



**SPORTING CLUB
SONGEONNAIS**

1949

REVUE PRATIQUE

Comment le muscle fournit-il l'énergie nécessaire à l'effort ?

Courir, sauter, accélérer ou frapper dans un ballon demande de l'énergie. Mais d'où vient-elle réellement ? Cette revue explique le rôle de l'ATP et la manière dont le système phosphagène, la glycolyse et le métabolisme oxydatif coopèrent en permanence pour répondre aux besoins du muscle.

THÉMATIQUES

Football
Physiologie de l'exercice
Entraînement & préparation physique

PUBLICS

Éducateurs
Joueurs

ÉTAT DES CONNAISSANCES

● Preuves solides

DERNIÈRE MISE À JOUR

août 2026



Version en ligne

Scannez le QR code pour consulter la revue et ses liens scientifiques sur songeonsfootball.fr.

COLLECTION REVUES PRATIQUES
Science du sport appliquée au football

Dans cette revue

De l'ATP aux sprints répétés : une lecture intégrée des voies qui fournissent l'énergie au muscle et de leur rôle en football.

01 Pourquoi le muscle a-t-il besoin d'énergie ?

03 Comment le muscle resynthétise-t-il l'ATP ?

05 Comment la durée et l'intensité modifient-elles leur contribution ?

07 Que se passe-t-il pendant un sprint ?

09 Et pendant un match de football ?

11 À retenir

13 Références scientifiques

02 Pourquoi les réserves d'ATP ne suffisent-elles pas ?

04 Les systèmes énergétiques fonctionnent-ils les uns après les autres ?

06 Quels carburants l'organisme utilise-t-il ?

08 Que se passe-t-il lorsque les sprints se répètent ?

10 Ce que nous savons... et ce qu'il faut éviter de simplifier

12 À propos de cette revue

Pourquoi le muscle a-t-il besoin d'énergie ?

Courir, sauter, changer de direction, frapper dans un ballon ou simplement maintenir une posture nécessitent que les muscles produisent de la force. À l'intérieur de chaque fibre musculaire, cette production de force repose sur une succession de phénomènes qui nécessitent en permanence de l'énergie.

Mais lorsqu'on parle d'« énergie » pendant l'exercice, il faut immédiatement apporter une précision importante : **le muscle n'utilise pas directement les glucides, les lipides ou les protéines pour se contracter.**

La molécule directement utilisée par les principaux mécanismes cellulaires impliqués dans la contraction musculaire est l'**adénosine triphosphate**, plus connue sous son abréviation **ATP** [1,2].

DÉFINITION – ATP

L'ATP, ou adénosine triphosphate, est une molécule présente dans toutes les cellules de l'organisme. Son hydrolyse – c'est-à-dire sa transformation notamment en ADP et phosphate inorganique – libère de l'énergie libre utilisable par de nombreux processus cellulaires.

Dans le muscle, l'ATP constitue ainsi l'intermédiaire immédiat entre les réserves énergétiques de l'organisme et les mécanismes permettant de produire un mouvement.

L'ATP permet aux protéines musculaires de produire de la force

La contraction musculaire repose notamment sur l'interaction entre deux protéines : **l'actine et la myosine**.

Les têtes de myosine peuvent se fixer sur l'actine puis changer de conformation afin de participer au glissement relatif des filaments musculaires. La répétition de ce cycle permet au muscle de développer de la force et, lorsque les conditions mécaniques le permettent, de se raccourcir.

L'ATP joue un rôle indispensable dans ce processus : il est hydrolysé par les ATPases de la myosine au cours du cycle des ponts actine-myosine [2,3].

Autrement dit, lorsque le joueur accélère, saute ou frappe dans le ballon, une partie importante de l'ATP utilisé par ses fibres musculaires sert directement au fonctionnement de cette « machinerie » contractile.

Mais produire de la force n'est pas le seul processus qui demande de l'ATP.

L'ATP permet aussi de contrôler le calcium

Pour qu'une fibre musculaire se contracte, la concentration de **calcium** à l'intérieur de certaines régions de la cellule doit augmenter.

Ce calcium permet l'activation des mécanismes qui rendent possible l'interaction entre l'actine et la myosine.

Lorsque la contraction doit diminuer ou s'arrêter, le calcium doit ensuite être transporté à nouveau vers une structure spécialisée appelée **réticulum sarcoplasmique**.

Ce transport est assuré par des pompes appelées **SERCA**, qui consomment elles aussi de l'ATP [2,3].

Le muscle utilise donc de l'énergie non seulement pour produire de la force, mais également pour **contrôler l'apparition et la relaxation de cette force**.

POUR COMPRENDRE

Une contraction musculaire ne correspond pas simplement à un muscle qui « se raccourcit ».

La cellule doit successivement transmettre un signal électrique, libérer du calcium, permettre l'interaction entre l'actine et la myosine, puis récupérer le calcium afin de pouvoir contrôler la contraction suivante.

Plusieurs étapes de ce fonctionnement nécessitent directement ou indirectement de l'ATP [2,3].

L'ATP participe également au maintien de l'excitabilité musculaire

Une fibre musculaire doit recevoir et propager un signal électrique pour pouvoir être activée.

Cette excitabilité dépend notamment du maintien de différences de concentrations en ions, en particulier le sodium et le potassium, entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule.

Une enzyme membranaire appelée **pompe sodium-potassium**, ou Na^+/K^+ -ATPase, participe au maintien de ces gradients ioniques et consomme elle aussi de l'ATP [2].

Ainsi, trois grandes fonctions représentent une part importante de la consommation énergétique du muscle :

- le fonctionnement des protéines contractiles, notamment les ATPases de la myosine ;
- le transport du calcium, notamment par les pompes SERCA ;
- le maintien des gradients ioniques nécessaires à l'excitabilité de la fibre musculaire [2,3].

L'ATP est donc indispensable à l'ensemble du fonctionnement mécanique et électrique du muscle.

Les aliments ne fournissent donc pas directement l'énergie de la contraction

Cette distinction est fondamentale pour comprendre la suite.

Lorsque nous mangeons des glucides ou des lipides, l'organisme peut stocker ou transporter l'énergie chimique contenue dans ces nutriments sous différentes formes.

Par exemple :

- les glucides peuvent être stockés sous forme de **glycogène** dans les muscles et le foie ;
- du **glucose** circule dans le sang ;
- les lipides constituent d'importantes réserves énergétiques, notamment dans le tissu adipeux et, dans une moindre mesure, à l'intérieur des fibres musculaires ;
- la **phosphocréatine** constitue également une réserve énergétique directement mobilisable dans le muscle [1].

Mais aucune de ces réserves ne remplace l'ATP au niveau des mécanismes contractiles.

Leur rôle est notamment de permettre à l'organisme de **resynthétiser l'ATP qui vient d'être utilisé**.

On peut donc représenter très simplement le fonctionnement général ainsi :

Réserves et substrats énergétiques → resynthèse de l'ATP → utilisation de l'ATP par la cellule musculaire → production et contrôle de la force

Cette distinction entre **ATP** et **substrats énergétiques** sera essentielle pour comprendre les systèmes énergétiques.

IDÉE REÇUE

« Pendant l'effort, le muscle brûle directement du sucre ou des graisses pour se contracter. »

Cette représentation est trop simplifiée. Les glucides et les lipides constituent des substrats capables d'alimenter les réactions permettant de resynthétiser l'ATP. C'est ensuite l'ATP qui est directement utilisé par les principaux mécanismes cellulaires responsables de la contraction et de son contrôle [1,2].

Une demande énergétique qui peut devenir considérable

Au repos, les besoins en ATP du muscle restent relativement faibles.

Dès que l'exercice commence, la situation change très rapidement.

Plus l'activité contractile devient importante, plus la vitesse à laquelle les molécules d'ATP sont utilisées augmente. Lors d'un exercice très intense, le renouvellement de l'ATP musculaire peut ainsi atteindre des niveaux extrêmement élevés [1,4].

Le défi auquel le muscle est confronté est donc considérable : **il doit être capable d'augmenter très rapidement la vitesse de fourniture d'ATP sans laisser ses réserves s'effondrer.**

C'est précisément pour résoudre ce problème que plusieurs voies métaboliques fonctionnent simultanément dans la cellule musculaire.

Elles utilisent notamment la phosphocréatine, les glucides et les lipides afin de renouveler continuellement l'ATP consommé [1].

SUR LE TERRAIN

Un sprint de cinq secondes, une course de plusieurs minutes et un match de football complet ont des caractéristiques très différentes. Pourtant, dans les trois situations, le problème fondamental reste le même : **fournir suffisamment d'ATP pour répondre aux besoins du muscle.**

Ce qui change n'est donc pas la molécule directement utilisée par le muscle, mais surtout **la vitesse à laquelle l'ATP doit être renouvelé et les voies métaboliques qui contribuent à cette resynthèse.**

Cette constatation conduit directement à une nouvelle question : si les réserves d'ATP présentes dans le muscle sont limitées, **comment l'organisme peut-il continuer à en fournir pendant plusieurs secondes, plusieurs minutes, voire plusieurs heures d'exercice ?**

Pourquoi les réserves d'ATP ne suffisent-elles pas ?

Nous avons vu que l'ATP constitue la molécule directement utilisée par plusieurs mécanismes essentiels au fonctionnement du muscle. On pourrait alors imaginer que l'organisme stocke de grandes quantités d'ATP dans les fibres musculaires afin de disposer d'une importante réserve prête à être consommée pendant l'exercice.

Ce n'est pas le cas.

Les muscles possèdent bien une certaine quantité d'ATP disponible immédiatement, mais **cette réserve est relativement faible par rapport à la quantité d'ATP qui peut être utilisée au cours d'un exercice** [1,4].

Pour continuer à produire de la force, le muscle ne peut donc pas simplement puiser dans un stock jusqu'à son épuisement : il doit **resynthétiser continuellement l'ATP qu'il utilise**.

Une petite réserve pour une demande qui peut devenir très élevée

Au repos, l'utilisation de l'ATP est relativement faible. Lorsqu'un exercice débute, la vitesse à laquelle l'ATP est hydrolysé augmente rapidement afin de répondre à l'augmentation de l'activité musculaire.

Lors d'un exercice de forte intensité, le débit de renouvellement de l'ATP dans le muscle peut devenir **plus de cent fois supérieur à celui observé au repos** [4].

Pourtant, même lorsque les quantités totales d'ATP utilisées au cours de l'exercice deviennent considérables, la concentration d'ATP présente dans le muscle peut rester relativement stable [4].

Ce paradoxe apparent s'explique très simplement : **les molécules d'ATP consommées sont continuellement remplacées par de nouvelles molécules d'ATP**.

Le fonctionnement énergétique du muscle dépend donc moins de la taille de son stock initial d'ATP que de sa capacité à en assurer continuellement la resynthèse.

POUR COMPRENDRE — Stock et débit

Il faut distinguer deux notions :

- le **stock d'ATP**, c'est-à-dire la quantité présente dans le muscle à un instant donné ;
- le **débit de renouvellement de l'ATP**, c'est-à-dire la quantité d'ATP utilisée puis resynthétisée par unité de temps.

Pendant un exercice intense, le stock peut relativement peu varier alors que le débit devient extrêmement élevé [4].

Autrement dit, observer une concentration d'ATP assez stable ne signifie absolument pas que le muscle utilise peu d'énergie.

L'ATP est continuellement utilisé... puis reformé

Lorsqu'une molécule d'ATP est hydrolysée, elle permet de fournir de l'énergie libre utilisable par la cellule et conduit notamment à la formation d'ADP et de phosphate inorganique.

De manière très simplifiée :

ATP → ADP + phosphate inorganique + énergie utilisable

Mais pour que l'activité musculaire puisse se poursuivre, l'ADP doit ensuite être transformé à nouveau en ATP.

Il faut donc réaliser la réaction inverse sur le plan fonctionnel :

ADP + phosphate inorganique → ATP

Cette seconde étape nécessite un apport énergétique provenant d'autres réactions métaboliques.

C'est précisément là qu'interviennent les différentes voies permettant la resynthèse de l'ATP [1,4].

Le muscle est ainsi engagé dans un cycle permanent :

utilisation de l'ATP → resynthèse de l'ATP → nouvelle utilisation → nouvelle resynthèse

Ce processus commence dès les premières contractions et se poursuit pendant toute la durée de l'exercice.

Pourquoi ne pas simplement laisser la concentration d'ATP diminuer ?

L'ATP ne constitue pas uniquement une réserve que l'on pourrait vider sans conséquence.

Comme nous l'avons vu précédemment, il intervient directement dans :

- le cycle des ponts actine-myosine ;
- le contrôle du calcium ;
- le maintien des gradients ioniques ;
- de nombreux autres processus cellulaires.

Une chute importante de la disponibilité de l'ATP compromettrait donc le fonctionnement normal de la fibre musculaire.

L'organisme dispose pour cette raison de mécanismes métaboliques capables d'augmenter très fortement la production d'ATP lorsque son utilisation augmente [1,4].

Des expériences réalisées chez l'être humain illustrent ce phénomène. Lors de contractions musculaires intenses maintenues jusqu'à la fatigue, la quantité totale d'ATP renouvelée au cours de l'exercice peut représenter plusieurs fois la quantité présente dans le muscle à un instant donné [5].

Autrement dit, **une même quantité apparente d'ATP peut être utilisée et reformée de nombreuses fois.**

IDÉE REÇUE

« **Le muscle possède une réserve d'ATP qu'il utilise progressivement jusqu'à ce qu'elle soit vide.** »

Cette représentation est trompeuse.

La réserve musculaire d'ATP est limitée et l'exercice repose essentiellement sur son **renouvellement permanent**. Pendant un effort, l'ATP est continuellement hydrolysé puis resynthétisé grâce à plusieurs voies métaboliques [1,4].

La phosphocréatine intervient immédiatement dans ce renouvellement

Parmi les mécanismes capables de reformer rapidement de l'ATP, le système **créatine-phosphocréatine** joue un rôle particulièrement important lorsque la demande énergétique augmente brutalement.

Le muscle contient de la phosphocréatine, souvent abrégée **PCr**, capable de transférer rapidement son groupement phosphate à l'ADP.

La réaction peut être représentée simplement :

Phosphocréatine + ADP → créatine + ATP

Cette réaction est catalysée par l'enzyme **créatine kinase**.

Elle permet donc de resynthétiser très rapidement de l'ATP [1,6].

DÉFINITION – Phosphocréatine

La phosphocréatine, ou PCr, est une molécule présente en quantité importante dans le muscle squelettique. Elle peut céder rapidement un groupement phosphate à l'ADP afin de permettre la resynthèse d'ATP.

Elle constitue ainsi un système essentiel de tampon et de renouvellement rapide de l'ATP lorsque la demande énergétique augmente brutalement.

Lors d'un exercice intense, les concentrations de phosphocréatine peuvent fortement diminuer alors que la concentration d'ATP est beaucoup mieux préservée [4,5].

Ce phénomène illustre parfaitement son rôle : **la phosphocréatine est consommée pour contribuer au maintien de la disponibilité de l'ATP.**

Mais la phosphocréatine possède elle aussi une capacité limitée

La phosphocréatine permet une resynthèse très rapide de l'ATP, mais ses réserves musculaires ne sont pas infinies.

Lors d'efforts maximaux, elles peuvent diminuer très rapidement. Des études réalisées par biopsie musculaire montrent qu'une part importante de la phosphocréatine peut être utilisée en quelques secondes d'exercice intense [5].

Elle ne peut donc pas assurer seule la fourniture d'ATP nécessaire à la poursuite d'un exercice prolongé.

D'autres réactions doivent simultanément contribuer à la resynthèse de l'ATP.

Elles impliquent notamment :

- la dégradation des glucides ;
- la glycolyse ;
- les réactions mitochondriales ;
- l'utilisation oxydative des glucides et des lipides [1,6].

C'est l'association de ces différents mécanismes qui permet au muscle de faire face à des besoins énergétiques extrêmement différents, depuis un sprint maximal de quelques secondes jusqu'à plusieurs heures d'activité.

SUR LE TERRAIN

Lorsqu'un joueur réalise une accélération maximale, il n'est pas simplement en train de « vider son ATP ».

Dès les premières contractions, l'ATP utilisé doit être reformé. La phosphocréatine contribue très rapidement à cette resynthèse, tandis que d'autres voies métaboliques participent également à la fourniture énergétique.

Lorsque le joueur ralentit ou récupère entre deux actions, le fonctionnement énergétique continue : il faut notamment **reconstituer les réserves qui permettront de produire un nouvel effort intense.**

Un système remarquablement équilibré

L'un des aspects les plus remarquables du métabolisme musculaire est sa capacité à adapter très rapidement la fourniture d'ATP aux besoins de la contraction.

Lorsque la demande augmente, les réactions responsables de sa resynthèse accélèrent elles aussi.

Lorsqu'elle diminue, leur activité s'adapte à nouveau.

Cette régulation permet à la concentration d'ATP de rester relativement protégée malgré des variations considérables de la demande énergétique [4].

Le véritable enjeu énergétique de l'exercice peut donc être résumé ainsi :

le muscle doit continuellement adapter la vitesse de resynthèse de l'ATP à la vitesse à laquelle il l'utilise.

Reste alors à comprendre **comment** il y parvient.

La phosphocréatine constitue une première réponse, mais elle n'est qu'une partie du système. La glycolyse et le métabolisme oxydatif participent eux aussi, simultanément, à la resynthèse de l'ATP.

Comment le muscle resynthétise-t-il l'ATP ?

Puisque les réserves d'ATP présentes dans le muscle sont limitées, l'exercice ne peut se poursuivre que si l'ATP utilisé est continuellement reformé.

Pour y parvenir, la fibre musculaire dispose de plusieurs réactions métaboliques capables de transférer de l'énergie vers la resynthèse de l'ATP.

Pour simplifier leur compréhension, on distingue généralement **trois grandes voies de fourniture d'ATP** :

- le système phosphagène, principalement grâce à la phosphocréatine ;
- la production glycolytique d'ATP ;
- la phosphorylation oxydative dans les mitochondries [1,6].

Ces trois voies diffèrent notamment par :

- leur vitesse de production d'ATP ;
- la quantité totale d'ATP qu'elles peuvent fournir ;
- les substrats qu'elles utilisent ;
- leur évolution au cours de l'effort.

Mais cette classification ne doit surtout pas conduire à imaginer trois systèmes indépendants qui s'allumeraient successivement.

Ils participent simultanément à la fourniture énergétique dès le début de l'exercice.

La contribution relative de chacun évolue ensuite selon les caractéristiques de l'effort.

POUR COMPRENDRE – Produire ou resynthétiser l'ATP ?

Dans le langage courant, on parle souvent de « production d'ATP ».

D'un point de vue fonctionnel, il est plus précis de parler de **resynthèse de l'ATP**, puisque les réactions métaboliques utilisent notamment l'ADP et le phosphate disponibles pour reformer l'ATP précédemment hydrolysé.

Dans cette revue, les expressions « production d'ATP » et « fourniture d'ATP » pourront parfois être employées pour faciliter la lecture, mais elles désignent ce processus permanent de renouvellement.

Le système phosphagène : fournir de l'ATP très rapidement

Nous avons déjà rencontré la **phosphocréatine**, ou PCr.

Lorsque la demande énergétique augmente brutalement, la réaction catalysée par la créatine kinase permet de transférer rapidement un groupement phosphate de la phosphocréatine vers l'ADP :



Cette réaction présente un avantage majeur : elle permet de renouveler l'ATP **très rapidement**.

Elle joue donc un rôle particulièrement important lorsque le muscle doit augmenter brutalement son débit énergétique, par exemple lors :

- d'un démarrage ;
- d'un saut ;
- d'un sprint ;
- d'une frappe ;
- d'une accélération maximale.

Des mesures réalisées dans le muscle humain montrent qu'une quantité importante de phosphocréatine peut être dégradée en seulement quelques secondes d'exercice maximal [5].

Mais cette grande vitesse possède une contrepartie : **la quantité de phosphocréatine stockée dans le muscle est limitée**.

La contribution de cette voie peut donc être très importante au début d'un effort intense, mais elle ne peut pas maintenir seule la resynthèse de l'ATP pendant une durée prolongée.

DÉFINITION – Système phosphagène

Le système phosphagène regroupe les réactions permettant une resynthèse très rapide de l'ATP à partir de composés phosphatés présents dans le muscle, principalement la phosphocréatine.

Il offre une **grande puissance de fourniture énergétique**, mais une **capacité limitée**.

Une autre réaction, catalysée par l'**adénylate kinase**, peut également contribuer à reformer de l'ATP à partir de deux molécules d'ADP :



Sa contribution est généralement moins importante que celle de la phosphocréatine, mais elle rappelle que la réalité métabolique est plus complexe qu'une simple division en trois cases parfaitement séparées [6].

La glycolyse : produire rapidement de l'ATP à partir des glucides

La deuxième grande voie repose sur la **glycolyse**.

La glycolyse correspond à une succession de réactions permettant de dégrader le glucose ou le glycogène musculaire jusqu'au pyruvate.

Certaines étapes de cette succession permettent directement la formation d'ATP.

Le muscle peut donc resynthétiser rapidement de l'ATP à partir des glucides sans que cette production d'ATP nécessite directement l'intervention de l'oxygène.

Lorsque l'exercice devient intense, la vitesse de dégradation du glycogène et le flux glycolytique peuvent augmenter très rapidement.

Des biopsies réalisées pendant des exercices maximaux montrent par exemple que plusieurs enzymes régulant le métabolisme des glucides sont fortement activées **dans les premières secondes de l'effort** [7].

La glycolyse ne constitue donc pas un mécanisme qui commencerait seulement lorsque la phosphocréatine serait épuisée.

Elle contribue déjà à la fourniture d'ATP alors que la phosphocréatine est encore fortement mobilisée.

IDÉE REÇUE

« **Pendant les premières secondes, le muscle utilise uniquement la phosphocréatine.** »

Cette représentation est incorrecte.

Lors d'un effort maximal très court, la phosphocréatine joue un rôle majeur, mais la glycolyse est elle aussi activée très rapidement. Les différentes voies de resynthèse de l'ATP se chevauchent dès le début de l'exercice [7].

Et le lactate dans tout cela ?

Lorsque le flux glycolytique est important, une partie du pyruvate produit est convertie en **lactate**.

Cette réaction permet notamment de régénérer le NAD⁺ nécessaire à la poursuite de la glycolyse.

La présence de lactate ne signifie donc pas simplement que le muscle « manque d'oxygène », ni que la glycolyse constitue un système fonctionnant uniquement lorsque l'oxygène devient absent.

Cette question mérite cependant une revue à part entière, car le lactate peut lui-même être transporté, oxydé et utilisé dans le métabolisme énergétique.

PRUDENCE

L'expression traditionnelle « **glycolyse anaérobie** » peut être utile pour désigner une production d'ATP ne nécessitant pas directement l'oxygène.

Elle devient toutefois trompeuse lorsqu'elle laisse penser que la glycolyse ne fonctionne qu'en absence d'oxygène ou que la formation de lactate prouve nécessairement un défaut d'oxygénation du muscle.

La phosphorylation oxydative : une production d'ATP dans les mitochondries

La troisième grande voie repose sur le métabolisme **oxydatif**.

Elle se déroule principalement dans les mitochondries, structures cellulaires spécialisées dans lesquelles l'énergie provenant notamment des glucides et des lipides peut être utilisée pour produire de l'ATP.

Les produits issus de la dégradation des substrats énergétiques alimentent notamment :

- le cycle des acides tricarboxyliques ;
- la chaîne de transport des électrons ;
- la phosphorylation oxydative.

Dans cette chaîne de réactions, l'oxygène joue un rôle essentiel en tant qu'accepteur final des électrons.

Cette voie permet de fournir une quantité considérable d'ATP et peut soutenir l'exercice pendant des durées beaucoup plus longues que la seule utilisation des phosphagènes.

Elle ne doit cependant pas être considérée comme un système « lent » qui resterait inactif pendant les premières secondes de l'exercice.

Le système oxydatif commence lui aussi à répondre très rapidement

Lorsque l'exercice débute, la consommation d'oxygène du muscle augmente rapidement.

Dans une étude réalisée chez l'être humain lors d'un exercice intense des extenseurs du genou, Bangsbo et ses collaborateurs ont observé une augmentation significative de la consommation musculaire d'oxygène dès les **six premières secondes** d'exercice [8].

Le système oxydatif contribue donc lui aussi à la fourniture d'ATP dès le début de l'effort.

Sa contribution augmente progressivement à mesure que la consommation d'oxygène du muscle s'élève.

IDÉE REÇUE

« **Le système aérobie ne commence à fonctionner qu'après plusieurs minutes d'exercice.** »

C'est faux.

Le métabolisme oxydatif fonctionne déjà au repos et sa contribution augmente dès le début de l'exercice. Des mesures effectuées directement chez l'être humain montrent une augmentation de la consommation musculaire d'oxygène en quelques secondes lors du passage à un exercice intense [8].

Ce qui prend du temps n'est donc pas son « démarrage », mais la montée progressive de sa contribution jusqu'au niveau requis par l'exercice.

Une différence fondamentale entre vitesse et capacité

Pour comprendre pourquoi plusieurs voies existent, il faut distinguer deux caractéristiques importantes.

La première est la **vitesse** à laquelle une voie peut contribuer à renouveler l'ATP.

La seconde est sa **capacité**, c'est-à-dire la quantité totale d'énergie qu'elle peut contribuer à fournir.

De manière simplifiée :

Voie	Vitesse de fourniture d'ATP	Capacité	Principaux substrats ou réserves
Phosphagène	Très élevée	Très limitée	Phosphocréatine
Glycolytique	Élevée	Limitée	Glucose, glycogène
Oxydative	Plus progressive	Très importante	Glucides, lipides

Ce tableau permet de comprendre les grandes différences fonctionnelles entre les voies, mais il ne doit pas être interprété comme un classement rigide.

La vitesse et la contribution réelles dépendent notamment :

- de l'intensité de l'exercice ;
- de sa durée ;
- du muscle sollicité ;
- du niveau d'entraînement ;
- de la disponibilité des substrats ;
- de l'état de fatigue ;
- des périodes de récupération.

PRUDENCE

Les termes « puissance » et « capacité » énergétiques sont utiles pédagogiquement, mais les trois voies ne possèdent pas une valeur unique et fixe valable pour tous les individus et tous les exercices.

Les estimations dépendent fortement du protocole et des méthodes utilisées pour mesurer les différentes contributions énergétiques.

Les trois voies peuvent fournir de l'ATP au même moment

L'un des meilleurs moyens de comprendre ce fonctionnement consiste à observer ce qui se passe lors d'un exercice intense.

Dans une étude classique réalisée chez l'être humain jusqu'à épuisement, Bangsbo et ses collaborateurs ont simultanément observé :

- une diminution importante de la phosphocréatine ;
- une forte production de lactate témoignant d'une activité glycolytique élevée ;
- une consommation importante d'oxygène [9].

Autrement dit, pendant un même effort, **les phosphagènes, la glycolyse et le métabolisme oxydatif contribuent simultanément à répondre à la demande énergétique.**

Les proportions changent au cours de l'exercice, mais il n'existe pas de moment précis où l'un des systèmes « s'éteint » pour laisser la place au suivant.

POUR COMPRENDRE – Trois robinets plutôt que trois interrupteurs

Pour se représenter le fonctionnement énergétique, il est préférable d'imaginer plusieurs **robinets dont le débit varie** plutôt que trois interrupteurs que l'on allumerait successivement.

Dès le début de l'exercice, plusieurs voies contribuent à la resynthèse de l'ATP.

Selon la situation, le débit provenant de certaines voies devient très important tandis que celui d'autres voies reste plus faible. Quelques secondes plus tard, cette répartition peut déjà avoir changé.

Cette idée est essentielle pour comprendre la physiologie de l'exercice.

Elle signifie notamment qu'il est incorrect d'associer automatiquement :

- un sprint à une seule voie énergétique ;
- un effort intermédiaire à une deuxième ;
- un effort long à une troisième.

Le muscle ne choisit pas une « filière ».

Il combine continuellement plusieurs mécanismes de resynthèse de l'ATP afin de répondre le plus efficacement possible à la demande énergétique.

SUR LE TERRAIN

Un joueur qui réalise un sprint utilise fortement ses réserves de phosphocréatine et sollicite rapidement la glycolyse, mais son métabolisme oxydatif participe lui aussi à l'effort.

Lorsqu'il ralentit ensuite, la répartition des contributions évolue à nouveau.

C'est particulièrement important en football, où les périodes de marche, de course, d'accélération, de sprint et de récupération relative s'enchaînent continuellement.

Nous pouvons donc désormais abandonner une première représentation trompeuse : les systèmes énergétiques ne correspondent pas à trois phases successives de l'exercice.

La question suivante devient alors essentielle : **comment leur contribution respective évolue-t-elle lorsque l'intensité et la durée de l'effort changent ?**

Les systèmes énergétiques fonctionnent-ils les uns après les autres ?

Pendant longtemps, l'enseignement de la physiologie de l'exercice a souvent reposé sur une représentation simple des systèmes énergétiques.

Un effort très court et explosif était associé à la « filière anaérobie alactique », un effort un peu plus long à la « filière anaérobie lactique », puis un exercice prolongé à la « filière aérobie ».

Cette classification possède un intérêt pédagogique : elle permet de comprendre que **la contribution relative des différentes voies énergétiques varie fortement selon les caractéristiques de l'effort**.

Mais lorsqu'elle est interprétée trop littéralement, elle conduit à une représentation incorrecte du fonctionnement réel du muscle.

Le corps ne dispose pas de trois moteurs qu'il allumerait successivement.

Les différentes voies de resynthèse de l'ATP fonctionnent simultanément. Ce qui change au cours de l'effort, c'est principalement leur contribution relative et leur débit [7–10].

IDÉE REÇUE

« **Le muscle utilise d'abord la filière anaérobie alactique, puis la filière lactique et enfin la filière aérobie.** »

Cette représentation est incorrecte.

Le système phosphagène, la glycolyse et la phosphorylation oxydative peuvent contribuer simultanément à la resynthèse de l'ATP dès le début de l'exercice. Leur importance respective évolue ensuite continuellement en fonction de la demande énergétique [7–10].

D'où vient cette représentation en « filières » ?

Découper le métabolisme énergétique en grandes catégories est utile pour apprendre.

Il est en effet plus facile de présenter séparément :

- la phosphocréatine ;
- la glycolyse ;
- le métabolisme oxydatif ;

avant d'expliquer leurs interactions.

Le problème apparaît lorsque cette séparation pédagogique devient une représentation chronologique.

On rencontre alors parfois des schémas laissant penser qu'un effort fonctionnerait selon une succession de périodes :

quelques secondes de phosphocréatine → quelques dizaines de secondes de glycolyse → métabolisme aérobie

avec des frontières relativement précises entre chacune.

Or, les mesures réalisées chez l'être humain montrent que la réalité est beaucoup plus continue.

Comme nous l'avons vu précédemment :

- la phosphocréatine est fortement mobilisée dès les premières secondes ;
- la glycolyse est elle aussi activée presque immédiatement lors d'un exercice intense [7] ;
- la consommation musculaire d'oxygène augmente dès les premières secondes de l'effort [8].

Il n'existe donc pas une première période pendant laquelle seule la phosphocréatine fonctionnerait, suivie d'une deuxième pendant laquelle seule la glycolyse prendrait le relais.

Une question de contribution dominante, et non d'exclusivité

Il faut distinguer deux affirmations très différentes.

Dire :

« Lors d'un sprint très court, le système phosphagène fournit une part importante de l'énergie nécessaire. »

est cohérent avec les connaissances scientifiques.

Dire :

« Lors d'un sprint très court, seul le système phosphagène fonctionne. »

ne l'est pas.

La même distinction doit être faite pour les efforts prolongés.

Lors d'une course longue réalisée à intensité modérée, le métabolisme oxydatif assure la grande majorité de la resynthèse de l'ATP. Cela ne signifie pas pour autant que les autres réactions métaboliques disparaissent totalement.

Le terme **dominant** est donc beaucoup plus pertinent que le terme **exclusif**.

POUR COMPRENDRE — Dominant ne signifie pas exclusif

Une voie énergétique peut fournir la majorité de l'ATP nécessaire à un moment donné sans être la seule à fonctionner.

Il est donc raisonnable de qualifier une voie de « dominante » lorsqu'elle fournit une part prépondérante de l'énergie, sans supposer que les autres systèmes sont arrêtés.

Les contributions changent dès les premières secondes

Lorsqu'un exercice intense débute brutalement, la demande d'ATP augmente presque immédiatement.

Le système phosphagène peut augmenter extrêmement rapidement sa contribution. Il constitue donc un moyen particulièrement efficace de répondre à l'augmentation brutale de la demande.

La glycolyse est également activée très rapidement.

Parallèlement, le métabolisme oxydatif augmente progressivement sa contribution à mesure que la consommation d'oxygène du muscle s'élève [7,8].

On peut donc représenter les premières secondes d'un exercice intense comme une **modification permanente des proportions** provenant de plusieurs sources.

Au début :

- la contribution de la phosphocréatine est particulièrement importante ;
- la glycolyse participe déjà ;
- le métabolisme oxydatif contribue lui aussi, mais dans une proportion généralement plus faible lors d'un effort maximal extrêmement bref.

Si l'exercice se prolonge :

- les réserves de phosphocréatine diminuent ;
- la contribution glycolytique évolue ;
- la contribution oxydative devient progressivement plus importante.

Il ne se produit pourtant aucun « changement de filière » à un instant précis.

Il n'existe pas de chronomètre universel des systèmes énergétiques

Certaines représentations pédagogiques attribuent parfois des durées précises aux différentes filières.

Par exemple :

- de 0 à 6 secondes : anaérobie alactique ;
- de 6 secondes à 1 minute : anaérobie lactique ;
- au-delà : aérobie.

Ces valeurs peuvent éventuellement aider à illustrer des **tendances générales**, mais elles deviennent scientifiquement trompeuses lorsqu'elles sont considérées comme des frontières physiologiques.

Il n'existe aucun mécanisme dans l'organisme qui, à la sixième ou à la trentième seconde, arrêterait soudainement une voie pour en activer une autre.

La contribution des différents systèmes dépend de nombreux facteurs :

- l'intensité réelle de l'exercice ;
- sa durée ;
- la quantité de masse musculaire sollicitée ;
- le mode d'exercice ;
- le niveau d'entraînement ;
- les caractéristiques individuelles ;
- la disponibilité des substrats ;
- le niveau initial des réserves de phosphocréatine ;
- les périodes de récupération précédentes [10].

Deux exercices de même durée peuvent donc présenter des contributions énergétiques différentes.

La durée seule ne permet pas de déterminer le système dominant

Imaginons deux exercices durant exactement trente secondes.

Le premier consiste à courir avec une intensité relativement faible.

Le second consiste à produire l'effort maximal possible pendant toute la durée.

Ils durent tous les deux trente secondes.

Pourtant, leur demande énergétique et la contribution respective des différentes voies seront profondément différentes.

La durée de l'exercice constitue donc une information importante, mais **elle ne suffit jamais à elle seule pour déterminer le profil énergétique d'un effort.**

L'intensité est tout aussi fondamentale.

IDÉE REÇUE

« Il suffit de connaître la durée d'un exercice pour savoir quelle filière il travaille. »

Non.

Deux exercices de même durée peuvent imposer des demandes métaboliques très différentes. La contribution énergétique dépend notamment de l'intensité, du mode d'exercice, de la récupération, du niveau d'entraînement et des caractéristiques du sportif [10].

Même un effort maximal très court possède une contribution oxydative

Si les systèmes fonctionnaient réellement de manière successive, le métabolisme oxydatif devrait être pratiquement absent pendant les premières secondes d'un effort maximal.

Les données expérimentales ne montrent pas cela.

Bangsbo et ses collaborateurs ont mesuré directement la consommation d'oxygène musculaire au début d'un exercice intense chez l'être humain. Une augmentation significative était déjà observable dans les premières secondes [8].

Cela ne signifie évidemment pas que le métabolisme oxydatif est la principale source de fourniture énergétique lors d'un sprint de quelques secondes.

Il signifie simplement qu'il **participe déjà**.

La distinction est essentielle.

Pourquoi utilise-t-on encore les termes « aérobie » et « anaérobie » ?

Ces termes restent utiles, à condition de bien comprendre ce qu'ils signifient.

La **phosphorylation oxydative** dépend de réactions dans lesquelles l'oxygène joue un rôle essentiel.

À l'inverse, la resynthèse d'ATP associée à la phosphocréatine ou à certaines réactions glycolytiques ne nécessite pas directement l'utilisation d'oxygène.

On peut donc distinguer :

- une contribution dite **aérobie** ou oxydative ;
- une contribution dite **anaérobie**, regroupant principalement la contribution des phosphagènes et de la glycolyse lorsqu'on estime le coût énergétique d'un exercice.

Mais « anaérobie » ne signifie pas nécessairement que **l'oxygène est absent du muscle**.

Un sportif peut produire énormément d'énergie par les voies dites anaérobies alors que son organisme transporte et utilise simultanément de grandes quantités d'oxygène.

DÉFINITION – Contribution anaérobie

Dans l'étude de l'énergétique de l'exercice, l'expression « contribution anaérobie » désigne généralement la part de la fourniture énergétique attribuée aux réactions qui ne dépendent pas directement de la phosphorylation oxydative.

Elle ne signifie pas nécessairement que l'exercice se déroule en absence d'oxygène.

« Anaérobie alactique » et « anaérobie lactique » : des termes à manier avec prudence

Dans le vocabulaire traditionnel de l'entraînement, le système phosphagène est souvent appelé « **filière anaérobie alactique** » et la glycolyse rapide « **filière anaérobie lactique** ».

Ces expressions ont l'avantage d'être largement connues.

Elles présentent cependant plusieurs limites.

Le terme « **alactique** » pourrait laisser penser qu'aucun lactate n'est produit pendant un effort dominé par la phosphocréatine. Pourtant, puisque la glycolyse peut être activée dès les premières secondes, une production de lactate peut déjà se produire.

Inversement, qualifier une voie de « **lactique** » peut laisser penser que le lactate constitue le mécanisme responsable de la fourniture énergétique ou un simple déchet associé à cette voie, ce qui ne décrit pas correctement son rôle métabolique.

Pour cette raison, dans cette revue, nous privilégierons autant que possible les termes :

- **système phosphagène** ;
- **glycolyse** ou **contribution glycolytique** ;
- **métabolisme oxydatif** ou **phosphorylation oxydative**.

PRUDENCE

Utiliser les expressions « anaérobie alactique », « anaérobie lactique » et « aérobie » n'est pas en soi une erreur.

Le problème apparaît lorsque ces termes conduisent à imaginer des systèmes indépendants, des frontières temporelles fixes ou une absence totale d'oxygène pendant les efforts dits « anaérobies ».

Une meilleure représentation : plusieurs débits qui évoluent ensemble

Une représentation plus fidèle consiste à reprendre l'image des **robinets** évoquée précédemment.

Lorsque la demande énergétique augmente brutalement :

- le débit provenant de la phosphocréatine augmente fortement ;
- le débit glycolytique augmente rapidement ;
- le débit oxydatif commence lui aussi à augmenter.

Au fil du temps, les différents débits changent.

Le débit provenant de la phosphocréatine diminue notamment à mesure que ses réserves sont utilisées.

La contribution oxydative augmente progressivement.

La glycolyse peut connaître une contribution très importante puis évoluer elle aussi.

Mais **tous ces changements se produisent sur un continuum**.

Il n'existe pas trois cases séparées.

Cette représentation change-t-elle quelque chose pour l'entraînement ?

Oui, parce que le vocabulaire influence souvent la manière de concevoir les exercices.

Si l'on considère qu'un exercice de huit secondes appartient à une « filière » et qu'un exercice de trente secondes appartient à une autre, on peut être tenté de croire qu'il est possible d'isoler parfaitement chaque système énergétique.

La réalité est différente.

Modifier :

- la durée de l'effort ;
- son intensité ;
- le nombre de répétitions ;
- la durée de récupération ;
- le caractère actif ou passif de cette récupération ;

modifie progressivement la contribution des différentes voies.

Mais cela ne permet généralement pas d'en isoler totalement une seule.

SUR LE TERRAIN

Dire qu'un exercice « travaille la filière anaérobie alactique » peut être pratique dans le langage courant, mais il est plus précis de dire que **l'exercice cherche à solliciter fortement la capacité à produire des efforts très intenses avec une contribution importante du système phosphagène**.

Cette formulation reconnaît que les autres voies énergétiques continuent elles aussi à participer.

Cette différence peut paraître purement sémantique.

Elle ne l'est pas.

Elle évite notamment de croire qu'un joueur développant sa capacité aérobie ne travaille que pendant des courses longues, ou qu'un joueur réalisant des sprints ne sollicite pas son métabolisme oxydatif.

Le football illustre parfaitement cette interaction

Un match de football est constitué d'une succession permanente de situations énergétiques différentes.

Un joueur peut :

- marcher ;
- trotter ;
- accélérer ;

- réaliser un sprint ;
- freiner ;
- changer de direction ;
- sauter ;
- lutter pour le ballon ;
- puis récupérer quelques secondes à intensité plus faible.

La demande de resynthèse de l'ATP varie donc constamment.

Pendant une action explosive, la contribution des voies capables de fournir rapidement de l'ATP augmente fortement.

Pendant les périodes de moindre intensité, le métabolisme oxydatif joue un rôle particulièrement important pour assurer l'activité en cours mais aussi pour participer à la récupération entre les actions intenses.

Quelques secondes plus tard, le joueur peut devoir accélérer à nouveau.

Le football n'est donc ni un sport « aérobie », ni un sport « anaérobie ».

Il est un sport dans lequel les différents systèmes énergétiques interagissent continuellement pour répondre à une demande extrêmement variable.

SUR LE TERRAIN

Pour l'éducateur, la question la plus pertinente n'est donc généralement pas :

« **Quelle filière suis-je en train de travailler ?** »

mais plutôt :

« **Quelle demande énergétique mon exercice impose-t-il au joueur, et comment l'intensité, la durée et la récupération modifient-elles cette demande ?** »

Ce changement de question permet de mieux relier la physiologie aux véritables contraintes du football.

Comprendre que les différentes voies fonctionnent simultanément ne signifie pas que leur contribution est toujours identique.

Bien au contraire.

Lors d'un sprint maximal, d'un effort d'une minute ou d'une course prolongée, les proportions peuvent être profondément différentes.

La prochaine étape consiste donc à examiner **comment l'intensité et la durée de l'exercice modifient progressivement la contribution relative des différents systèmes énergétiques.**

Comment la durée et l'intensité modifient-elles leur contribution ?

Nous savons désormais que les différentes voies énergétiques fonctionnent simultanément.

Cela ne signifie cependant pas qu'elles contribuent toujours dans les mêmes proportions.

La répartition de la fourniture énergétique évolue continuellement en fonction des caractéristiques de l'exercice. Parmi les facteurs les plus importants figurent **la durée et l'intensité de l'effort** [10,11].

Cette idée est essentielle : un sprint maximal de quelques secondes, un effort maximal d'une minute et une course prolongée utilisent tous plusieurs voies de resynthèse de l'ATP, mais **pas dans les mêmes proportions ni avec les mêmes débits**.

Lors d'un effort maximal très court, la contribution anaérobie domine

Lorsqu'un exercice maximal débute brutalement, la demande énergétique augmente presque instantanément.

Le système phosphagène peut fournir de l'ATP à un débit extrêmement élevé, tandis que la glycolyse est elle aussi rapidement activée. Le métabolisme oxydatif augmente parallèlement sa contribution, mais il ne peut pas immédiatement couvrir à lui seul l'énorme demande énergétique imposée par un effort maximal.

La contribution des voies ne dépendant pas directement de la phosphorylation oxydative est donc particulièrement importante lors des efforts maximaux très courts.

Une revue systématique publiée en 2026 a regroupé les résultats de 102 études consacrées à la contribution énergétique pendant des efforts maximaux de différentes durées [11].

À partir de ces données, les auteurs ont modélisé une contribution moyenne d'environ :

Durée de l'effort maximal	Contribution anaérobie estimée	Contribution aérobie estimée
10 secondes	91 %	9 %
60 secondes	58 %	42 %

Ces chiffres illustrent clairement un principe : **plus un effort maximal se prolonge, plus la contribution relative du métabolisme oxydatif augmente** [11].

Ils ne doivent cependant pas être interprétés comme des valeurs universelles applicables à chaque sportif et à chaque exercice.

PRUDENCE – Des estimations, pas des lois physiologiques

Les valeurs de contribution énergétique sont des estimations obtenues à partir de différentes méthodes expérimentales.

Elles varient notamment selon :

- le protocole utilisé ;
- le mode d'exercice ;
- la stratégie d'effort ;
- les caractéristiques des participants ;
- la méthode employée pour estimer les contributions énergétiques.

Les pourcentages présentés dans cette revue permettent donc de comprendre des **tendances générales**, et non de déterminer précisément ce qui se passe chez chaque joueur [11].

Même dix secondes ne sont pas « 100 % anaérobies »

L'estimation d'environ 9 % de contribution aérobie lors d'un effort maximal de dix secondes peut sembler faible.

Mais elle permet de corriger une représentation importante : **le métabolisme oxydatif participe déjà à un effort extrêmement court** [11].

Cela rejoint les observations expérimentales présentées précédemment, montrant une augmentation de la consommation musculaire d'oxygène dès les premières secondes d'un exercice intense [8].

La contribution relative reste faible comparativement aux voies phosphagène et glycolytique, mais elle n'est pas nulle.

IDÉE REÇUE

« Un sprint de dix secondes est un effort 100 % anaérobie. »

Non.

Les voies dites anaérobies dominent très largement la fourniture énergétique lors d'un effort maximal aussi court, mais le métabolisme oxydatif contribue lui aussi à la resynthèse de l'ATP [8,11].

Il est donc plus juste de parler d'un effort **à forte dominante anaérobie** que d'un effort exclusivement anaérobie.

La contribution oxydative augmente rapidement lorsque l'effort se prolonge

À mesure que l'exercice maximal continue, plusieurs phénomènes se produisent simultanément.

La disponibilité de la phosphocréatine diminue progressivement.

Le débit glycolytique peut devenir très important, puis évoluer au cours de l'effort.

Parallèlement, la consommation d'oxygène augmente et la phosphorylation oxydative fournit une part croissante de l'ATP nécessaire [10,11].

La revue systématique de 2026 estime ainsi qu'à 60 secondes d'exercice maximal, la contribution aérobie représente déjà en moyenne environ **42 % de la fourniture énergétique totale** [11].

Cela signifie qu'un effort d'une minute, parfois présenté comme essentiellement « anaérobie lactique », possède en réalité une contribution oxydative considérable.

Lors d'un Wingate maximal de 30 secondes, Beneke et ses collaborateurs ont par exemple estimé chez onze jeunes hommes une contribution moyenne d'environ :

- 31 % pour la composante phosphagène ;
- 50 % pour la composante glycolytique ;
- 19 % pour le métabolisme oxydatif [13].

Ces valeurs concernent un protocole précis et un petit groupe de participants. Elles ne doivent pas être généralisées à tous les exercices de 30 secondes.

Elles montrent cependant une nouvelle fois qu'un effort traditionnellement qualifié d'« anaérobie » reçoit déjà une contribution énergétique mesurable du métabolisme oxydatif.

POUR COMPRENDRE – Une proportion faible ne signifie pas une faible activité

Lorsque nous parlons de « 20 % de contribution aérobie », nous décrivons une **proportion du coût énergétique total de l'exercice**.

Cela ne signifie pas que le métabolisme oxydatif fonctionne faiblement.

Lors d'un exercice maximal, la demande énergétique totale peut être extrêmement élevée. Une proportion relativement faible peut donc correspondre malgré tout à un débit oxydatif important.

À quel moment le métabolisme oxydatif devient-il dominant ?

C'est une question fréquemment posée.

Les données regroupées par Gastin et Suppiah permettent d'en proposer une estimation pour des **efforts maximaux continus réalisés par des adultes**.

Dans leur modèle, le point auquel les contributions aérobie et anaérobie deviennent équivalentes se situe autour de **78,6 secondes** [11].

Au-delà, la proportion provenant du métabolisme oxydatif devient progressivement majoritaire.

Une étude récente chez 18 cyclistes ayant réalisé des contre-la-montre maximaux de 10 à 180 secondes a obtenu un résultat assez proche : la répartition moyenne atteignait environ 50 % de contribution aérobie et 50 % de contribution anaérobie aux alentours de **73 secondes** [12].

À 180 secondes, cette même étude estimait la contribution aérobie moyenne à environ 71 % [12].

Ces résultats illustrent bien la progression générale.

Ils ne signifient cependant pas que :

« **la filière aérobie commence à 75 secondes** ».

Le métabolisme oxydatif fonctionnait déjà bien avant.

À cet instant, il devient simplement **majoritaire dans la fourniture énergétique totale estimée**.

IDÉE REÇUE

« **Après environ une minute, le corps passe dans la filière aérobie.** »

Cette formulation confond deux phénomènes.

Le métabolisme oxydatif contribue dès le début de l'effort. Lorsque l'exercice maximal se prolonge, sa contribution relative augmente progressivement jusqu'à devenir majoritaire.

Il n'existe donc pas un instant précis où l'organisme « passe » soudainement d'un métabolisme anaérobie à un métabolisme aérobie [8,11].

Pourquoi la durée favorise-t-elle progressivement la contribution oxydative ?

Les voies phosphagène et glycolytique permettent de fournir de l'ATP à des débits très élevés, particulièrement adaptés aux demandes énergétiques brutales.

Mais leur capacité à maintenir ces débits est limitée.

Les réserves de phosphocréatine diminuent rapidement lors d'un exercice maximal.

Le débit de certaines réactions glycolytiques ne peut pas non plus rester indéfiniment à son niveau maximal.

Le métabolisme oxydatif possède en revanche une capacité beaucoup plus importante à soutenir la resynthèse de l'ATP dans le temps.

À mesure que l'effort se prolonge, sa contribution relative prend donc progressivement davantage de place [1,10,11].

On pourrait résumer la tendance générale ainsi :

très forte demande immédiate → contribution relative très importante des voies rapides

puis :

prolongation de l'effort → augmentation progressive de la contribution relative du métabolisme oxydatif

Cette représentation reste néanmoins incomplète si nous ne considérons que la durée.

L'intensité change profondément la demande énergétique

Prenons deux exercices qui durent exactement une minute.

Dans le premier cas, un joueur marche tranquillement.

Dans le second, il cherche à produire la plus grande quantité de travail possible pendant soixante secondes.

La durée est identique.

Mais la demande énergétique ne l'est absolument pas.

Dans le premier cas, le débit nécessaire de resynthèse de l'ATP reste relativement faible et peut être assuré très majoritairement par le métabolisme oxydatif.

Dans le second, la demande augmente énormément. Les voies capables de fournir rapidement de grandes quantités d'ATP doivent contribuer beaucoup plus fortement.

La durée ne peut donc jamais être interprétée indépendamment de l'intensité.

POUR COMPRENDRE — Intensité et débit énergétique

Plus l'intensité de l'exercice augmente, plus le muscle doit généralement resynthétiser de molécules d'ATP par unité de temps.

On peut comparer cela à un débit :

- une activité peu intense exige un débit relativement faible ;
- une activité très intense exige un débit très élevé.

Les différentes voies métaboliques doivent alors ajuster leur propre contribution afin que la fourniture totale d'ATP puisse répondre à cette demande.

Les chiffres précédents concernent des efforts maximaux

C'est un point méthodologique fondamental.

Les estimations de 91 % / 9 % à dix secondes ou de 58 % / 42 % à soixante secondes proviennent d'une synthèse consacrée à des **efforts maximaux uniques** [11].

Elles ne signifient pas que n'importe quelle activité de dix ou soixante secondes possède cette répartition.

Courir tranquillement pendant dix secondes n'a évidemment pas le même profil énergétique que sprinter au maximum pendant dix secondes.

De même, effectuer une course sous-maximale pendant une minute n'équivaut pas physiologiquement à produire un effort maximal d'une minute.

PRUDENCE

Les tableaux associant directement une durée à un pourcentage de « filière » peuvent être trompeurs s'ils ne précisent pas l'intensité de l'exercice.

Les valeurs présentées ici concernent essentiellement **des efforts maximaux**, et non tous les exercices possédant la même durée [11].

Peut-on vraiment mesurer précisément la contribution de chaque système ?

C'est l'une des principales limites de cette littérature.

La consommation d'oxygène permet d'obtenir des informations importantes sur la contribution oxydative.

En revanche, il est beaucoup plus difficile de mesurer directement l'ensemble de la fourniture énergétique dite anaérobie lors d'un exercice réalisé avec une masse musculaire importante.

Les chercheurs utilisent donc différentes méthodes d'estimation, parmi lesquelles :

- le déficit maximal accumulé en oxygène ;
- les variations de phosphocréatine ;
- les concentrations ou accumulations de lactate ;
- la consommation d'oxygène pendant et après l'exercice ;
- des modèles théoriques ;
- des combinaisons de plusieurs méthodes [11].

Chacune repose sur des hypothèses et possède des limites.

La revue systématique de 2026 rapporte d'ailleurs une dispersion importante entre les résultats individuels des études, même si leur tendance générale est cohérente [11].

PRUDENCE — Ne pas donner une fausse précision

Affirmer qu'un exercice fournit exactement « 63 % d'énergie anaérobie et 37 % d'énergie aérobie » peut donner une impression de précision supérieure à celle réellement permise par les méthodes disponibles.

Pour l'entraînement, il est généralement plus pertinent de raisonner en termes de :

- contribution dominante ;
- évolution des contributions ;
- demande énergétique ;
- durée ;
- intensité ;
- récupération.

Les pourcentages sont surtout utiles pour comprendre les ordres de grandeur.

Que signifie cela pour l'entraînement ?

Prenons un exercice de dix secondes.

Sa durée ne suffit pas à dire ce qu'il sollicite.

Il faut également savoir :

- quelle intensité le joueur produit ;
- s'il s'agit d'un effort maximal ou sous-maximal ;
- combien de répétitions seront réalisées ;
- quelle récupération sépare les efforts ;
- quel exercice a été réalisé auparavant.

De la même manière, un exercice intermittent composé de nombreuses séquences courtes ne peut pas être analysé uniquement en regardant la durée de chaque répétition.

SUR LE TERRAIN

Plutôt que de construire une séance avec l'idée :

« Je veux travailler telle filière, donc je dois faire des efforts de telle durée »,

il est plus pertinent de raisonner ainsi :

« Quelle intensité veux-je que mes joueurs soient capables de produire ? Pendant combien de temps ? Combien de fois ? Et avec quelle récupération ? »

Ce sont ces paramètres combinés qui déterminent la demande énergétique réelle de l'exercice.

Nous avons beaucoup parlé de phosphocréatine, de glycolyse et de métabolisme oxydatif. Mais **quelles molécules fournissent réellement l'énergie permettant à ces voies de fonctionner ?**

Autrement dit : quels sont les carburants de l'exercice ?

Quels carburants l'organisme utilise-t-il ?

Jusqu'à présent, nous avons surtout parlé des **voies permettant de resynthétiser l'ATP**.

Mais ces voies ont elles-mêmes besoin d'énergie.

Cette énergie provient de différentes molécules disponibles dans l'organisme, que l'on appelle généralement des **substrats énergétiques**.

Les principaux substrats mobilisés pendant l'exercice sont :

- la phosphocréatine ;
- les glucides ;
- les lipides ;
- dans une moindre mesure, certains acides aminés [1,14–16].

Il est essentiel de ne pas confondre **substrat énergétique** et **système énergétique**.

Un glucide, par exemple, n'est pas une « filière ».

Il s'agit d'un carburant qui peut être utilisé par différentes réactions métaboliques afin de contribuer à la resynthèse de l'ATP.

DÉFINITION — Substrat énergétique

Un substrat énergétique est une molécule dont l'énergie chimique peut être utilisée, directement ou après plusieurs transformations métaboliques, pour permettre la resynthèse de l'ATP.

Les principaux substrats utilisés pendant l'exercice sont la phosphocréatine, les glucides et les lipides. Les acides aminés peuvent également contribuer, généralement dans une proportion plus faible.

La phosphocréatine : une réserve énergétique disponible directement dans le muscle

Nous avons déjà rencontré la **phosphocréatine**.

Elle occupe une place particulière parmi les substrats énergétiques, car elle permet de reformer très rapidement de l'ATP en transférant un groupement phosphate à l'ADP.

Elle est stockée directement dans les fibres musculaires et peut donc être mobilisée immédiatement lorsque la demande énergétique augmente brutalement.

Cette caractéristique explique son importance lors des actions explosives.

Mais ses réserves sont limitées.

La phosphocréatine constitue donc un moyen très rapide de contribuer à la resynthèse de l'ATP, mais elle ne représente pas un carburant capable de soutenir seule une activité prolongée [1,5].

Les glucides : un carburant particulièrement polyvalent

Les glucides occupent une place centrale dans le métabolisme de l'exercice.

L'organisme peut notamment disposer de glucides sous deux formes particulièrement importantes :

- le **glycogène musculaire**, stocké directement dans les fibres musculaires ;
- le **glucose sanguin**, qui peut notamment provenir du foie ou des glucides ingérés.

Le glycogène est constitué de nombreuses molécules de glucose assemblées sous une forme permettant leur stockage.

Lorsque le muscle travaille, ce glycogène peut être dégradé afin d'alimenter la glycolyse.

DÉFINITION – Glycogène

Le glycogène est la principale forme de stockage des glucides dans l'organisme.

Il est présent principalement dans les muscles et dans le foie. Le glycogène musculaire constitue une réserve locale particulièrement importante pour alimenter le métabolisme énergétique des fibres musculaires pendant l'exercice.

Les glucides peuvent alimenter plusieurs voies énergétiques

C'est ici qu'une confusion fréquente doit être corrigée.

Les glucides ne sont pas uniquement associés à la « filière anaérobie ».

Lorsque le glucose ou le glycogène entre dans la glycolyse, du pyruvate est produit.

Une partie de ce pyruvate peut être convertie en lactate.

Une autre partie peut entrer dans les mitochondries, être transformée notamment en acétyl-CoA puis alimenter les réactions du métabolisme oxydatif.

Les glucides peuvent donc contribuer à la resynthèse de l'ATP :

- par des réactions glycolytiques ne nécessitant pas directement l'oxygène ;
- mais également par la phosphorylation oxydative [1].

Autrement dit :

glucides ≠ métabolisme anaérobie uniquement.

IDÉE REÇUE

« **Le sucre sert à la filière anaérobie alors que les graisses servent à la filière aérobie.** »

Cette représentation est incorrecte.

Les glucides peuvent fournir de l'énergie aussi bien à travers la glycolyse qu'à travers le métabolisme oxydatif.

Le métabolisme aérobie peut donc utiliser énormément de glucides, notamment lorsque l'intensité de l'exercice augmente [1,14,15].

Plus l'intensité augmente, plus les glucides prennent généralement de l'importance

L'intensité de l'exercice influence fortement le choix des substrats.

Dans une étude classique, Romijn et ses collaborateurs ont comparé le métabolisme énergétique de sujets entraînés pédalant à différentes intensités.

Lorsque l'intensité augmentait, l'utilisation du glucose sanguin et surtout du glycogène musculaire augmentait fortement [14].

Van Loon et ses collaborateurs ont également montré chez l'être humain qu'à mesure que l'intensité de l'exercice augmente, la contribution énergétique se déplace progressivement vers une utilisation plus importante des glucides [15].

Cette évolution possède une logique physiologique.

Lorsque la demande d'ATP devient très élevée, les glucides permettent de soutenir des débits énergétiques importants.

POUR COMPRENDRE – Pourquoi les glucides deviennent-ils si importants à forte intensité ?

La question n'est pas simplement de savoir quel carburant contient le plus d'énergie.

Le muscle doit surtout être capable de **fournir l'ATP suffisamment vite**.

Lorsque l'intensité augmente fortement, le débit de demande en ATP devient très élevé. L'utilisation des glucides prend alors généralement davantage d'importance, notamment parce qu'ils peuvent alimenter à la fois la glycolyse rapide et le métabolisme oxydatif [1,14,15].

Les lipides représentent une réserve énergétique considérable

Les lipides constituent une autre source majeure d'énergie.

L'essentiel des réserves lipidiques de l'organisme est stocké dans le tissu adipeux sous forme de **triglycérides**.

Pendant l'exercice, ces triglycérides peuvent être dégradés et libérer des **acides gras** dans la circulation sanguine.

Les muscles peuvent capter ces acides gras puis les utiliser dans leurs mitochondries.

Des triglycérides sont également stockés directement à l'intérieur des fibres musculaires. On parle alors de **triglycérides intramusculaires** [14,15].

Contrairement à la production glycolytique directe d'ATP, l'utilisation énergétique des acides gras repose sur le métabolisme oxydatif.

Les acides gras sont notamment dégradés par la **β -oxydation**, ce qui produit des molécules pouvant ensuite alimenter les réactions mitochondriales nécessaires à la phosphorylation oxydative.

Les graisses fournissent beaucoup d'énergie, mais pas nécessairement assez vite

Les réserves lipidiques de l'organisme sont considérables comparativement aux réserves de glucides.

Cela pourrait laisser penser que le muscle devrait toujours privilégier les graisses.

Mais posséder une grande réserve ne signifie pas être capable de fournir l'énergie au débit nécessaire dans toutes les situations.

Lorsqu'un exercice devient très intense, la demande de resynthèse de l'ATP peut augmenter plus vite que ce que l'oxydation des lipides peut fournir.

La contribution relative des glucides devient alors généralement plus importante [14,15].

À l'inverse, lors d'exercices de faible ou de moyenne intensité, les lipides peuvent représenter une part importante de la fourniture énergétique.

La relation entre intensité et utilisation des substrats est donc dynamique.

Faible intensité ne signifie pas automatiquement plus de graisse utilisée au total

Cette question est parfois à l'origine de la notion populaire de « **zone de combustion des graisses** ».

À faible intensité, une proportion importante de l'énergie produite par le métabolisme oxydatif peut effectivement provenir des lipides.

Mais il faut distinguer :

- la **proportion** d'énergie provenant des lipides ;
- la **quantité absolue** de lipides oxydés ;
- la **dépense énergétique totale**.

Un exercice extrêmement facile peut utiliser une grande proportion de lipides tout en demandant peu d'énergie au total.

Inversement, lorsque l'intensité augmente depuis de très faibles niveaux, la quantité absolue de lipides oxydés peut initialement augmenter avant de diminuer lorsque l'exercice devient plus intense et que les glucides prennent davantage d'importance.

PRUDENCE

Le fait qu'une intensité donnée utilise une proportion importante de lipides pendant l'exercice ne signifie pas automatiquement qu'elle constitue la meilleure stratégie pour perdre de la masse grasse.

L'utilisation des substrats pendant une séance et l'évolution des réserves de graisse corporelle sur plusieurs jours ou plusieurs semaines sont deux questions différentes.

Le métabolisme oxydatif n'est donc pas synonyme de métabolisme des graisses

La phosphorylation oxydative peut utiliser l'énergie provenant :

- des glucides ;
- des lipides ;
- du lactate ;
- et, dans une moindre mesure, de certains acides aminés.

Dire qu'un exercice est majoritairement « aérobique » ne nous indique donc pas automatiquement quel substrat est majoritairement utilisé.

IDÉE REÇUE

« **Quand on travaille en aérobie, on brûle principalement des graisses.** »

Pas nécessairement.

Le terme « aérobie » décrit ici une voie de fourniture énergétique reposant sur le métabolisme oxydatif. Cette voie peut utiliser aussi bien des produits issus des glucides que des lipides.

À forte intensité, une grande partie de la production oxydative d'ATP peut notamment provenir des glucides [1,14,15].

Le lactate peut lui aussi devenir un carburant

Le lactate est souvent présenté comme le produit final indésirable de la glycolyse.

Cette représentation est aujourd'hui dépassée.

Le lactate produit par certaines cellules ou certaines fibres musculaires peut être transporté vers d'autres cellules et **oxydé comme substrat énergétique**.

Il peut notamment être converti à nouveau en pyruvate puis participer au métabolisme mitochondrial.

Le lactate constitue ainsi un intermédiaire important permettant de transférer du carbone et de l'énergie entre différents tissus ou différentes cellules.

Cette réalité explique pourquoi il est beaucoup plus pertinent de considérer le lactate comme un **métabolite énergétique utilisable** que comme un simple déchet.

IDÉE REÇUE

« **Le lactate est un déchet dont le corps doit se débarrasser.** »

Non.

Une part importante du lactate produit pendant l'exercice peut être réutilisée, notamment comme substrat oxydatif par les muscles et d'autres tissus.

Sa production fait partie intégrante du fonctionnement normal du métabolisme énergétique.

Les protéines peuvent-elles fournir de l'énergie ?

Oui, mais leur rôle est généralement beaucoup moins important que celui des glucides et des lipides.

Certains acides aminés peuvent être oxydés et participer à la production énergétique.

Une méta-analyse publiée en 2025 regroupant trente études réalisées pendant des exercices d'endurance d'au moins une heure estimait en moyenne la contribution des protéines à environ **3,3 % de la dépense énergétique totale pendant l'exercice** [16].

Cette valeur moyenne ne constitue pas une règle universelle.

La contribution peut varier selon :

- la durée de l'effort ;
- son intensité ;

- la disponibilité des glucides ;
- l'état nutritionnel ;
- les caractéristiques du sportif.

Les protéines ne constituent donc pas le carburant principal de l'exercice dans les conditions habituelles, mais leur contribution n'est pas strictement nulle.

PRUDENCE

Le fait que certains acides aminés puissent être oxydés pendant l'exercice ne signifie pas qu'il serait souhaitable d'utiliser les protéines comme principale source énergétique.

Les protéines remplissent de nombreuses fonctions structurelles et fonctionnelles dans l'organisme. Les glucides et les lipides restent les principaux substrats fournissant de l'énergie pendant l'exercice [1,16].

Le carburant utilisé dépend aussi de la durée de l'effort

La durée modifie elle aussi l'utilisation des substrats.

Pendant un exercice prolongé d'intensité modérée, la contribution du glycogène musculaire tend progressivement à diminuer tandis que le glucose sanguin et les acides gras circulants peuvent prendre davantage d'importance [14].

Le profil énergétique d'une activité n'est donc jamais totalement figé.

Il peut changer au cours de la même séance.

L'entraînement modifie également le choix des carburants

L'organisme s'adapte à l'entraînement.

Après un entraînement d'endurance, le muscle développe notamment davantage de capacités oxydatives.

À une même intensité absolue sous-maximale, un muscle entraîné peut alors utiliser davantage de lipides et moins de glycogène qu'avant l'entraînement [17].

Cela peut notamment permettre d'économiser une partie des réserves glucidiques lors de certains exercices prolongés.

POUR COMPRENDRE

Deux joueurs réalisant exactement la même course à la même vitesse ne présentent pas nécessairement la même répartition des substrats énergétiques.

Leur niveau d'entraînement, leurs réserves de glycogène, leur alimentation, leur état de fatigue et leurs caractéristiques individuelles peuvent modifier la manière dont leur organisme répond à l'exercice.

Et pendant le football ?

Le football constitue une situation particulièrement intéressante parce que l'intensité varie continuellement.

Pendant les phases de faible ou moyenne intensité, le métabolisme oxydatif contribue largement à la fourniture énergétique et peut utiliser aussi bien des glucides que des lipides.

Lorsqu'une action intense survient :

- l'utilisation de la phosphocréatine augmente fortement ;
- la glycolyse peut rapidement contribuer davantage ;
- l'utilisation des glucides prend une importance particulière.

Puis, lorsque le joueur revient à une intensité plus faible, le profil énergétique change à nouveau.

Un match ne possède donc pas **un carburant unique**.

Il repose sur l'utilisation dynamique de plusieurs réserves et substrats en fonction des actions réalisées.

SUR LE TERRAIN

Il serait trompeur de dire qu'un footballeur « fonctionne aux graisses » lorsqu'il trotte puis « passe au sucre » lorsqu'il sprinte.

Plusieurs substrats sont utilisés simultanément.

Ce sont surtout leurs **contributions relatives et leurs débits d'utilisation** qui changent continuellement avec l'intensité de l'activité.

Il n'existe donc pas un carburant unique de l'effort.

Nous pouvons maintenant appliquer ces connaissances à une situation beaucoup plus concrète : **que se passe-t-il réellement lorsque le joueur réalise un sprint maximal ?**

Que se passe-t-il pendant un sprint ?

Le sprint constitue probablement l'exemple le plus intuitif d'un effort à très forte demande énergétique.

Lorsqu'un joueur accélère au maximum, ses muscles doivent développer rapidement des niveaux élevés de force et augmenter presque instantanément leur débit de resynthèse de l'ATP.

Pendant quelques secondes, la demande énergétique atteint donc des valeurs très importantes.

Cette situation sollicite fortement les voies capables de fournir de l'ATP rapidement, en particulier :

- le système phosphagène ;
- la glycolyse.

Mais, comme nous l'avons vu précédemment, **le métabolisme oxydatif participe lui aussi dès le début de l'effort** [8,11].

Un sprint ne correspond donc pas à l'utilisation d'une seule « filière ».

Dès la première contraction, la demande d'ATP augmente brutalement

Avant le sprint, le muscle possède déjà une certaine quantité d'ATP et de phosphocréatine.

Au moment où le joueur déclenche son accélération, la vitesse à laquelle l'ATP est utilisé augmente brutalement.

La phosphocréatine constitue alors un moyen particulièrement efficace de répondre à cette augmentation.

La réaction catalysée par la créatine kinase permet de reformer rapidement de l'ATP :

Phosphocréatine + ADP → créatine + ATP

La contribution du système phosphagène devient donc très importante.

Mais cela ne signifie pas que la phosphocréatine constitue le seul carburant du sprint.

La glycolyse intervient elle aussi presque immédiatement

L'une des représentations traditionnelles du sprint consiste à imaginer que les premières secondes seraient exclusivement « alactiques », puis que la glycolyse commencerait seulement après plusieurs secondes.

Les données expérimentales ne correspondent pas à cette représentation.

Dans une étude classique de Gaitanos et ses collaborateurs, huit hommes ont réalisé dix sprints maximaux de six secondes sur ergocycle, séparés par trente secondes de récupération [18].

Après le premier sprint de seulement six secondes :

- la concentration musculaire de phosphocréatine avait diminué d'environ **57 %** ;
- la concentration musculaire de lactate avait fortement augmenté ;
- la dégradation de la phosphocréatine et la glycolyse avaient toutes deux fortement contribué à la fourniture énergétique [18].

Autrement dit, **six secondes suffisent déjà pour observer une activité glycolytique importante.**

IDÉE REÇUE

« **Un sprint de quelques secondes est uniquement anaérobie alactique.** »

Cette formulation est trop simplifiée.

Le système phosphagène joue un rôle majeur lors des efforts maximaux très courts, mais la glycolyse est activée elle aussi pratiquement dès le début de l'effort [7,18].

Le métabolisme oxydatif contribue également, dans une proportion généralement plus faible lors d'un sprint isolé très court [8,11].

La phosphocréatine permet de soutenir un débit énergétique très élevé

Pourquoi la phosphocréatine est-elle particulièrement importante lors d'un sprint ?

Parce que la question centrale n'est pas seulement la quantité d'énergie disponible.

Il faut pouvoir **resynthétiser l'ATP extrêmement rapidement.**

Les réserves lipidiques de l'organisme représentent par exemple une quantité d'énergie considérable, mais leur utilisation ne permet pas de répondre à elle seule au débit énergétique imposé par une accélération maximale.

La phosphocréatine possède au contraire une capacité relativement faible mais une très grande vitesse de fourniture d'ATP.

Elle est donc particulièrement adaptée aux situations dans lesquelles la puissance demandée augmente brutalement.

POUR COMPRENDRE — Une question de débit

Imaginez deux réservoirs.

Le premier contient énormément d'eau, mais son robinet permet seulement un débit modéré.

Le second contient beaucoup moins d'eau, mais son robinet permet un débit extrêmement important.

Lors d'un sprint, le muscle a besoin d'un **très grand débit énergétique immédiatement**.

La phosphocréatine joue en quelque sorte le rôle du petit réservoir capable de fournir très rapidement ce débit.

Les réserves de phosphocréatine diminuent rapidement

Cette capacité possède cependant une limite évidente : les réserves musculaires de phosphocréatine sont relativement faibles.

Elles peuvent donc diminuer fortement en seulement quelques secondes d'exercice maximal.

Dans l'étude de Gaitanos et ses collaborateurs, environ 57 % de la phosphocréatine musculaire mesurée avait déjà été utilisée après le premier sprint de six secondes [18].

D'autres mesures réalisées chez l'être humain montrent également une déplétion importante de phosphocréatine au cours d'exercices maximaux très courts [5].

Cette diminution contribue progressivement à réduire la capacité du système phosphagène à maintenir son débit initial.

Cela ne signifie pas que la phosphocréatine tombe nécessairement à zéro.

Cela signifie que **sa disponibilité diminue rapidement pendant que l'effort se poursuit**.

La glycolyse contribue à maintenir la fourniture d'ATP

Pendant que la phosphocréatine diminue, la glycolyse contribue fortement à la resynthèse de l'ATP.

Le glycogène musculaire peut être rapidement dégradé et alimenter les réactions glycolytiques.

Cette contribution devient particulièrement importante lorsque l'effort maximal se prolonge au-delà de quelques secondes.

Lors d'un effort maximal de 30 secondes sur ergocycle, Beneke et ses collaborateurs ont par exemple estimé une contribution moyenne d'environ :

- 31 % pour le système phosphagène ;
- 50 % pour la glycolyse ;
- 19 % pour le métabolisme oxydatif [13].

Ces valeurs ne sont pas transposables directement à un sprint de football et dépendent fortement du protocole étudié.

Elles illustrent néanmoins l'évolution très rapide du profil énergétique lorsqu'un effort maximal se prolonge.

Le métabolisme oxydatif n'attend pas la fin du sprint

Sa contribution relative est généralement moins importante lors des toutes premières secondes d'un effort maximal, mais elle n'est pas nulle.

Nous avons déjà vu que la consommation musculaire d'oxygène augmente dans les premières secondes d'un exercice intense [8].

La revue systématique publiée en 2026 estime, à partir de l'ensemble des travaux disponibles, qu'un effort maximal de dix secondes reçoit en moyenne environ **9 % de son énergie du métabolisme aérobie** [11].

Ce chiffre doit être interprété avec prudence, mais il permet de retenir une idée importante :

même un sprint très court n'est pas totalement anaérobie.

PRUDENCE

Il serait incorrect de transformer le chiffre de 9 % en une règle applicable à tous les sprints de dix secondes.

Il s'agit d'une estimation moyenne obtenue à partir de plusieurs études utilisant différents protocoles et différentes méthodes [11].

La contribution réelle dépend notamment du sportif, du mode d'exercice et des conditions dans lesquelles le sprint est réalisé.

Pourquoi la puissance peut-elle diminuer lorsque le sprint se prolonge ?

Lors d'un sprint maximal suffisamment long, le joueur ne peut généralement pas maintenir indéfiniment sa puissance initiale.

Plusieurs mécanismes contribuent à cette diminution.

La disponibilité en phosphocréatine diminue rapidement.

Le débit de resynthèse de l'ATP provenant de certaines réactions glycolytiques évolue lui aussi au cours de l'effort.

La contribution oxydative augmente progressivement, mais elle ne suffit pas nécessairement à maintenir le débit énergétique extrêmement élevé correspondant à la puissance produite au début du sprint [11].

Dans une étude portant sur des sprints maximaux de 10 et 20 secondes, Bogdanis et ses collaborateurs ont observé que le débit anaérobie de renouvellement de l'ATP diminuait fortement entre les dix premières et les dix secondes suivantes, tandis que la consommation d'oxygène augmentait [19].

Le métabolisme énergétique se réorganise donc **pendant le sprint lui-même**.

Le lactate est-il responsable de la baisse de puissance ?

Il est fréquent d'expliquer la diminution de vitesse ou de puissance pendant un sprint prolongé par « l'acide lactique qui bloque les muscles ».

Cette explication est aujourd'hui considérée comme beaucoup trop simpliste.

La production de lactate augmente effectivement lors d'un exercice glycolytique intense.

Mais **le lactate n'est pas lui-même un poison responsable de l'arrêt de la contraction musculaire**.

La fatigue pendant un sprint est multifactorielle et implique des modifications :

- énergétiques ;
- ioniques ;
- métaboliques ;
- neuromusculaires ;
- contractiles.

La relation entre lactate, ions hydrogène, pH musculaire et fatigue est également beaucoup plus complexe que la représentation traditionnelle « lactate = acidité = fatigue ».

IDÉE REÇUE

« Si un joueur ralentit pendant un sprint prolongé, c'est parce que l'acide lactique bloque ses muscles. »

Cette explication ne correspond pas au fonctionnement actuel connu de la fatigue musculaire.

Le lactate accompagne une forte activité glycolytique, mais la diminution de la performance résulte de plusieurs mécanismes qui interagissent. Le lactate ne peut pas être considéré comme la cause unique de la fatigue.

Un sprint sur ergocycle n'est pas un sprint de football

Une grande partie de nos connaissances expérimentales sur l'énergétique des sprints provient d'études réalisées sur ergocycle.

Ce choix possède plusieurs avantages scientifiques : l'intensité et la puissance mécanique peuvent être mesurées avec précision, des prélèvements peuvent être réalisés et les protocoles sont facilement reproductibles.

Mais un sprint de football possède des caractéristiques mécaniques différentes.

Il implique notamment :

- une accélération du corps ;
- une course horizontale ;
- des variations de longueur et de fréquence de foulée ;
- parfois un départ déjà lancé ;
- des contraintes techniques et perceptives ;
- éventuellement des changements de direction.

PRUDENCE

Les études réalisées sur ergocycle sont extrêmement utiles pour comprendre les mécanismes bioénergétiques, mais leurs pourcentages précis ne doivent pas être transposés directement à une accélération réalisée sur un terrain de football.

Nous pouvons raisonnablement en tirer des **principes physiologiques**, mais pas convertir chaque sprint de terrain en proportions énergétiques exactes.

Le sprint illustre parfaitement l'interaction des systèmes énergétiques

Au moment du départ :

la demande d'ATP augmente brutalement.

Le système phosphagène répond très rapidement et fournit une contribution importante.

Simultanément :

la glycolyse augmente fortement son activité.

Et parallèlement :

le métabolisme oxydatif commence lui aussi à augmenter sa contribution.

Si l'effort se prolonge :

- la phosphocréatine diminue ;
- le profil glycolytique évolue ;
- la contribution oxydative devient progressivement plus importante ;
- la capacité à maintenir la puissance maximale diminue.

Il n'existe donc aucun moment pendant lequel le muscle fonctionne avec une seule voie énergétique.

SUR LE TERRAIN

Pour un éducateur, un sprint maximal peut être considéré comme une action possédant une **très forte demande instantanée de resynthèse de l'ATP**, avec une contribution particulièrement importante du système phosphagène et de la glycolyse.

Mais cela ne signifie pas que le métabolisme oxydatif est inutile.

Cette distinction devient encore plus importante lorsque les joueurs doivent **répéter les sprints**, comme cela se produit pendant un match.

Que se passe-t-il lorsque les sprints se répètent ?

Un sprint isolé constitue déjà une situation énergétiquement complexe.

Mais le football impose une difficulté supplémentaire : **les efforts intenses se répètent.**

Un joueur peut accélérer, sprinter, freiner, participer à une action de jeu puis devoir produire une nouvelle accélération quelques secondes ou quelques dizaines de secondes plus tard.

Entre ces actions, la récupération est souvent incomplète.

Le deuxième sprint ne commence donc pas nécessairement dans le même état physiologique que le premier.

Les réserves énergétiques ont évolué, la phosphocréatine n'a pas toujours été entièrement resynthétisée et le métabolisme oxydatif reste fortement sollicité.

C'est pour cette raison qu'un ensemble de sprints répétés ne peut pas être compris comme **une simple succession de sprints isolés identiques** [18,20–24].

La récupération commence dès que le sprint s'arrête

À la fin d'un sprint, les muscles ne reviennent pas immédiatement à leur état initial.

Une partie importante de la phosphocréatine peut avoir été utilisée.

La consommation d'oxygène reste élevée.

Les concentrations de différents métabolites ont changé.

Le système neuromusculaire peut également présenter une certaine fatigue.

La période séparant deux sprints constitue donc une véritable phase de **restauration physiologique**.

L'un des phénomènes les plus importants pour la capacité à reproduire rapidement un effort explosif est la **resynthèse de la phosphocréatine** [20,24].

La phosphocréatine se reconstitue pendant la récupération

Lorsque l'effort cesse, la phosphocréatine est progressivement resynthétisée.

Cette reconstitution est relativement rapide, mais elle n'est pas instantanée.

Bogdanis et ses collaborateurs ont étudié deux sprints maximaux réalisés sur ergocycle et séparés par quatre minutes de récupération [20].

À la fin du premier sprint de 30 secondes, la quantité de phosphocréatine mesurée dans le muscle ne représentait plus qu'environ **17 % de sa valeur de repos**.

Après 3,8 minutes de récupération, elle était revenue à environ **79 % de la valeur initiale** [20].

Même après presque quatre minutes, la récupération n'était donc pas nécessairement complète.

POUR COMPRENDRE — Récupérer ne signifie pas revenir instantanément à l'état initial

Lorsqu'un joueur s'arrête entre deux efforts, plusieurs processus de récupération commencent immédiatement.

Mais ils possèdent chacun leur propre cinétique.

Une récupération de 20, 30 ou 60 secondes ne remet donc pas automatiquement le muscle dans l'état où il se trouvait avant le premier sprint.

La récupération de la phosphocréatine est liée à celle de la puissance

Dans la même expérience, Bogdanis et ses collaborateurs ont observé une relation importante entre la quantité de phosphocréatine resynthétisée pendant la récupération et la capacité des participants à reproduire leur puissance au début du deuxième sprint [20].

Cette observation ne signifie pas que la phosphocréatine explique à elle seule toute la capacité à répéter les sprints.

Mais elle montre qu'elle constitue **un déterminant important de la récupération entre deux efforts maximaux rapprochés**.

D'autres travaux ont retrouvé une association entre la récupération de la phosphocréatine et celle de la performance lors de séries de sprints répétés [24].

SUR LE TERRAIN

La durée de récupération entre deux sprints modifie directement le contexte énergétique du sprint suivant.

Avec une récupération longue, davantage de phosphocréatine peut être restaurée.

Avec une récupération très courte, le joueur doit recommencer son effort alors que cette réserve n'est que partiellement reconstituée.

Deux exercices composés de sprints identiques mais possédant des temps de récupération différents ne sollicitent donc pas l'organisme de la même manière.

D'où vient l'énergie permettant de reformer la phosphocréatine ?

Cette question permet de comprendre pourquoi le métabolisme oxydatif est si important entre les sprints.

La resynthèse de phosphocréatine pendant la récupération dépend fortement du métabolisme oxydatif.

Autrement dit, **le système aérobie contribue à restaurer l'un des principaux moyens de produire rapidement de l'ATP lors du sprint suivant.**

Haseler et ses collaborateurs ont étudié des sujets entraînés récupérant d'un exercice musculaire sous différentes disponibilités en oxygène.

La récupération de la phosphocréatine était :

- plus lente en situation d'hypoxie ;
- plus rapide lorsque la disponibilité en oxygène était augmentée ;
- intermédiaire dans les conditions normales [21].

IDÉE REÇUE

« Le système aérobie ne sert pas pour les sprints. »

Cette affirmation est particulièrement trompeuse lorsque les sprints se répètent.

Même si les voies phosphagène et glycolytique jouent un rôle majeur dans la fourniture rapide d'ATP pendant un sprint, le métabolisme oxydatif participe à l'effort et joue également un rôle essentiel pendant la récupération, notamment dans la resynthèse de la phosphocréatine [20,21].

Le profil énergétique change d'un sprint au suivant

Dans l'étude de Gaitanos et ses collaborateurs, les participants réalisaient dix sprints maximaux de six secondes séparés par trente secondes de récupération [18].

Lors du premier sprint :

- la phosphocréatine contribuait fortement à la fourniture d'ATP ;
- la glycolyse contribuait elle aussi de manière importante.

Mais au dixième sprint, la situation avait profondément changé.

La puissance moyenne avait diminué, mais restait encore à environ **73 % de celle du premier sprint**.

Dans le même temps, les chercheurs n'observaient pratiquement plus de nouvelle accumulation de lactate musculaire pendant ce dernier sprint, suggérant une très forte diminution de la contribution glycolytique mesurée.

Les auteurs proposaient alors qu'une part importante de l'énergie du dernier sprint provienne de la phosphocréatine resynthétisée pendant les périodes de récupération et d'une contribution oxydative devenue plus importante [18].

POUR COMPRENDRE – Le dixième sprint n'est pas le premier répété dix fois

Même si chaque sprint dure six secondes et que les consignes restent identiques, l'état physiologique du joueur évolue à chaque répétition.

Les réserves disponibles, la contribution glycolytique, la sollicitation oxydative et la fatigue ne sont plus les mêmes.

La répétition transforme progressivement la nature énergétique de l'exercice.

Le métabolisme oxydatif prend progressivement davantage de place

À mesure que les sprints se répètent, la consommation d'oxygène reste élevée entre les efforts et augmente fortement pendant les périodes d'activité.

Cela signifie que la contribution oxydative devient progressivement plus importante.

Une étude réalisée chez huit footballeuses effectuant des séries de cinq sprints maximaux de six secondes a estimé une contribution aérobie d'approximativement :

- **10 % lors du premier sprint ;**
- **40 % lors du cinquième sprint [22].**

Au dernier sprint, la consommation d'oxygène atteinte par les joueuses était proche de leur VO_2 max mesurée lors d'un test spécifique [22].

Ces résultats proviennent d'un très petit échantillon et ne doivent pas être transformés en valeurs universelles.

Ils illustrent cependant remarquablement le principe suivant :

plusieurs sprints très courts successifs peuvent finalement solliciter fortement le métabolisme oxydatif.

PRUDENCE

Dire que la contribution aérobie passe systématiquement de 10 à 40 % entre le premier et le cinquième sprint serait incorrect.

Ces valeurs proviennent de huit footballeuses réalisant un protocole précis [22].

Elles constituent un exemple expérimental particulièrement parlant, mais pas une règle applicable à toutes les séries de sprints.

Cette augmentation existe également dans des protocoles réalisés par des footballeurs

Ulupinar et ses collaborateurs ont étudié 18 joueurs de football réalisant deux protocoles différents :

- 20 × 20 mètres avec 15 secondes de récupération ;
- 10 × 40 mètres avec 30 secondes de récupération [23].

Les chercheurs ont estimé les contributions phosphagène, glycolytique et oxydative au cours des exercices.

Le métabolisme oxydatif contribuait non seulement pendant les périodes de récupération, mais également pendant les sprints eux-mêmes.

Surtout, la contribution oxydative lors des sprints augmentait après les premières répétitions [23].

SUR LE TERRAIN

Une série de :

10 × 40 m avec 30 secondes de récupération

et une série de :

20 × 20 m avec 15 secondes de récupération

peuvent représenter une distance totale identique.

Elles ne constituent pourtant pas le même exercice.

La durée des efforts, leur nombre et le temps de récupération modifient les réponses physiologiques et la contribution respective des systèmes énergétiques [23].

Une bonne capacité aérobie permet-elle forcément de mieux répéter les sprints ?

Le raisonnement physiologique est cohérent :

- le métabolisme oxydatif participe à la resynthèse de phosphocréatine ;
- sa contribution augmente au fil des sprints ;
- il participe à plusieurs processus de récupération entre les efforts.

Il est donc logique que les capacités oxydatives du joueur puissent influencer sa capacité à répéter certaines actions intenses.

Mais il faut éviter d'aller trop loin dans l'interprétation.

La capacité à répéter des sprints dépend également :

- de la vitesse maximale du joueur ;
- de ses qualités neuromusculaires ;
- de sa capacité à produire de la force ;
- de ses réserves de phosphocréatine ;
- de sa capacité glycolytique ;
- de la durée des sprints ;
- de la récupération disponible ;
- de la fatigue accumulée.

PRUDENCE

Capacité aérobie et capacité à répéter les sprints ne sont pas synonymes.

Posséder une bonne fonction oxydative peut favoriser certains processus de récupération, mais cela ne suffit pas à expliquer à lui seul la performance en sprints répétés.

Un joueur doit d'abord être capable de sprinter vite avant de chercher à répéter efficacement ces actions.

La fatigue entre les sprints n'est pas uniquement une question de phosphocréatine

La phosphocréatine constitue un élément important, mais elle ne doit pas devenir notre nouvelle explication unique de la fatigue.

Mendez-Villanueva et ses collaborateurs ont étudié la récupération après dix sprints maximaux de six secondes séparés par trente secondes [24].

Après six minutes de récupération, les participants réalisaient une deuxième série de cinq sprints.

La récupération de la phosphocréatine était positivement associée à la quantité de travail produite lors du sprint suivant et de la série qui suivait [24].

Mais d'autres variables n'avaient pas encore complètement récupéré.

Cela montre une nouvelle fois que la fatigue et la récupération sont **multifactorielles**.

IDÉE REÇUE

« Si le joueur récupère mal entre deux sprints, c'est uniquement parce que sa phosphocréatine n'est pas reconstituée. »

La resynthèse de phosphocréatine constitue un déterminant important de la récupération de la puissance, mais elle n'est pas le seul phénomène impliqué.

La capacité à répéter des efforts dépend d'interactions métaboliques, musculaires et neuromusculaires [20,24].

« Récupération complète » et « récupération incomplète » changent l'exercice

Si l'objectif est de permettre au joueur de produire des sprints à une vitesse très élevée, il faut généralement lui permettre de préserver suffisamment la qualité de ses répétitions.

Une récupération trop courte peut entraîner une diminution progressive de la vitesse.

L'exercice devient alors progressivement autre chose : il entraîne davantage la capacité à produire des efforts malgré une récupération incomplète.

Aucune des deux stratégies n'est intrinsèquement meilleure.

Elles répondent simplement à **des objectifs différents**.

SUR LE TERRAIN

Prenons deux séances utilisant exactement six sprints de 30 mètres.

Séance A : récupération longue permettant de préserver presque totalement la vitesse.

Séance B : récupération courte provoquant une baisse progressive de la performance.

Le nombre de sprints et leur distance sont identiques.

Pourtant, la contrainte physiologique n'est pas la même.

Le temps de récupération fait donc pleinement partie de la prescription de l'exercice.

Le football impose rarement des récupérations parfaitement standardisées

Après un sprint, le joueur peut bénéficier :

- de quelques secondes de marche ;
- d'une longue phase de possession à faible intensité ;
- d'un arrêt de jeu ;
- ou, au contraire, devoir immédiatement participer à une nouvelle transition.

La récupération réelle est donc imprévisible.

Cela signifie qu'un joueur peut être amené à produire un effort explosif :

- avec des réserves de phosphocréatine presque restaurées ;
- avec une récupération partielle ;
- ou dans un état de fatigue beaucoup plus important.

Cette variabilité constitue précisément l'une des caractéristiques physiologiques du football.

Répéter des sprints montre pourquoi « aérobic » et « explosivité » ne sont pas opposées

Le système oxydatif n'est pas l'antagoniste des qualités explosives.

Il contribue :

- directement à une partie de la fourniture énergétique pendant les sprints ;
- de plus en plus fortement lorsque les sprints se répètent ;
- à la resynthèse de phosphocréatine entre les efforts ;
- à la restauration métabolique entre les actions [20–23].

Cela ne signifie pas qu'améliorer la VO_{2max} suffit à rendre un joueur plus rapide.

Cela signifie simplement que **produire un effort explosif et récupérer d'un effort explosif ne reposent pas exactement sur les mêmes contraintes physiologiques.**

SUR LE TERRAIN

Pour un footballeur, développer la vitesse et développer les capacités permettant de répéter les efforts ne sont donc pas deux objectifs totalement identiques.

La vitesse maximale dépend fortement des qualités neuromusculaires et mécaniques.

La capacité à reproduire des actions intenses avec des récupérations limitées fait davantage intervenir la récupération métabolique et notamment le métabolisme oxydatif.

Un programme de préparation physique peut avoir besoin de développer les deux.

Nous disposons désormais des éléments nécessaires pour quitter les exercices expérimentaux et revenir au jeu lui-même.

Comment tous ces mécanismes interagissent-ils pendant un match de football ?

Et pendant un match de football ?

Pendant environ 90 minutes, un joueur alterne continuellement :

- marche ;
- course à faible intensité ;
- courses plus rapides ;
- accélérations ;
- freinages ;
- changements de direction ;
- sauts ;
- duels ;
- actions techniques ;
- périodes d'activité réduite ;
- actions explosives parfois réalisées avec une récupération incomplète.

La demande énergétique n'est donc jamais parfaitement stable.

Elle augmente, diminue puis augmente à nouveau au fil des situations de jeu.

Le football constitue ainsi une activité intermittente dans laquelle plusieurs voies de resynthèse de l'ATP contribuent en permanence, mais avec des débits qui varient fortement d'un instant à l'autre.

Sur l'ensemble du match, le métabolisme oxydatif joue un rôle majeur

Un match dure longtemps.

Même si certaines actions atteignent une très forte intensité, une grande partie du temps de jeu est passée à des intensités beaucoup plus faibles que celles d'un sprint maximal.

Les études d'analyse de match montrent ainsi que les joueurs parcourent plusieurs kilomètres en alternant continuellement différentes vitesses de déplacement [25–27].

Dans une étude classique portant sur 14 joueurs de haut niveau, Bangsbo et ses collaborateurs rapportaient par exemple une distance moyenne parcourue d'environ **10,8 kilomètres** pendant les matchs analysés [25].

Chez des joueuses de haut niveau, Krstrup et ses collaborateurs ont observé une distance moyenne de **10,3 kilomètres**, avec environ 1,3 kilomètre de course à haute intensité. La fréquence cardiaque moyenne représentait environ 87 % de la fréquence cardiaque maximale individuelle [26].

Ces valeurs ne doivent pas être considérées comme des standards universels : les exigences varient selon le niveau, le poste, le sexe, le système de jeu, le style de l'équipe et de nombreux facteurs contextuels.

Elles montrent néanmoins que le joueur doit maintenir une activité métabolique importante pendant une durée très longue.

Pour cela, **la phosphorylation oxydative joue un rôle central dans la fourniture énergétique globale du match.**

POUR COMPRENDRE — Globalement oxydatif ne signifie pas constamment peu intense

Dire que le métabolisme oxydatif joue un rôle majeur sur l'ensemble des 90 minutes ne signifie pas que le joueur réalise un exercice continu à intensité modérée.

La moyenne du match masque des variations considérables.

Pendant quelques secondes, la demande énergétique peut augmenter brutalement lors d'un sprint, d'un duel ou d'une transition. Quelques instants plus tard, elle peut fortement diminuer.

Le profil énergétique du football est donc à la fois **majoritairement soutenu par le métabolisme oxydatif sur la durée** et ponctué de périodes nécessitant des débits de resynthèse de l'ATP beaucoup plus élevés.

Les actions intenses nécessitent immédiatement les voies rapides de resynthèse de l'ATP

Imaginons qu'un latéral se trouve momentanément en position relativement basse pendant que son équipe possède le ballon.

Quelques secondes plus tard, une perte de balle survient et il doit produire une accélération maximale pour défendre une transition.

La demande d'ATP augmente alors brutalement.

Comme nous l'avons vu :

- le système phosphagène augmente fortement sa contribution ;
- la glycolyse peut rapidement fournir davantage d'ATP ;
- le métabolisme oxydatif continue également de fonctionner.

Lorsque l'action se termine et que le joueur revient à une course lente ou à la marche, la demande immédiate diminue.

Cette période de plus faible intensité participe notamment à :

- la resynthèse de phosphocréatine ;
- la restauration progressive de certains équilibres cellulaires ;
- la poursuite de l'activité oxydative ;
- la préparation énergétique aux actions suivantes.

Le match peut donc être envisagé comme une succession permanente de **phases de dépense et de récupération partielle**.

SUR LE TERRAIN

Deux minutes pendant lesquelles un joueur parcourt exactement la même distance peuvent imposer des contraintes très différentes.

Une course régulière à vitesse moyenne et une succession de marche, accélérations, freinages et sprint peuvent produire la même distance totale, mais pas la même demande de resynthèse de l'ATP.

La distance parcourue ne suffit donc pas à décrire la contrainte énergétique d'un match.

Le football n'est pas simplement une succession de sprints

Le football est parfois qualifié de « sport de sprints répétés ».

Cette expression peut être utile pour rappeler l'importance des actions explosives, mais elle peut également donner une représentation exagérée de leur fréquence.

Dans une étude portant sur 80 matchs de première division française, Carling et ses collaborateurs ont analysé les successions d'actions à haute intensité [28].

Avec leur définition d'une séquence de haute intensité répétée — au moins trois actions de haute intensité séparées en moyenne par 20 secondes ou moins — les joueurs réalisaient en moyenne seulement **1,1 ± 1,1 séquence de ce type par match** [28].

La majorité des actions intenses successives étaient séparées par des récupérations supérieures à 60 secondes, généralement actives et comprenant beaucoup de marche [28].

Cela ne signifie évidemment pas que les efforts répétés sont sans importance.

Cela signifie plutôt que **le match réel est beaucoup plus variable qu'un test standardisé de six ou dix sprints séparés systématiquement par vingt ou trente secondes**.

PRUDENCE

Le nombre de « sprints répétés » observés dans un match dépend énormément de la définition utilisée :

- seuil de vitesse ;
- durée minimale d'une action ;
- nombre d'efforts ;
- durée maximale de récupération.

Dire qu'un footballeur réalise « X séries de sprints répétés » n'a donc de sens que si la méthode utilisée est précisée [28].

Le glycogène musculaire est fortement sollicité pendant un match

La durée importante du match ne signifie pas que les glucides deviennent secondaires.

Au contraire, le football impose régulièrement des phases de forte intensité pour lesquelles l'utilisation des glucides devient particulièrement importante.

Krustrup et ses collaborateurs ont étudié 31 joueurs au cours de matchs expérimentaux avec prélèvements sanguins, biopsies musculaires et tests de sprint [29].

La concentration moyenne de glycogène musculaire est passée d'environ **449 à 255 mmol·kg⁻¹ de masse sèche** entre le début et la fin du match [29].

Plus intéressant encore, l'analyse des fibres musculaires montrait qu'après le match environ **47 % des fibres étudiées étaient totalement ou presque totalement dépourvues de glycogène** [29].

POUR COMPRENDRE – Une moyenne musculaire peut masquer de grandes différences

Dire qu'il reste encore du glycogène dans un muscle après un match ne signifie pas que toutes les fibres musculaires disposent de la même quantité.

Certaines fibres peuvent être beaucoup plus appauvries que d'autres.

Cette hétérogénéité pourrait avoir des conséquences fonctionnelles importantes, même lorsque la concentration moyenne du muscle n'est pas totalement épuisée [29].

Pourquoi utiliser autant de glycogène si le match est fortement oxydatif ?

Il n'existe aucune contradiction.

Comme nous l'avons vu précédemment, **le métabolisme oxydatif peut lui-même utiliser les glucides**.

Le glycogène musculaire peut donc contribuer à la fourniture énergétique :

- via la glycolyse lors des périodes de forte demande ;
- mais également en alimentant le métabolisme oxydatif.

Il serait donc incorrect de raisonner ainsi :

effort aérobie = graisses

et :

effort anaérobie = glycogène.

Pendant un match, les glucides jouent un rôle dans les deux contextes.

IDÉE REÇUE

« Puisqu'un match dure 90 minutes, le joueur fonctionne principalement avec les graisses. »

Cette représentation est trop simplifiée.

Les lipides participent bien à la fourniture énergétique, notamment pendant les phases de moindre intensité. Mais les glucides jouent également un rôle majeur pendant le match et le glycogène musculaire peut fortement diminuer au cours des 90 minutes [29].

Les performances intenses peuvent diminuer pendant le match

Les analyses de match montrent régulièrement que la capacité à maintenir certaines activités de haute intensité peut diminuer à différents moments.

Mohr et ses collaborateurs ont observé que la distance parcourue à haute intensité était **35 à 45 % plus faible dans les quinze dernières minutes que dans les quinze premières minutes** chez les joueurs étudiés [27].

Ils observaient également une diminution temporaire de la course à haute intensité après les périodes les plus exigeantes du match [27].

Des travaux ultérieurs ont également montré des fluctuations de l'activité à haute intensité après les passages les plus exigeants [30].

Ces observations pourraient donner l'impression que toute réduction de course constitue nécessairement une preuve de fatigue physiologique.

La réalité est plus complexe.

Une diminution de la course ne signifie pas automatiquement une fatigue énergétique

La quantité de course réalisée pendant un match dépend également :

- du poste ;
- de la possession du ballon ;
- du résultat ;
- du comportement de l'adversaire ;
- du système tactique ;
- des interruptions de jeu ;
- des décisions prises par le joueur ;
- du rythme imposé collectivement.

Un joueur peut donc courir moins parce qu'il est fatigué, mais aussi parce que **la situation de jeu lui demande de courir moins** [30].

PRUDENCE

Une diminution de la distance parcourue ou du nombre de sprints en fin de match ne peut pas être automatiquement attribuée à une baisse des réserves énergétiques.

La performance en football résulte simultanément de facteurs :

- physiologiques ;
- neuromusculaires ;
- tactiques ;
- techniques ;
- perceptifs ;
- psychologiques ;
- contextuels.

Les données GPS ou vidéo doivent donc toujours être interprétées dans le contexte du jeu.

Les mesures musculaires montrent néanmoins qu'une fatigue physiologique existe

Dans l'étude de Krstrup et ses collaborateurs, les joueurs réalisaient également cinq sprints de 30 mètres avant et à différents moments du match [29].

La performance au sprint était globalement préservée après la première période, mais elle diminuait après le match.

Une diminution temporaire apparaissait également après certaines périodes particulièrement intenses [29].

Ces observations montrent qu'un joueur peut connaître :

- une fatigue transitoire après une séquence exigeante ;
- une fatigue plus générale en fin de rencontre.

Cependant, les mécanismes responsables ne sont pas nécessairement identiques.

Le glycogène explique-t-il à lui seul la fatigue de fin de match ?

Non.

La concentration moyenne de glycogène du muscle était fortement réduite après le match dans l'étude de Krstrup et ses collaborateurs, mais elle n'était pas directement corrélée à la diminution de la performance au sprint [29].

Les auteurs proposaient néanmoins que le très faible niveau de glycogène observé dans certaines fibres musculaires puisse contribuer à la fatigue.

Cette nuance est importante.

Il serait excessif d'écrire :

« Les joueurs ralentissent en fin de match parce qu'ils n'ont plus de glycogène. »

La réalité physiologique est beaucoup plus complexe.

IDÉE REÇUE

« Si un joueur fatigue à la fin d'un match, c'est simplement parce qu'il a épuisé ses réserves d'énergie. »

La fatigue en football est multifactorielle.

Les réserves énergétiques, notamment le glycogène, peuvent jouer un rôle important, mais elles ne constituent qu'une partie du problème [27,29,30].

Le lactate sanguin raconte lui aussi une histoire incomplète

Dans l'étude de Krstrup et ses collaborateurs, les concentrations de lactate dans le muscle et dans le sang **n'étaient pas significativement corrélées** [29].

Les auteurs concluaient que le lactate sanguin constituait un mauvais indicateur des concentrations de lactate musculaire pendant un match.

Mesurer une concentration de lactate sanguin ne permet donc pas de reconstruire précisément ce qui s'est passé dans chaque muscle au cours des minutes précédentes.

PRUDENCE

Le lactate sanguin est un marqueur physiologique utile dans certains contextes expérimentaux.

Mais il ne constitue pas un « compteur de la filière anaérobie » et ne permet pas de quantifier directement la contribution glycolytique d'un match.

Le système énergétique suit le jeu

Lorsqu'un joueur **marche ou trotte**, la demande d'ATP reste relativement faible et peut être couverte très largement par le métabolisme oxydatif.

Lorsqu'il **accélère**, la demande augmente rapidement et la contribution des systèmes phosphagène et glycolytique augmente.

Lorsqu'il réalise un **sprint maximal**, le débit nécessaire devient extrêmement élevé et les voies capables de fournir rapidement de l'ATP prennent une importance majeure.

Lorsqu'il **ralentit après le sprint**, la demande immédiate baisse mais le métabolisme oxydatif reste particulièrement utile pour restaurer progressivement l'état énergétique du muscle.

Puis une nouvelle action commence.

POUR COMPRENDRE – Le système énergétique suit le jeu

Le joueur ne choisit pas consciemment d'utiliser une voie énergétique.

La demande créée par ses actions modifie automatiquement la vitesse des réactions métaboliques.

Quand la demande augmente, les voies capables de produire rapidement de l'ATP augmentent leur contribution.

Quand elle diminue, le profil métabolique évolue à nouveau.

L'énergétique du joueur s'adapte donc en permanence au déroulement du jeu.

Les postes ne présentent pas exactement les mêmes contraintes

La demande énergétique n'est pas identique pour tous les joueurs.

Les analyses de match montrent des différences entre les postes [27].

Certains accumulent davantage de course totale.

D'autres réalisent davantage de sprints.

Certains multiplient les accélérations courtes ou les changements de direction dans des espaces réduits.

Le contexte tactique peut également modifier profondément ces sollicitations.

Cela signifie qu'il est difficile de définir « **le profil énergétique du footballeur** » comme s'il était identique pour tous.

Les moyennes de match peuvent masquer les moments décisifs

Supposons qu'un joueur réalise une activité moyenne relativement modérée pendant plusieurs minutes.

Puis, en quelques secondes :

1. il accélère pour fermer une ligne de passe ;
2. change brutalement de direction ;
3. sprinte sur vingt mètres ;
4. réalise un duel ;
5. repart immédiatement dans l'autre sens.

La moyenne calculée sur plusieurs minutes peut sembler raisonnable.

Pourtant, pendant cette courte séquence, la demande énergétique a été extrêmement élevée.

SUR LE TERRAIN

Préparer un joueur uniquement à supporter « l'intensité moyenne » d'un match risque donc de manquer une partie essentielle de la performance.

Le joueur doit également être capable de répondre aux **pics de demande**, puis de récupérer suffisamment pour poursuivre le jeu.

Le métabolisme oxydatif joue donc deux rôles essentiels

Dans le football, le rôle du métabolisme oxydatif peut être résumé de deux manières.

Premièrement, il permet de fournir une très grande partie de l'énergie nécessaire pour **soutenir l'activité pendant toute la durée du match**.

Deuxièmement, il contribue aux processus de **récupération entre les actions intenses**, notamment à la resynthèse de la phosphocréatine.

Le système oxydatif ne sert donc pas uniquement à « courir longtemps ».

Il aide également le joueur à récupérer entre des actions qui, elles, reposent fortement sur les voies capables de fournir rapidement de l'ATP.

IDÉE REÇUE

« L'aérobie sert à courir longtemps ; l'anaérobie sert à sprinter. »

Cette phrase contient une tendance générale mais donne une représentation trop compartimentée.

Le métabolisme oxydatif soutient l'activité prolongée du joueur, contribue déjà aux efforts intenses et joue un rôle important dans la récupération entre ces efforts.

Les systèmes énergétiques doivent donc être compris comme **complémentaires**, et non opposés.

Peut-on donc dire que le football est « aérobie » ou « anaérobie » ?

La question est finalement mal posée.

Sur l'ensemble d'un match, **la contribution oxydative est très importante** compte tenu de la durée de l'activité et de la nécessité de maintenir continuellement la resynthèse de l'ATP.

Mais certaines actions décisives imposent ponctuellement une demande énergétique très élevée pour laquelle les systèmes phosphagène et glycolytique jouent un rôle majeur.

Ainsi, le football n'est pas :

aérobie OU anaérobie.

Il est :

aérobie ET anaérobie, avec une contribution relative qui change continuellement selon les actions du joueur.

SUR LE TERRAIN

Cette réalité invite à éviter deux extrêmes dans la préparation physique :

- ne travailler que des exercices continus sous prétexte que le match dure 90 minutes ;
- ne travailler que des sprints et efforts courts sous prétexte que les actions décisives sont explosives.

Le footballeur doit être capable de produire des actions de forte intensité **dans un organisme capable de soutenir et de récupérer de ces actions pendant toute la durée du match**.

C'est probablement la meilleure illustration du principe central de cette revue :

Ce que nous savons... et ce qu'il faut éviter de simplifier

La bioénergétique de l'exercice est souvent enseignée à l'aide de modèles volontairement simples.

Ces modèles sont utiles pour découvrir les principaux mécanismes, mais ils peuvent devenir trompeurs lorsqu'ils sont considérés comme une représentation littérale du fonctionnement de l'organisme.

Après avoir étudié l'ATP, les systèmes énergétiques, les substrats, les sprints répétés et le football, plusieurs conclusions peuvent aujourd'hui être considérées comme **solidement établies**.

D'autres affirmations nécessitent en revanche davantage de prudence.

Ce qui est solidement établi : l'ATP doit être continuellement renouvelé

Le muscle possède seulement une quantité limitée d'ATP immédiatement disponible. Pourtant, pendant l'exercice, la vitesse à laquelle cette molécule est utilisée peut augmenter considérablement.

Pour maintenir la contraction musculaire, l'organisme doit donc **adapter continuellement la resynthèse de l'ATP à son utilisation** [1,4].

Le véritable enjeu énergétique de l'exercice n'est donc pas de disposer d'un énorme stock d'ATP, mais de pouvoir le renouveler suffisamment rapidement.

Ce qui est solidement établi : plusieurs voies contribuent simultanément

La phosphocréatine, la glycolyse et la phosphorylation oxydative ne fonctionnent pas successivement.

Elles contribuent simultanément à la resynthèse de l'ATP.

Leur contribution relative varie selon les circonstances, mais aucune frontière temporelle précise ne sépare leur fonctionnement [7–11].

IDÉE REÇUE

« Une filière s'arrête lorsque la suivante commence. »

Non.

Les systèmes énergétiques fonctionnent ensemble. Ce sont principalement leurs **débits et leurs contributions relatives** qui évoluent au cours de l'exercice.

Ce qui est solidement établi : l'intensité et la durée modifient fortement cette répartition

Lors d'un effort maximal très court, les voies capables de fournir rapidement de l'ATP occupent une place particulièrement importante.

À mesure que l'effort maximal se prolonge, la contribution relative du métabolisme oxydatif augmente [10,11].

Mais la durée ne peut jamais être interprétée seule.

Il faut au minimum considérer conjointement :

- la durée ;
- l'intensité ;
- le mode d'exercice ;
- la récupération ;
- les caractéristiques du sportif.

Ce qui est solidement établi : voie énergétique et carburant ne sont pas synonymes

Les glucides, les lipides et la phosphocréatine sont des **substrats ou réserves énergétiques**.

Ils ne correspondent pas directement aux trois systèmes énergétiques traditionnellement enseignés.

Les glucides peuvent notamment contribuer :

- à la production glycolytique d'ATP ;
- mais également au métabolisme oxydatif.

Le métabolisme « aérobie » n'est donc pas synonyme d'utilisation des graisses [1,14,15].

Ce qui est solidement établi : le métabolisme oxydatif participe aussi aux efforts explosifs

Lors d'un sprint maximal très court, les voies phosphagène et glycolytique jouent un rôle considérable.

Mais le métabolisme oxydatif participe lui aussi dès le début de l'exercice [8,11].

Son importance devient encore plus évidente lorsque les efforts se répètent.

Il contribue notamment à la resynthèse de la phosphocréatine pendant les périodes de récupération [20,21].

Ce qui est solidement établi : répéter un effort change son profil énergétique

Une série de sprints ne correspond pas à plusieurs copies identiques du premier sprint.

Après chaque répétition :

- la phosphocréatine disponible a changé ;
- la contribution glycolytique peut évoluer ;
- la consommation d'oxygène reste élevée ;
- la fatigue s'accumule ;
- la récupération n'est pas nécessairement complète.

Le profil énergétique du cinquième ou du dixième sprint peut donc être sensiblement différent de celui du premier [18,20–24].

Ce qu'il faut éviter de simplifier : attribuer des durées fixes aux « filières »

Les tableaux indiquant :

0 à X secondes = système phosphagène

puis :

X à Y secondes = glycolyse

puis :

au-delà de Y secondes = aérobie

peuvent faciliter une première approche pédagogique.

Ils ne constituent cependant pas une description fidèle de la physiologie.

Les transitions sont progressives et les différentes voies se chevauchent [10,11].

PRUDENCE

Une durée peut permettre d'anticiper certaines tendances énergétiques uniquement si l'on connaît également l'intensité et le contexte de l'exercice.

La durée seule ne permet pas d'identifier une filière énergétique.

Ce qu'il faut éviter de simplifier : transformer les pourcentages en vérités absolues

Les recherches scientifiques permettent d'estimer la contribution relative des systèmes énergétiques.

Mais ces contributions ne sont pas directement observables comme pourraient l'être une distance ou un chronomètre.

Les chercheurs doivent les estimer à partir de différentes méthodes physiologiques [11].

Ainsi, dire qu'un effort maximal de dix secondes présente en moyenne une très forte dominante anaérobie est utile.

Affirmer que **tout effort de dix secondes correspond exactement à une répartition précise et universelle** ne l'est pas.

Les pourcentages doivent donc principalement servir à illustrer des **ordres de grandeur**.

Ce qu'il faut éviter de simplifier : transposer directement le laboratoire au terrain

Une grande partie des connaissances bioénergétiques provient d'expériences utilisant :

- des ergocycles ;
- des exercices standardisés ;
- des contractions musculaires isolées ;
- des temps de récupération précisément contrôlés ;
- parfois de petits groupes de participants.

Ces protocoles sont indispensables pour comprendre les mécanismes physiologiques.

Mais un sprint de six secondes sur ergocycle n'est pas mécaniquement identique à une accélération de six secondes sur une pelouse.

Un protocole de dix sprints séparés exactement par trente secondes ne reproduit pas l'imprévisibilité d'un match.

PRUDENCE

Une étude de laboratoire peut fournir des connaissances très solides sur un **mécanisme physiologique** sans pour autant permettre de reproduire précisément la contrainte d'un match.

Il faut donc distinguer :

- ce que l'étude démontre sur le fonctionnement de l'organisme ;
- ce que nous pouvons raisonnablement en déduire pour le football ;
- ce qu'elle ne permet pas de conclure.

Ce qu'il faut éviter de simplifier : expliquer la fatigue avec une seule molécule

La diminution de la performance a notamment été associée à :

- la diminution de la phosphocréatine ;
- l'accumulation de certains métabolites ;
- les modifications du pH musculaire ;
- la diminution du glycogène ;
- différentes perturbations ioniques.

Chacun de ces phénomènes peut avoir une importance dans certaines situations.

Mais la fatigue musculaire et la fatigue observée pendant un match sont **multifactorielles**.

Dans le football, la situation devient encore plus complexe puisque la performance dépend également de facteurs :

- neuromusculaires ;
- mécaniques ;
- thermiques ;
- perceptifs ;
- cognitifs ;
- psychologiques ;
- tactiques ;
- contextuels [29,30].

Ce qu'il faut éviter de simplifier : considérer le lactate comme un indicateur direct d'une « filière »

La concentration sanguine de lactate est parfois utilisée comme si elle indiquait directement la quantité d'énergie produite par la « filière lactique ».

Cette interprétation est incorrecte.

Le lactate sanguin résulte simultanément de sa production, de son transport, de son utilisation et de sa redistribution dans l'organisme.

Lors d'un match de football, Krstrup et ses collaborateurs n'observaient d'ailleurs pas de corrélation significative entre les concentrations musculaires et sanguines de lactate [29].

La concentration sanguine constitue donc une information physiologique intéressante dans certains contextes, mais pas un compteur direct de la contribution glycolytique.

Ce que nous ne savons pas avec précision

Nous ne pouvons pas déterminer simplement, pour un joueur donné sur une action donnée :

- le pourcentage exact d'ATP fourni par chaque système énergétique ;
- la quantité exacte de phosphocréatine disponible avant un sprint ;
- la répartition précise entre glucose, glycogène et lipides à chaque instant ;
- le niveau exact de récupération métabolique avant l'action suivante ;
- la contribution énergétique précise d'une séquence de match à partir de sa seule durée.

Ces informations nécessiteraient des mesures physiologiques complexes, dont certaines sont impossibles à réaliser directement dans les conditions normales d'un match.

Cette incertitude ne signifie pas que nous ne savons rien.

Elle signifie que **la physiologie permet davantage d'identifier des mécanismes, des tendances et des déterminants que de donner un pourcentage exact pour chaque action réalisée sur un terrain.**

Un modèle reste utile s'il est utilisé comme un modèle

Les termes :

- système phosphagène ;
- glycolyse ;
- métabolisme oxydatif ;
- contribution anaérobie ;
- contribution aérobie ;

restent extrêmement utiles.

Ils permettent d'organiser et d'expliquer des mécanismes complexes.

Le problème ne réside donc pas dans le fait de simplifier.

Pour enseigner, **il faut nécessairement simplifier.**

Le problème apparaît lorsque l'on oublie que cette simplification est un modèle.

POUR COMPRENDRE

Un bon modèle pédagogique ne cherche pas à reproduire chaque détail de la réalité.

Il cherche à rendre cette réalité compréhensible sans modifier les principes essentiels.

Dire que le système phosphagène est particulièrement important lors d'un sprint constitue une simplification utile.

Dire que **seul** le système phosphagène fonctionne pendant les premières secondes constitue une simplification qui devient fausse.

De « quelle filière ? » à « quelle demande ? »

Pour l'éducateur, l'évolution la plus importante est peut-être finalement une évolution du vocabulaire.

Au lieu de demander systématiquement :

« **Quelle filière cet exercice développe-t-il ?** »

nous pouvons chercher à comprendre :

- quelle intensité le joueur doit produire ;
- combien de temps il doit la maintenir ;
- combien de fois l'action sera répétée ;
- quelle récupération lui est accordée ;
- quelle qualité de mouvement doit être conservée ;
- dans quel état de fatigue la répétition suivante sera effectuée.

SUR LE TERRAIN

Pour construire un exercice, quatre questions simples sont souvent plus utiles qu'un nom de « filière » :

Quelle intensité ?

Quelle durée ?

Combien de répétitions ?

Quelle récupération ?

Ces paramètres déterminent ensemble une grande partie de la demande énergétique imposée au joueur.

Une vision intégrée de l'énergie pendant l'effort

Nous pouvons finalement résumer toute la logique de cette revue en quelques étapes.

Le muscle utilise de l'ATP pour fonctionner.

Ses réserves immédiates d'ATP étant faibles, il doit continuellement le resynthétiser.

Pour cela, plusieurs voies fonctionnent simultanément :

- le système phosphagène ;
- la glycolyse ;
- la phosphorylation oxydative.

Ces voies utilisent différentes réserves et différents substrats.

Leur contribution évolue continuellement selon :

- l'intensité ;
- la durée ;
- les répétitions ;
- la récupération ;
- la disponibilité des substrats ;

- l'état du muscle ;
- les caractéristiques du sportif.

Dans le football, ces paramètres changent presque constamment.

Il est donc beaucoup plus fidèle de considérer le métabolisme énergétique comme **un réseau intégré et adaptable** que comme trois filières indépendantes.

Cette idée constitue probablement le principal message de cette revue.

À retenir

- Le muscle utilise directement de l'**ATP** pour assurer une grande partie des mécanismes nécessaires à la contraction, au contrôle du calcium et au maintien de l'excitabilité musculaire.
- Les réserves immédiates d'ATP sont faibles. Pour poursuivre l'effort, l'organisme doit donc **resynthétiser continuellement l'ATP utilisé**.
- Trois grandes voies participent à cette resynthèse : le **système phosphagène**, la **glycolyse** et la **phosphorylation oxydative**.
- Ces systèmes énergétiques **ne fonctionnent pas les uns après les autres**. Ils contribuent simultanément dès le début de l'exercice, avec des proportions qui évoluent selon la demande.
- Il est plus juste de parler de système **dominant** que de système exclusif. Même un sprint très court comporte une contribution glycolytique et oxydative.
- La **durée** ne suffit pas à déterminer le profil énergétique d'un exercice. L'**intensité**, le mode d'exercice, les répétitions, la récupération et les caractéristiques du sportif doivent également être considérés.
- Les glucides, les lipides et la phosphocréatine sont des **substrats ou réserves énergétiques** ; ils ne correspondent pas directement à des « filières ». Les glucides peuvent notamment alimenter aussi bien la glycolyse que le métabolisme oxydatif.
- Lors d'un sprint maximal, le système phosphagène et la glycolyse jouent un rôle majeur, tandis que la contribution oxydative existe déjà et augmente progressivement si l'effort se prolonge.
- Lorsque les sprints se répètent, leur profil énergétique change. La récupération de la **phosphocréatine** devient notamment importante, et le métabolisme oxydatif contribue fortement aux processus de récupération entre les efforts.
- Une série de sprints n'est donc pas une simple répétition du premier sprint : l'état énergétique du muscle évolue à chaque effort.
- En football, le métabolisme oxydatif joue un rôle majeur sur l'ensemble du match, tandis que les accélérations, sprints, changements de direction et duels imposent ponctuellement des débits très élevés de resynthèse de l'ATP.
- Le football n'est donc ni « aérobique » ni « anaérobique ». Il repose sur une **interaction permanente entre plusieurs systèmes énergétiques**, dont la contribution évolue continuellement avec les actions du joueur.
- Les tableaux attribuant une durée précise à une « filière » sont utiles pour apprendre seulement s'ils restent des modèles. Il n'existe pas de frontière physiologique universelle du type « 0–6 secondes = alactique, puis lactique, puis aérobique ».
- Les pourcentages de contribution énergétique doivent être considérés comme des **estimations et des ordres de grandeur**, et non comme des valeurs exactes applicables à chaque joueur ou chaque action.
- Pour l'éducateur, il est souvent plus pertinent de raisonner en termes de **demande énergétique** qu'en termes de « filière » : quelle intensité, pendant combien de temps, combien de répétitions et avec quelle récupération ?
- Enfin, la fatigue ne peut pas être expliquée par une seule molécule ou un seul système énergétique. Elle résulte d'interactions entre facteurs métaboliques, neuromusculaires, mécaniques et, en football, tactiques et contextuels.

À propos de cette revue

Cette revue propose une **synthèse structurée de la littérature scientifique** consacrée à la fourniture d'énergie pendant l'exercice, avec une attention particulière portée à son application au football.

Elle ne constitue pas une revue systématique au sens méthodologique du terme. Les publications ont été sélectionnées afin de documenter les principaux mécanismes abordés dans l'article et de confronter les modèles pédagogiques traditionnels aux connaissances scientifiques disponibles.

La recherche bibliographique s'est appuyée prioritairement sur :

- des revues de littérature et revues systématiques ;
- des articles de synthèse publiés dans des revues scientifiques à comité de lecture ;
- des études expérimentales réalisées chez l'être humain ;
- des travaux spécifiques au football lorsque ceux-ci permettaient de rapprocher les mécanismes physiologiques des contraintes du jeu.

Certaines publications anciennes ont volontairement été conservées lorsqu'elles constituent des travaux fondateurs ou lorsqu'elles apportent des mesures expérimentales particulièrement utiles à la compréhension des mécanismes étudiés.

Interprétation des données

La contribution respective des systèmes énergétiques est difficile à mesurer directement chez l'être humain.

Les études utilisent différentes méthodes d'estimation, notamment la consommation d'oxygène, les variations de phosphocréatine, les concentrations de lactate ou différents modèles de calcul.

Pour cette raison, les pourcentages présentés dans cette revue doivent être considérés comme des **ordres de grandeur permettant de comprendre les tendances physiologiques**, et non comme des valeurs universelles applicables à chaque sportif ou à chaque exercice.

Une attention particulière a également été portée à la distinction entre :

- les résultats directement observés dans les études ;
- leur interprétation physiologique ;
- leur application possible au football.

Les résultats obtenus sur ergocycle, lors de contractions musculaires standardisées ou dans d'autres conditions de laboratoire ne peuvent donc pas être transposés automatiquement et à l'identique à une situation de match.

Limites de cette revue

Cette revue présente les principaux mécanismes nécessaires à la compréhension de la bioénergétique de l'exercice, sans chercher à détailler exhaustivement l'ensemble des réactions biochimiques impliquées.

Certaines notions, notamment le métabolisme du lactate, l'utilisation du glycogène, les capacités oxydatives ou les mécanismes de la fatigue, sont volontairement abordées à un niveau général.

Par ailleurs, une part importante des connaissances sur la bioénergétique musculaire provient d'expériences réalisées dans des conditions contrôlées de laboratoire. Ces travaux permettent d'étudier précisément les mécanismes physiologiques, mais leurs résultats quantitatifs ne sont pas toujours directement transposables aux situations complexes et variables rencontrées pendant un match de football.

Dernière recherche bibliographique : 9 août 2026.

Références scientifiques

1. Hargreaves M, Spriet LL. **Skeletal muscle energy metabolism during exercise.** *Nature Metabolism*. 2020;2(9):817–828. DOI · PubMed
2. Furrer R, Hawley JA, Handschin C. **The molecular athlete: exercise physiology from mechanisms to medals.** *Physiological Reviews*. 2023;103(3):1693–1787. DOI · PubMed · Texte intégral
3. MacIntosh BR, Holash RJ, Renaud JM. **Skeletal muscle fatigue—regulation of excitation-contraction coupling to avoid metabolic catastrophe.** *Journal of Cell Science*. 2012;125(Pt 9):2105–2114. DOI · PubMed
4. Krause U, Wegener G. **Control of adenine nucleotide metabolism and glycolysis in vertebrate skeletal muscle during exercise.** *Experientia*. 1996;52(5):396–403. DOI · PubMed
5. Katz A, Sahlin K, Henriksson J. **Muscle ATP turnover rate during isometric contraction in humans.** *Journal of Applied Physiology*. 1986;60(6):1839–1842. DOI · PubMed
6. Baker JS, McCormick MC, Robergs RA. **Interaction among Skeletal Muscle Metabolic Energy Systems during Intense Exercise.** *Journal of Nutrition and Metabolism*. 2010;2010:905612. DOI · PubMed · Texte intégral
7. Parolin ML, Chesley A, Matsos MP, Spriet LL, Jones NL, Heigenhauser GJF. **Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise.** *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 1999;277(5):E890–E900. DOI · PubMed
8. Bangsbo J, Krstrup P, González-Alonso J, Boushel R, Saltin B. **Muscle oxygen kinetics at onset of intense dynamic exercise in humans.** *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2000;279(3):R899–R906. DOI · PubMed
9. Bangsbo J, Gollnick PD, Graham TE, Juel C, Kiens B, Mizuno M, Saltin B. **Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans.** *The Journal of Physiology*. 1990;422:539–559. DOI · PubMed · Texte intégral
10. Gastin PB. **Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise.** *Sports Medicine*. 2001;31(10):725–741. DOI · PubMed
11. Gastin PB, Suppiah HT. **Anaerobic and Aerobic Energy System Contribution During Maximal Exercise: A Systematic Review.** *Sports Medicine*. 2026;56:1723–1747. DOI · PubMed · Texte intégral
12. Gjerløw LE, Støa EM, Helgerud J, Johansen JM, Støren Ø. **Physiological determinants and energy system contribution in short- and middle-distance cycling performance.** *European Journal of Applied Physiology*. 2026;126(5):2501–2513. DOI · PubMed
13. Beneke R, Pollmann C, Bleif I, Leithäuser RM, Hütler M. **How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans?** *European Journal of Applied Physiology*. 2002;87(4–5):388–392. DOI · PubMed
14. Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Horowitz JF, Endert E, Wolfe RR. **Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration.** *American Journal of Physiology*. 1993;265(3 Pt 1):E380–E391. DOI · PubMed
15. van Loon LJC, Greenhaff PL, Constantin-Teodosiu D, Saris WHM, Wagenmakers AJM. **The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans.** *The Journal of Physiology*. 2001;536(Pt 1):295–304. DOI · PubMed · Texte intégral
16. Clauss M, Jensen J. **Effect of Exercise Intensity, Duration, and Volume on Protein Oxidation During Endurance Exercise in Humans: A Systematic Review With Meta-Analysis.** *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2025;35(4):e70038. DOI · PubMed
17. Kiens B, Essen-Gustavsson B, Christensen NJ, Saltin B. **Skeletal muscle substrate utilization during submaximal exercise in man: effect of endurance training.** *The Journal of Physiology*. 1993;469:459–478. DOI · PubMed · Texte intégral
18. Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S. **Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise.** *Journal of Applied Physiology*. 1993;75(2):712–719. DOI · PubMed
19. Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HKA, Boobis LH. **Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans.** *Acta Physiologica Scandinavica*. 1998;163(3):261–272. DOI · PubMed
20. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HKA. **Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise.** *Journal of Applied Physiology*. 1996;80(3):876–884. DOI · PubMed
21. Haseler LJ, Hogan MC, Richardson RS. **Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability.** *Journal of Applied Physiology*. 1999;86(6):2013–2018. DOI · PubMed

22. McGawley K, Bishop DJ. **Oxygen uptake during repeated-sprint exercise.** *Journal of Science and Medicine in Sport.* 2015;18(2):214–218. [DOI](#) · [PubMed](#)
23. Ulupinar S, Özbay S, Gençoğlu C, Franchini E, Kishali NF, İnce İ. **Effects of sprint distance and repetition number on energy system contributions in soccer players.** *Journal of Exercise Science & Fitness.* 2021;19(3):182–188. [DOI](#) · [PubMed](#) · [Texte intégral](#)
24. Mendez-Villanueva A, Edge J, Suriano R, Hamer P, Bishop D. **The recovery of repeated-sprint exercise is associated with PCr resynthesis, while muscle pH and EMG amplitude remain depressed.** *PLoS ONE.* 2012;7(12):e51977. [DOI](#) · [PubMed](#) · [Texte intégral](#)
25. Bangsbo J, Nørregaard L, Thorsø F. **Activity profile of competition soccer.** *Canadian Journal of Sport Sciences.* 1991;16(2):110–116. [PubMed](#)
26. Krstrup P, Mohr M, Ellingsgaard H, Bangsbo J. **Physical demands during an elite female soccer game: importance of training status.** *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 2005;37(7):1242–1248. [DOI](#) · [PubMed](#)
27. Mohr M, Krstrup P, Bangsbo J. **Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue.** *Journal of Sports Sciences.* 2003;21(7):519–528. [DOI](#) · [PubMed](#)
28. Carling C, Le Gall F, Dupont G. **Analysis of repeated high-intensity running performance in professional soccer.** *Journal of Sports Sciences.* 2012;30(4):325–336. [DOI](#) · [PubMed](#)
29. Krstrup P, Mohr M, Steensberg A, Bencke J, Kjaer M, Bangsbo J. **Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance.** *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 2006;38(6):1165–1174. [DOI](#) · [PubMed](#)
30. Bradley PS, Noakes TD. **Match running performance fluctuations in elite soccer: indicative of fatigue, pacing or situational influences?** *Journal of Sports Sciences.* 2013;31(15):1627–1638. [DOI](#) · [PubMed](#)