



# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE ET SES OPTIMISATIONS

DIEFENBRONN Sebastien  
Sebastien.diefenbronn@gmail.com

## Table des matières

1.	Le métabolisme énergétique.....	2
1.1.	Les différentes sources de substrats énergétiques.....	2
1.2.	Utilisation des substrats à l'effort .....	3
1.3.	Les autres facteurs .....	4
2.	Le glycogène .....	4
2.1.	Son stockage.....	4
2.2.	Épuisement du glycogène .....	5
3.	Et les acides aminés ?.....	5
4.	Nos réserves énergétiques.....	6
4.1.	Répartition des réserves.....	6
4.2.	Comment optimiser ses réserves de glycogène ? .....	6
5.	La fenêtre métabolique.....	7
6.	Comment optimiser l'oxydation des lipides à l'effort.....	9
6.1.	Les différentes solutions possibles.....	9
6.2.	Le Low Carb High Fat (LCHF) en pratique.....	10
6.3.	La périodisation des glucides en pratique.....	10
6.4.	Efficacité de l'entraînement à jeun .....	11
6.5.	Les sorties longues .....	11
6.6.	Comment périodiser cela ? .....	11

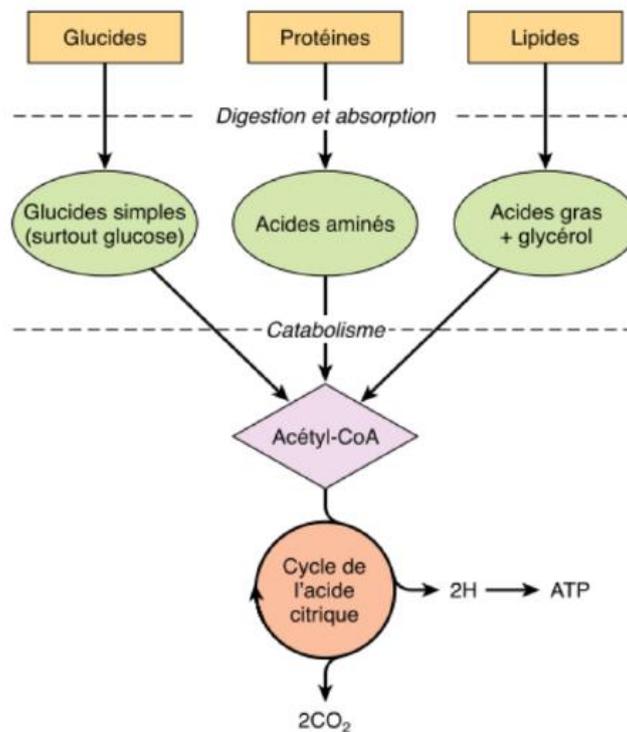
# 1. Le métabolisme énergétique

## 1.1. Les différentes sources de substrats énergétiques

Lors d'un effort, la contraction des muscles squelettiques nécessite aux cellules musculaires d'avoir un apport d'énergie constant sous forme d'ATP (unité d'énergie cellulaire).

Cet ATP est produit à partir de plusieurs sources différentes :

- ✓ **Du glucose** : sucre simple qui provient de l'alimentation, après digestion et absorption de sucre plus complexe, ou du glycogène ;
- ✓ **Des acides aminés** : ce sont les molécules de base qui constituent les protéines. En cas de besoin l'organisme à la capacité de dégrader sa propre masse musculaire (catabolisme) ;
- ✓ **Des acides gras** : issus de la dégradation des lipides alimentaires ou de nos réserves adipeuses.



Même au repos, chaque cellule musculaire contient environ 1 milliard de molécules d'ATP, qui seront toutes utilisées et remplacées toutes les 2 minutes ; pendant un exercice intense, la production d'ATP musculaire peut être multipliée par 1000 pour répondre aux exigences d'une contraction musculaire intense.

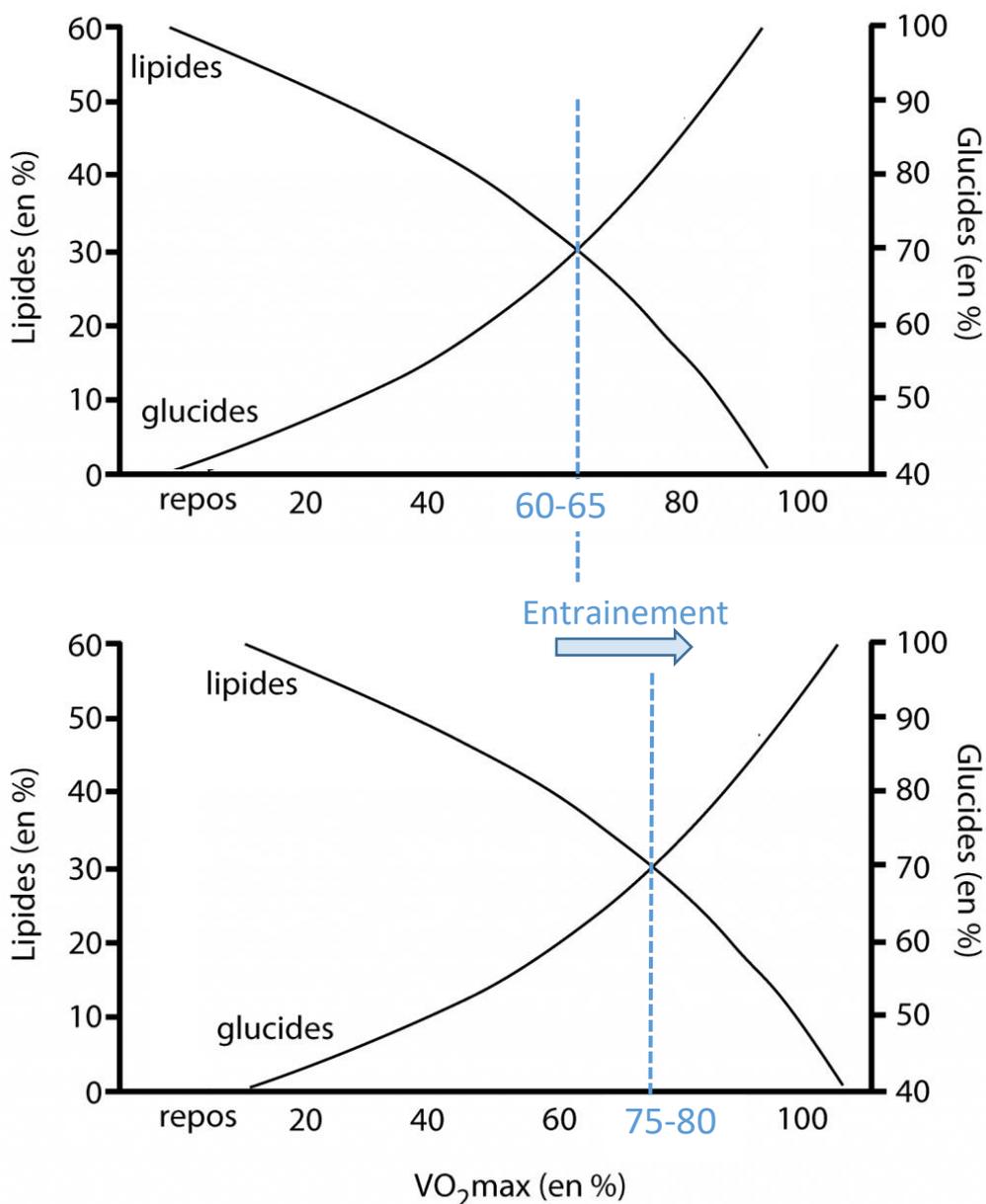
Cette production d'énergie est réalisée par les mitochondries. Ce sont de petites centrales nucléaires autonomes en charge de transformer les différents substrats énergétiques en ATP.

## 1.2. Utilisation des substrats à l'effort

Lors d'un effort aérobie, les deux principaux substrats énergétiques vont être le glucose et les acides gras, en proportion différente, et en fonction de deux facteurs prédominants : l'intensité et la durée de l'exercice.

Plus l'effort est intense, plus le glucose sera préféré pour produire de l'ATP.

Pour produire l'ATP nécessaire, le point de croisement (ou crossover) entre les deux substrats énergétiques, situé aux alentours de 60-65% de VO<sub>2</sub>max, est dépendant des capacités physiques de chacun, mais également de son niveau d'entraînement. Il est essentiel pour performer lors d'efforts de longue durée de décaler ce croisement des courbes vers la droite en faisant les bons choix nutritionnels et d'entraînements.



De plus; au fur et à mesure que le glycogène musculaire diminue, l'utilisation des acides gras augmente. Il est donc primordial d'avoir un métabolisme énergétique efficace dans l'oxydation de ces acides gras.

Les progrès de l'efficacité de la lipolyse ne seront réellement quantifiables qu'après plusieurs mois de travail.

### 1.3. Les autres facteurs

Comme nous l'avons vu précédemment, la répartition des substrats énergétiques va essentiellement dépendre de deux facteurs principaux que sont l'intensité et la durée de l'exercice. Mais d'autres paramètres vont faire varier, à la hausse ou à la baisse, ces substrats énergétiques :

	Glucose	Acides gras
Intensité de l'exercice	↑	↓
Durée de l'exercice	↓	↑
Repas glucidique avant l'exercice	↑	↓
Alimentation quotidienne riche en glucides	↑	↓
Entraînement d'endurance	↓	↑
Conditions chaudes	↑	↓
Conditions froides	↑	↓
Altitude	↑	↓

Cela est bien sûr à individualiser en fonction des adaptations de chacun. Un athlète habitué aux entraînements dans le froid ou en altitude sera moins impacté par ces facteurs.

## 2. Le glycogène

### 2.1. Son stockage

C'est un glucide complexe qui est stocké sous deux formes dans l'organisme avec des rôles différents :

- ✓ **Le glycogène hépatique**, dans le foie, dont le stock d'environ 80-100gr permet de maintenir en permanence un flux de glucose sanguin à 4g pour fournir un substrat énergétique aux cellules glucodépendantes (cerveau, globules rouges, ...) ;
- ✓ **Le glycogène musculaire** permet de fournir du glucose lors des efforts musculaires. Ce stock est plus variable, entre 350 et 700gr. Cette variation s'explique essentiellement par le niveau d'entraînement et le régime alimentaire.

	Sédentaire	Athlète d'endurance	Athlète après une recharge glucidique	Après un effort intense et prolongé
Glycogène musculaire (en g par kg de muscle)	15-20	25-30	35-40	<5

Nous reviendrons un peu plus bas sur l'optimisation de ces réserves.

## 2.2. Épuisement du glycogène

Même si l'épuisement du glycogène musculaire n'est jamais complet (90%), on estime qu'il intervient après 60 minutes d'efforts à 85M% de la VO<sub>2</sub>max, après 90 minutes à 75% ou après 4h à 55%.

Cela ne va pas déterminer l'arrêt de l'effort, car l'oxydation des acides gras et des acides aminés est toujours possible. Mais, cela va avoir un impact négatif très important sur :

- ✓ La fatigue musculaire et plus particulièrement pour des intensités de force/puissance maximales ;
- ✓ La qualité et la longueur de la foulée.

En course, nous comprenons alors aisément l'intérêt de maintenir son stock de glycogène élevé le plus longtemps possible.

## 3. Et les acides aminés ?

Lors d'un effort prolongé, au-delà de 2 à 3h d'effort, le stock de glycogène hépatique n'est plus suffisant pour réguler le taux de glucose dans le sang. L'oxydation des acides aminés, via la voie métabolique de la néoglucogenèse, va permettre de maintenir la glycémie stable.

À cette production d'énergie, qui représente entre 5 et 10% de la production totale d'énergie, s'ajoute la dégradation des acides aminés lors de fortes sollicitations musculaires (mouvements excentriques ou dénivelé important par exemple).

A l'effort, la balance entre la synthèse (protéosynthèse) et la destruction (protéolyse) des tissus musculaires est donc négative. On parle de catabolisme musculaire.

**Une attention particulière devra donc être mise en place en post-effort pour retrouver une balance positive** et ne pas perdre de masse musculaire. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre concernant la fenêtre métabolique.

## 4. Nos réserves énergétiques

### 4.1. Répartition des réserves

Comme nous l'avons vu, nous avons la capacité d'utiliser différents substrats énergétiques pour produire l'énergie dont nous avons besoin. La disponibilité de ces substrats va dépendre de la composition corporelle de chacun, et notamment de son taux de masse grasse et de masse musculaire. Prenons le cas d'un athlète de 65kg avec un taux de masse grasse d'environ 15% et une masse musculaire de 6kg.

Substrats énergétiques	Tissus	Energie disponible (en kcal)
Glycogène	Hépatique	300-400
	Musculaire	1 600
Acide gras	Adipeux	80 000
Acides aminés	Musculaire	24 000 (max 50% peut être oxydé)

Nous constatons que **les réserves énergétiques d'acides gras, stockées dans le tissu adipeux, sont les plus importantes de l'organisme**. Nous comprenons donc aisément que pour des efforts longs, il est nécessaire de savoir utiliser les acides gras comme source principale d'énergie. Nous y reviendrons.

### 4.2. Comment optimiser ses réserves de glycogène ?

Le stock de glycogène musculaire est très limité, mais reste néanmoins le substrat énergétique préféré dans certains cas de figure. Il est donc important d'optimiser ses réserves pour :

- ✓ Être performant lors d'efforts courts et intenses ;
- ✓ Maintenir une intensité élevée le plus longtemps possible ;
- ✓ Conserver ses capacités de force/puissance maximales.

Plusieurs paramètres vont avoir une influence positive sur ces stocks :

- ✓ Le niveau d'entraînement de l'athlète et sa sensibilité à l'insuline ;
- ✓ L'alimentation et l'apport glucidique dans la fenêtre métabolique post-effort qui va permettre une synthèse importante de glycogène.

Une attention particulière doit être portée sur l'hydratation. En effet, le stockage d'1 gramme de glycogène nécessite environ 3 grammes d'eau. Cela peut expliquer de fortes variations de poids, en 24h-48h, de plus ou moins 1-2kg en fonction du niveau de glycogène musculaire de l'athlète.

Prenons l'exemple d'Ugo pour l'UTMB. Après une bonne gestion nutritive les derniers jours de sa préparation, il prendra le départ de la course avec 1 kg de plus sur la balance.

## 5. La fenêtre métabolique

C'est la **période durant laquelle l'organisme est particulièrement disposé à récupérer** et à retrouver ses réserves de glycogène et son intégrité musculaire. Plusieurs mécanismes vont favoriser cela :

- ✓ L'épuisement préalable des stocks va activer la glycogène synthase, une enzyme à l'origine de la synthèse de glycogène ;
- ✓ Une augmentation des transporteurs du glucose (GLUT4) et une meilleure perméabilité des membranes cellulaires ;
- ✓ Une sensibilité à l'insuline accrue due à l'effort.

C'est donc **le moment idéal pour consommer des glucides** et cela doit être fait rapidement après l'effort, car plus cela se réalise tôt, plus la quantité de glycogène resynthétisée est importante. Pour une même consommation de glucide, la vitesse de stockage est double si elle a lieu fréquemment, toutes les 15-30mins, plutôt que toutes les 2 heures. Il faut néanmoins noter que cela n'est véritablement utile qu'en cas de nécessité à réaliser rapidement un nouvel effort intense.

Prenons un exemple concret : le KO Sprint en Ski de fond où il faut enchaîner les courses très intenses de qualification jusqu'à la finale en quelques heures.

Si ce n'est pas le cas, une consommation régulière, mais suffisamment espacée pour limiter les problèmes gastriques est une stratégie optimale et pratique. En effet, après 24h le taux de synthèse sera identique, quelle que soit la fréquence d'apports.

La vitesse de resynthèse du glycogène est dépendante de la quantité de glucides consommée, mais celle-ci doit aussi rester cohérente avec le type d'effort réalisé.

Type d'effort	Quantité de glucides (en g par kg de poids de corps et par jour)
Faible intensité	3 à 5
Modéré et d'environ 1h	5 à 7
Modéré à élevé et entre 1 à 3h	6 à 10
Engagement extrême et supérieur à 4-5h	8 à 12

Cela est bien évidemment à adapter à chaque athlète, à son entraînement, aux filières énergétiques qu'il souhaite travailler et à ses prochains objectifs : trail court ou ultra.

Il n'est pas toujours nécessaire de retrouver l'ensemble de son stock de glycogène d'une séance à l'autre. Un apport important en glucides va se faire au détriment d'autres nutriments, en particulier les lipides, dont les bénéfices pour la santé et les performances sont nombreux.

Il a été également démontré que **la prise conjointe de protéines et de glucides permet d'augmenter la vitesse et le niveau de glycogène synthétisé, de réparer les lésions musculaires tout en favorisant l'adaptation cellulaire à l'effort**. Nous reviendrons, dans un article dédié, sur l'intérêt ou non des BCAA en récupération.

En pratique, que faut-il faire pour optimiser et retrouver ses réserves de glycogène :

- ✓ Après l'effort, consommer rapidement, et régulièrement pendant les 24h qui suivent, une alimentation riche en glucidique (fruits bien murs, compote, riz, patate douce, ...) ;
- ✓ Apporter suffisamment et régulièrement des protéines : environ 20gr toutes les 3h ;
- ✓ Maintenir une alimentation quotidienne variée avec des végétaux et des lipides de qualité (oléagineux, huile d'olives/colza, chocolat noir, ...) ;
- ✓ Ne pas négliger l'hydratation et un retour à l'équilibre acido-basique en consommant une eau bicarbonatée et sodée (St-Yorre).

En cas d'effort important à renouveler rapidement, il sera utile de consommer une boisson de récupération, et ce dès la fin de l'activité, avec des glucides à index glycémique moyens à élevés (maltodextrine, dextrose, glucose, ...), des protéines (whey ou acides aminés essentiels) ainsi qu'une eau bicarbonatée et sodée.

Cela pourrait, par exemple, être le cas pour un challenge « KV + Trail court » dans la même journée ou encore un tournoi sportif.

## 6. Comment optimiser l'oxydation des lipides à l'effort

### 6.1. Les différentes solutions possibles

Nous avons vu comment optimiser nos réserves de glycogène, mais aussi que ce stock ne représente malheureusement que très peu d'énergie disponible. Tout au plus, de quoi maintenir un effort de quelques heures.

Bien évidemment, le ravitaillement en course va permettre d'épargner une partie de ce stock, mais nous serons rapidement limités par nos capacités gastriques. Nous reviendrons sur ce point.

Il faut donc clairement compter sur nos acides gras pour fournir de l'énergie et cela est d'autant plus vrai que l'effort est long. Plusieurs solutions sont possibles :

- ✓ La mise en place d'une **alimentation cétogène**, où la très faible consommation de glucides (moins de 5% des apports) va activer une nouvelle voie métabolique avec la production de corps cétonique.

Ce régime peut donner de très bons résultats pour des efforts d'ultra-endurance. L'athlète se voit totalement affranchi de besoins en glucides, mais ce modèle alimentaire reste compliqué à mettre en place, avec notamment un risque important de déficit calorique, et socialement difficile à maintenir sur la durée.

La phase d'adaptation est également très longue. Elle nécessite des années pour en tirer de réels bénéfices.

Ce modèle alimentaire ne sera pas détaillé dans ce document, mais pour ceux qui souhaitent aller plus loin, je vous encourage à vous tourner vers un professionnel ayant une forte expérience du sujet.

- ✓ Le **modèle alimentaire low carb**, quant à lui plus souple, permet de bénéficier partiellement de ces avantages. Il existe deux approches dans ce modèle :
  - Une réduction quotidienne des apports en glucides, et notamment des aliments à index glycémique élevé, au profit de quantité plus importante de lipides de qualité ;
  - Une restriction et une périodisation des apports glucidiques en fonction de l'entraînement : nous parlons alors de méthode « **train low** » et « **sleep low** ».

Quelle que soit la méthode utilisée, l'objectif demeure le même en termes de performance : **stimuler et améliorer sa lipolyse pour préserver un maximum de glycogène lors d'efforts longs**. En effet, l'entraînement avec un niveau de glycogène abaissé permet d'activer la fabrication de nouvelles protéines et d'enzymes au sein des mitochondries pour rendre ces dernières plus efficaces dans le transport et l'oxydation des acides gras.

Quelques précautions sont bien évidemment à prendre en compte :

- ✓ Avoir des apports protéiques suffisants en post-effort et sur l'ensemble de la journée ;
- ✓ Maintenir un niveau calorique suffisant en regard du volume d'entraînement ;
- ✓ Revenir régulièrement à des entraînements avec des réserves de glycogène et des apports glucidiques conséquents avant et pendant l'effort. Ceci afin de maintenir l'efficacité du métabolisme glucidique.

L'ingestion de glucides avant l'exercice a un très fort effet inhibiteur sur l'oxydation des graisses. Par exemple, l'ingestion de 50 à 100 g de glucides dans les heures précédant l'exercice inhibera la lipolyse et réduira l'oxydation des graisses d'environ 30 à 40%.

Cette approche nutritionnelle va également permettre de réduire les risques de troubles digestifs à l'effort par excès de consommation de glucides. Nous savons aujourd'hui que c'est l'un des principaux facteurs d'abandons sur les épreuves d'ultra-endurance.

## 6.2. Le Low Carb High Fat (LCHF) en pratique

Voici les grandes lignes pour mettre en pratique au quotidien une approche alimentaire faible en glucides et haute en lipides :

- ✓ Une abondance de légumes, idéalement bio et de saison, à chaque repas ;
- ✓ Des lipides de qualités et en quantité :
  - Huile d'olive, riche en acide oléique et en polyphénols, avec notamment les très beaux produits Chris&Olive (Baouw) ;
  - Huile de colza, de cameline ou de lin, riche en oméga 3 ;
  - Huile de coco en cuisson ;
  - Oléagineux : noix, amandes, noisettes, macadamia ou encore noix du Brésil/Amazonie ;
  - Chocolat noir ;
  - Petits poissons gras ;
- ✓ De faibles apports en glucides avec uniquement des aliments à faible index glycémique, à consommer essentiellement lors du repas post-effort :
  - Patate douce, quinoa, légumineuse, ou plus occasionnellement du riz ;
  - 1 à 2 portions fruits par jour ;
- ✓ Le maintien des apports en protéines animales en quantité habituelle.

Au-delà de la performance sportive, **ce modèle alimentaire pauvre en glucides, en faveur de lipides de qualité, apparaît également favorable pour la santé** : meilleure sensibilité à l'insuline, réduction de l'inflammation et du stress oxydant, de la pression artérielle ainsi qu'une meilleure prévention cardiovasculaire.

## 6.3. La périodisation des glucides en pratique

Dans le cas où l'alimentation low carb au quotidien vous semble trop contraignante, il reste la possibilité de périodiser la restriction glucidique en fonction de l'entraînement.

La méthode **train low** consiste à jouer avec les stocks de glycogène lors d'entraînements en biquotidien :

- ✓ Réaliser une première séance d'entraînement qui épuise une bonne partie des stocks de glycogène ;
- ✓ Lors du repas post-effort, consommer uniquement des sources de protéines et de lipides. Aucun glucide ne doit être apporté ;
- ✓ Réaliser le second entraînement de la journée avec des stocks de glycogène réduit ;
- ✓ Le repas suivant sera quant à lui riche en glucides.

La méthode **sleep-low** est une alternative dans le cas où l'athlète ne réalise pas d'entraînement biquotidien.

- ✓ En fin de journée, réaliser une séance d'entraînement à haute intensité (seuil ou VMA) ;
- ✓ Lors du diner post-effort, consommer uniquement des sources de protéines et de lipides. Aucun glucide ne doit être apporté ;
- ✓ Le lendemain matin, réaliser à jeun un entraînement à basse intensité ;
- ✓ Consommer un petit déjeuner de récupération avec des apports en glucides.

Les premiers cycles de ce type peuvent être un peu compliqués à réaliser, surtout pour ceux dont la lipolyse n'est pas efficace, et il faut s'attendre à une baisse des performances lors du second entraînement.

Pour obtenir les premiers résultats, plusieurs cycles doivent être réalisés, sur des périodes bien définies et à distance des compétitions.

Pour ceux qui voudraient aller plus loin et mettre individuellement en place cette approche, je vous conseille la lecture du livre de Fabrice Kuhn, « Ultra performance ».

#### 6.4. Efficacité de l'entraînement à jeun

L'entraînement à jeun est utilisé depuis longtemps pour améliorer la lipolyse. C'est effectivement le cas, mais nous savons aujourd'hui que **la méthode train low augmente l'oxydation des lipides de manière bien plus significative**. Nous constatons également une insulïnémie plus basse.

L'explication est simple, lors de l'entraînement à jeun, seul le glycogène hépatique est diminué. L'effort est réalisé avec des stocks de glycogène musculaire intacts. Il y a donc moins d'adaptations mitochondriales.

#### 6.5. Les sorties longues

De par la durée et la faible intensité des sorties longues, c'est une séance idéale pour travailler sa lipolyse. Plusieurs stratégies, progressives, peuvent être mises en place :

- ✓ Débuter la séance à l'eau, puis à partir de 1h20-30, intégrer un ravitaillement léger, de qualité, avec de faibles apports en glucides, aux alentours de 10 à 15gr par heure d'effort ;  
Par exemple : une barre Baouw par heure à consommer en plusieurs fois ;
- ✓ Réaliser des sorties de 2 à 3h uniquement avec de l'eau ;
- ✓ Les plus expérimentés pourront réaliser des sorties plus longues et/ou commencer la séance avec un niveau de glycogène bas.

Il sera important de soigner l'alimentation post-séance avec des apports suffisants en glucides, protéines et en lipides de qualités comme nous l'avons vu dans le chapitre dédié à la fenêtre métabolique.

#### 6.6. Comment périodiser cela ?

Il est trop complexe de généraliser la périodisation pour l'ensemble des athlètes, car elle doit pleinement s'intégrer dans une approche globale en prenant en compte l'entraînement, la charge, l'intensité, les objectifs dans la saison, les contraintes personnelles,...

La littérature scientifique rapporte tout de même des améliorations de performances avec une programmation de ce type sur 30 à 50% des séances. Par exemple :

- ✓ Tous les 3 jours ;
- ✓ Ou, 2 à 3 fois par semaine pendant 3 semaines.

Les propos de Sherman me semblent être très riches de sens pour comprendre comment mettre en place au mieux cette périodisation :

« **La question n'est pas de savoir dans quelle mesure un athlète peut surcompenser ses réserves de glycogène, mais plutôt d'identifier si son régime alimentaire contient suffisamment de glucides pour maintenir l'intensité cible, tout en créant un environnement métabolique propice aux adaptations mitochondriales.** »