 2001. *High Alt Med Biol* 2(3):389-403, 2001

Articles sur le développement des capacités sportives et l'entraînement en fonction de l'âge

Wilmore JH, Costill DL. La croissance, le développement, le jeune sportif (Chapitre 17). *Dans* : Physiologie du sport et de l'exercice physique. Editions De Boeck Université, pp 400-421, 1998

Daulouède C. Les différences enfants-adultes. In Sport et Vie. Hors-série N°5 « l'enfant et le sport », pp....., 1996

Articles sur l'aspect nutritionnel

Friedmann B., Jost J., Rating T., Weller E., Werle E., Eckardt K.U., Bartsch P., Mairbaurl H. Effects of iron supplementation on total body hemoglobin during endurance training at moderate altitude. *Int. J. Sports. Med.* 20:78-85, 1999.

Svedenhag J., Piehl-Aulin K., Skog C., Saltin B. Increased left ventricular muscle mass after long-term altitude training in athletes. *Acta Physiol. Scand.* 161: 63-70, 1997.

Haymes E M, Lacana J. Iron loss in runners during exercise implications and recommendations, *sports Med.*, 7 : 277-285 , 1989.

Haymes E M, Phul JL, Temples TE Training for cross-country skiing and iron status, *Med and Science in sports and Ex.*, 18 : 162-167, 1986.

Ellsworth NM, Hewitt BF, Haskell WL. Nutrient intake of elite male and female Nordic skiers The physician and sportsmedicine, 13 : 2 78-92, 1985.

Pattini A, Schena F, Guidi GC. Serum iron changes after cross-country and roller ski endurance races *Eur. J appl physiology*, 61 : 55-60, 1990

Tous les articles référencés dans ce document sont disponibles auprès du Département Sportif et Scientifique de la F.F.S.

INFORMATION :

Les documents « DTN infos » édités par le Département Sportif et Scientifique seront, dès mars 2004, disponibles en téléchargement sur le site de la F.F.S :

<http://www.ffs.fr/>.

Pour tous renseignements supplémentaires contactez Nicolas Coulmy responsable du DSS :

nicolas.coulmy@ifrance.com

ou

css@ffs.fr)

Toute reproduction, même partielle de ce document est interdite sans autorisation du DSS de la Fédération Française de Ski.