



**SPORTING CLUB
SONGEONNAIS**

1949

REVUE PRATIQUE

Pourquoi la phosphocréatine est-elle essentielle aux efforts explosifs ?

Sprinter, accélérer, sauter ou changer brutalement de direction exige de resynthétiser de l'ATP à une vitesse extrêmement élevée. La phosphocréatine joue alors un rôle majeur. Cette revue explique comment elle permet de maintenir rapidement l'ATP, pourquoi ses réserves diminuent en quelques secondes et comment leur reconstitution influence la capacité à répéter les efforts intenses.

THÉMATIQUES

Physiologie de l'exercice
Entraînement & préparation physique
Football

PUBLICS

Éducateurs
Joueurs

ÉTAT DES CONNAISSANCES

● Preuves solides

DERNIÈRE MISE À JOUR

10 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 la réaction créatine kinase aux sprints répétés : comprendre la place de la phosphocréatine dans les efforts explosifs et dans la récupération du footballeur.

01 Qu'est-ce que la phosphocréatine ?

03 Comment la phosphocréatine permet-elle de resynthétiser rapidement l'ATP ?

05 La phosphocréatine est-elle le seul système énergétique d'un sprint ?

07 La phosphocréatine est-elle totalement épuisée après un sprint ?

09 Pourquoi l'oxygène est-il important pour sa resynthèse ?

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

13 L'entraînement peut-il améliorer la resynthèse de phosphocréatine ?

15 Comment utiliser ces connaissances pour construire les exercices de sprint ?

17 À retenir

19 Références scientifiques

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

04 Que se passe-t-il pendant les premières secondes d'un effort maximal ?

06 À quelle vitesse les réserves de phosphocréatine diminuent-elles ?

08 Comment la phosphocréatine est-elle resynthétisée pendant la récupération ?

10 Combien de temps faut-il pour récupérer ses réserves ?

12 Comment la durée de récupération modifie-t-elle la performance ?

14 Que se passe-t-il pendant un match de football ?

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

18 À propos de cette revue

Qu'est-ce que la phosphocréatine ?

Pour courir, sauter, accélérer, changer de direction ou frapper dans un ballon, les fibres musculaires doivent produire de la force. Cette production de force nécessite de l'énergie.

Mais le muscle n'utilise pas directement les glucides, les lipides ou la créatine pour se contracter. La molécule directement utilisée par de nombreux processus cellulaires est l'**adénosine triphosphate**, plus connue sous son abréviation : **ATP**.

Lorsque l'ATP est hydrolysé, il peut libérer l'énergie nécessaire au fonctionnement de différentes protéines impliquées dans la contraction musculaire, le transport des ions ou encore le contrôle du calcium.

Le problème est que les réserves d'ATP présentes dans le muscle sont relativement faibles. Pour maintenir son fonctionnement lorsque la demande énergétique augmente, le muscle doit donc **resynthétiser continuellement l'ATP qu'il utilise**.

C'est précisément là que la phosphocréatine joue un rôle majeur.

Une réserve de phosphate immédiatement disponible

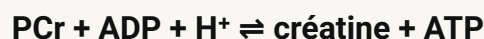
La **phosphocréatine**, généralement abrégée **PCr**, est une molécule présente dans les fibres musculaires. Elle est constituée d'une molécule de créatine à laquelle est associé un groupement phosphate possédant un fort potentiel de transfert.

DÉFINITION - Phosphocréatine

La phosphocréatine, ou PCr, est une molécule présente dans le muscle capable de transférer rapidement un groupement phosphate à l'ADP afin de permettre la resynthèse de l'ATP.

Elle constitue ainsi un important système de tampon énergétique lorsque la demande en ATP augmente brutalement.

Lorsqu'une molécule d'ATP est hydrolysée, elle forme notamment de l'ADP. La phosphocréatine peut alors lui transférer rapidement son groupement phosphate :



Cette réaction est catalysée par une enzyme : la **créatine kinase**, ou CK.

La réaction est réversible. Pendant un effort très intense, elle contribue principalement à reformer rapidement de l'ATP. Pendant la récupération, elle peut fonctionner dans l'autre direction afin de reformer progressivement la phosphocréatine utilisée pendant l'exercice.

Créatine et phosphocréatine ne sont pas exactement la même chose

Les deux termes sont parfois employés comme s'ils étaient interchangeables. Ils désignent pourtant deux formes différentes.

La **créatine** correspond à la molécule non phosphorylée. La **phosphocréatine** correspond à la créatine à laquelle un groupement phosphate a été transféré.



La créatine constitue ainsi l'un des composants du système, tandis que la PCr représente la forme phosphorylée pouvant contribuer rapidement au renouvellement de l'ATP.

La phosphocréatine agit comme un tampon énergétique

Lorsque l'exercice commence brutalement, la consommation d'ATP peut augmenter extrêmement rapidement. Le muscle doit alors éviter que sa concentration en ATP ne diminue dans les mêmes proportions.

La phosphocréatine joue précisément ce rôle de **tampon temporel**. Lorsque davantage d'ATP est hydrolysé, l'ADP augmente localement et la réaction catalysée par la créatine kinase contribue à resynthétiser rapidement l'ATP.

Après seulement six secondes de sprint maximal, Gaitanos et ses collaborateurs observaient une diminution d'environ **57 % de la phosphocréatine musculaire** [1]. Après neuf secondes d'exercice maximal, Walter et ses collaborateurs mesuraient une diminution d'environ **61 %** [2]. Pourtant, lors d'efforts plus prolongés, les concentrations d'ATP diminuent généralement beaucoup moins fortement que celles de phosphocréatine [2,3].

POUR COMPRENDRE - Une recharge très rapide

On peut comparer l'ATP à une petite réserve directement utilisable par les mécanismes cellulaires. La phosphocréatine ne remplace pas cette réserve : elle permet plutôt de la **recharger très rapidement** lorsque la consommation augmente brutalement.

Cette analogie simplifie la réalité biochimique, mais elle permet de retenir une idée essentielle : **la phosphocréatine sert principalement à maintenir rapidement la disponibilité de l'ATP.**

Son principal avantage est sa vitesse

Le principal intérêt physiologique de la phosphocréatine n'est pas de représenter une immense quantité d'énergie. Ses réserves sont au contraire relativement limitées. Son avantage réside surtout dans sa capacité à contribuer à la resynthèse de l'ATP à un **débit extrêmement élevé**.

Cette caractéristique est particulièrement importante lors d'un démarrage, d'une accélération maximale, d'un saut, d'un duel explosif, d'un changement brutal de direction ou d'un sprint.

Toutes les fibres ne possèdent pas exactement les mêmes caractéristiques

Greenhaff et ses collaborateurs ont étudié six hommes réalisant trente secondes de sprint maximal sur tapis roulant [4]. Avant l'exercice, les fibres de type II présentaient une concentration moyenne de phosphocréatine supérieure à celle des fibres de type I. Pendant le sprint, la dégradation de PCr était également plus importante dans les fibres de type II [4].

Il ne faut cependant pas transformer cette observation en opposition rigide entre fibres rapides et métabolisme phosphagène d'un côté, fibres lentes et métabolisme oxydatif de l'autre. Toutes les fibres disposent de plusieurs mécanismes permettant de resynthétiser l'ATP.

La phosphocréatine ne constitue pas une « filière » fonctionnant seule

Le terme **système phosphagène** est utile pour désigner les réactions permettant de renouveler très rapidement l'ATP grâce aux composés phosphatés présents dans le muscle, principalement la PCr. Mais il ne signifie pas que ce système fonctionne indépendamment des autres voies.

Pendant un effort explosif, la phosphocréatine est mobilisée, la glycolyse participe à la resynthèse de l'ATP et le métabolisme oxydatif commence lui aussi à augmenter son activité. Les contributions relatives changent avec le temps.

Ses réserves sont limitées

Cette très grande vitesse possède une contrepartie : la quantité de PCr disponible dans le muscle est limitée. Lors d'un exercice maximal, une part importante de cette réserve peut être utilisée en seulement quelques secondes [1,2].

SUR LE TERRAIN

Lorsqu'un joueur déclenche une accélération maximale, sa phosphocréatine contribue immédiatement au maintien du renouvellement rapide de l'ATP. Mais cette réserve commence simultanément à diminuer. La qualité d'un nouvel effort explosif dépendra donc en partie de ce qu'il reste de cette réserve et de ce qui aura pu être reconstitué depuis l'action précédente.

Pour comprendre pourquoi ce mécanisme est aussi important, il faut maintenant revenir à la molécule qu'il cherche précisément à préserver : **l'ATP**.

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

L'ATP constitue la molécule directement utilisée par de nombreux mécanismes nécessaires au fonctionnement du muscle. On pourrait donc imaginer que l'organisme en stocke d'immenses quantités dans les fibres musculaires afin de disposer d'une importante réserve énergétique.

Ce n'est pas le cas.

Le muscle possède bien de l'ATP immédiatement disponible. Mais la quantité stockée est faible par rapport à la quantité qui peut être renouvelée et utilisée pendant un exercice.

Il faut distinguer stock et débit de renouvellement

La quantité d'ATP présente à un instant donné ne doit pas être confondue avec la quantité totale d'ATP qui peut être utilisée au cours d'un effort. Une même molécule d'ADP peut être rephosphorylée en ATP puis hydrolysée à nouveau de nombreuses fois.

ATP → hydrolyse → ADP → resynthèse → ATP

Ce renouvellement peut atteindre des débits extrêmement élevés.

Les besoins peuvent dépasser très largement le stock disponible

Katz, Sahlin et Henriksson ont étudié chez l'être humain une contraction isométrique maintenue à environ deux tiers de la force volontaire maximale jusqu'à épuisement [5]. L'exercice durait en moyenne environ **53 secondes**.

Pendant cette période, le renouvellement total estimé de l'ATP atteignait **190 ± 7 mmol·kg⁻¹ de muscle sec**, avec un débit moyen d'environ **3,7 ± 0,2 mmol·kg⁻¹·s⁻¹** [5]. À la fatigue, la phosphocréatine était déplétée de **86 à 99 %** selon les participants [5].

POUR COMPRENDRE - Le débit compte davantage que le stock

Imaginez une petite réserve d'eau continuellement remplie pendant qu'elle est utilisée. La quantité présente à un instant donné peut rester relativement stable alors que des volumes beaucoup plus importants traversent le système au fil du temps.

Pour l'ATP musculaire, le problème essentiel est comparable : **maintenir suffisamment de molécules disponibles malgré une utilisation extrêmement rapide.**

L'ATP ne doit pas chuter brutalement

L'ATP est indispensable au fonctionnement des protéines contractiles, au contrôle du calcium, aux pompes ioniques et plus généralement à l'homéostasie cellulaire. L'organisme dispose donc de plusieurs mécanismes capables de contribuer simultanément à son renouvellement.

La phosphocréatine est utilisée davantage que l'ATP

Bogdanis et ses collaborateurs ont étudié des hommes réalisant trente secondes de sprint maximal sur ergocycle [3]. À la fin de l'effort, la PCr ne représentait plus qu'environ **19,7 % de sa valeur de repos**, alors que l'ATP représentait encore environ **70,5 % de sa valeur initiale** [3].

La PCr intervient donc précisément pour contribuer à préserver l'ATP, et non après un hypothétique épuisement de celui-ci.

IDÉE REÇUE

« **Le muscle utilise d'abord ses réserves d'ATP, puis commence à utiliser la phosphocréatine.** »

Cette représentation est trompeuse. Dès que l'utilisation d'ATP augmente, sa resynthèse doit augmenter elle aussi. La phosphocréatine participe immédiatement à ce renouvellement.

La concentration d'ATP et son flux sont deux informations différentes

Une concentration d'ATP relativement stable ne signifie pas que le métabolisme est peu actif. Elle peut résulter d'un équilibre extrêmement dynamique entre une hydrolyse très rapide et une resynthèse tout aussi rapide.

Un sprint exige surtout une très grande vitesse de renouvellement

Lorsqu'un joueur accélère brutalement, la consommation d'ATP augmente en une fraction de seconde. Les mitochondries et la glycolyse contribuent elles aussi au renouvellement de l'ATP, mais la PCr possède une caractéristique particulièrement adaptée à cette transition : elle peut augmenter très rapidement sa contribution.

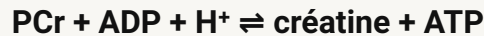
SUR LE TERRAIN

Le problème énergétique d'un sprint n'est pas simplement : « **combien d'énergie le joueur possède-t-il ?** » Il est surtout : « **à quelle vitesse ses muscles peuvent-ils renouveler l'ATP nécessaire pour produire cette action ?** »

Le véritable enjeu devient donc : **comment la phosphocréatine permet-elle de reformer l'ATP aussi rapidement ?**

Comment la phosphocréatine permet-elle de resynthétiser rapidement l'ATP ?

La phosphocréatine peut transférer directement un groupement phosphate à l'ADP. Cette réaction est catalysée par la créatine kinase :



La réaction est réversible. Son sens net dépend notamment des concentrations locales des différents réactifs et produits.

Une réponse rapide à l'augmentation de l'ADP

Lorsque les ATPases musculaires hydrolysent davantage d'ATP, l'ADP augmente localement et l'environnement chimique de la réaction créatine kinase se modifie. Compte tenu de la forte activité de l'enzyme et du fait que la réaction reste proche de l'équilibre dans de nombreuses conditions, ces changements permettent un ajustement très rapide du flux net.

Il ne faut donc pas imaginer la créatine kinase comme un interrupteur soudainement activé : le système répond continuellement aux variations locales.

Une réaction relativement directe

La resynthèse de l'ATP à partir de la PCr nécessite un transfert de phosphate relativement direct, avec des substrats déjà présents dans la fibre musculaire. Cela contribue à expliquer la capacité du système à fournir rapidement un débit très élevé.

Cette comparaison ne signifie pas que les autres voies seraient inactives : glycolyse et phosphorylation oxydative contribuent elles aussi dès le début.

Les observations humaines confirment ce rôle de tampon

Goudemant et ses collaborateurs ont étudié la réaction créatine kinase dans le muscle humain par spectroscopie de résonance magnétique [6]. Au cours de l'exercice, la PCr diminuait tandis que la concentration d'ATP restait relativement stable [6].

PRUDENCE

Les mesures par transfert de saturation utilisées dans cette étude renseignent sur un **flux d'échange** de la réaction CK. Elles ne doivent pas être assimilées directement à une mesure simple du débit net de resynthèse d'ATP.

La réaction ne consomme pas directement d'oxygène

Dans le sens utilisé pendant un effort explosif, aucune molécule d'oxygène n'apparaît directement dans la réaction. Cela ne signifie ni que le métabolisme oxydatif soit absent pendant le sprint, ni que l'oxygène ne soit pas important pour restaurer la PCr après l'effort.

La créatine kinase est également organisée dans l'espace musculaire

Le système créatine-phosphocréatine ne doit pas être envisagé uniquement comme une réaction chimique uniforme. Des travaux expérimentaux classiques réalisés sur des myofibrilles de muscle squelettique ont montré qu'une fraction de la créatine kinase est associée à la ligne M du sarcomère et peut contribuer localement à la régénération de l'ATP utilisé par l'appareil contractile [7].

Ces résultats, obtenus sur du muscle de poulet, ont contribué au développement du modèle selon lequel le système créatine-phosphocréatine participe également aux transferts énergétiques entre les régions où l'ATP est produit et celles où il est fortement utilisé.

Chez l'être humain, des mesures réalisées in vivo montrent par ailleurs que la PCr diffuse dans le muscle et que cette diffusion est compatible avec des transferts sur les distances séparant les mitochondries des myofibrilles [8].

PRUDENCE

Le « shuttle » créatine-phosphocréatine constitue un modèle de l'organisation spatiale des transferts énergétiques. Il ne faut pas l'imaginer comme un circuit unique et obligatoire par lequel toute l'énergie cellulaire devrait nécessairement transiter.

Une fonction temporelle et spatiale

La PCr constitue d'abord un **tampon temporel** répondant rapidement aux variations brutales de la demande en ATP. Elle participe également à une organisation **spatiale** des transferts énergétiques dans la fibre musculaire.

La phosphocréatine ne crée pas de l'énergie

La PCr ne « crée » pas de nouvelles quantités d'énergie. Elle permet de transférer rapidement un groupement phosphate vers l'ADP. La réserve de PCr elle-même devra ensuite être reconstituée.

POUR COMPRENDRE - Un intermédiaire extrêmement rapide

Pendant une augmentation brutale de la demande : **PCr** → **ATP** devient particulièrement important. Plus tard, lorsque les conditions permettent la récupération : **ATP** → **PCr** permet de reconstituer la réserve.

Mais les réserves musculaires de PCr sont finies. **Que se passe-t-il donc pendant les toutes premières secondes d'un effort maximal ?**

Que se passe-t-il pendant les premières secondes d'un effort maximal ?

Un démarrage, un sprint, un saut ou une accélération maximale imposent au muscle une transition extrêmement brutale. En une fraction de seconde, la vitesse à laquelle l'ATP est utilisé augmente fortement.

Dans cette situation, la PCr joue un rôle particulièrement important. Mais elle ne travaille pas seule. **Dès les premières secondes, plusieurs voies métaboliques contribuent simultanément à la resynthèse de l'ATP.**

La phosphocréatine diminue très rapidement

Dans l'étude de Gaitanos et collaborateurs, après le premier sprint maximal de six secondes, la concentration musculaire de PCr avait diminué d'environ **57 %** [1].

Walter et collaborateurs observaient après seulement **9 secondes** d'exercice maximal une diminution de **61,4 ± 2,4 %** [2].

SUR LE TERRAIN

Lorsqu'un joueur réalise un sprint de cinq à dix secondes, il peut déjà solliciter très fortement ses réserves musculaires de PCr. Il n'est pas nécessaire de réaliser un effort de trente secondes pour que ce système soit fortement mobilisé.

La glycolyse intervient elle aussi dès les premières secondes

Dans l'étude de Gaitanos, le premier sprint durait seulement six secondes. Pourtant, PCr et glycolyse fournissaient toutes deux des contributions importantes à la fourniture énergétique estimée, et le lactate musculaire avait déjà nettement augmenté [1].

IDÉE REÇUE

« Pendant les six premières secondes d'un sprint, le joueur utilise uniquement la phosphocréatine. »

Non. La PCr joue un rôle majeur, mais la glycolyse contribue elle aussi très rapidement à la resynthèse de l'ATP [1].

Le métabolisme glucidique est activé rapidement

Parolin et ses collaborateurs ont étudié six participants réalisant trois efforts maximaux de trente secondes séparés par quatre minutes [9]. Des biopsies réalisées après 6, 15 et 30 secondes montraient notamment une activation rapide de la glycogène phosphorylase et de la pyruvate déshydrogénase [9].

Le métabolisme oxydatif commence lui aussi à augmenter

Bangsbo et ses collaborateurs ont étudié six participants réalisant un exercice intense avec une jambe [10]. La consommation d'oxygène du muscle actif commençait à augmenter après seulement quelques secondes.

PRUDENCE

Cette expérience n'était pas un sprint de football. Elle montre néanmoins que **l'augmentation du métabolisme oxydatif peut commencer très rapidement après le début de l'exercice.**

Plusieurs systèmes répondent simultanément

Pendant les premières secondes d'un sprint maximal, on observe simultanément une utilisation très rapide de l'ATP, une forte dégradation de la PCr, une activation de la glycolyse et une augmentation progressive du métabolisme oxydatif.

POUR COMPRENDRE - Dominant ne veut pas dire exclusif

Dire que le système phosphagène est particulièrement important pendant les premières secondes signifie qu'il contribue très fortement à répondre à la demande énergétique. Cela ne signifie pas que les autres voies sont éteintes.

La puissance maximale ne peut pas être maintenue longtemps

À mesure que la PCr diminue, sa capacité à contribuer au même débit initial évolue. Les autres voies continuent à fournir de l'ATP, mais elles ne compensent pas nécessairement intégralement cette évolution.

La fatigue lors d'un sprint ou de sprints répétés est toutefois multifactorielle et implique des mécanismes énergétiques, métaboliques, contractiles et neuromusculaires [35].

Les premières secondes doivent donc être envisagées comme une période de **coopération métabolique extrêmement rapide.**

La phosphocréatine est-elle le seul système énergétique d'un sprint ?

La phosphocréatine est particulièrement adaptée aux efforts explosifs. Mais il serait incorrect d'en déduire qu'un sprint repose exclusivement sur le système phosphagène.

Même pendant un sprint très court, plusieurs voies métaboliques participent simultanément à la resynthèse de l'ATP.

Pourquoi parle-t-on traditionnellement de « filière anaérobie alactique » ?

Les modèles pédagogiques distinguent souvent trois « filières » : anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie. Cette classification peut aider à introduire les voies énergétiques, mais devient trompeuse lorsqu'elle suggère une chronologie rigide.

PRUDENCE - Une classification pédagogique n'est pas une chronologie physiologique

Les différentes voies fonctionnent simultanément et leurs contributions relatives évoluent continuellement.

Six secondes suffisent pour observer une forte contribution glycolytique

Après le premier sprint maximal de six secondes étudié par Gaitanos et collaborateurs, la PCr avait diminué de **57 %**, le lactate musculaire avait déjà fortement augmenté et la glycolyse contribuait déjà fortement à la fourniture énergétique estimée [1].

« Alactique » ne signifie pas « sans production de lactate »

La réaction créatine kinase ne produit pas de lactate. Mais un sprint sollicitant fortement cette réaction peut simultanément présenter une activité glycolytique importante.

Le métabolisme oxydatif ne commence pas lorsque le sprint s'arrête

La consommation d'oxygène musculaire augmente rapidement lorsque l'exercice commence [10]. Sa contribution relative peut rester limitée au tout début d'un effort maximal très court, mais **faible ne signifie pas nulle**.

POUR COMPRENDRE - Trois curseurs plutôt que trois interrupteurs

Imaginez trois curseurs : phosphagène, glycolytique et oxydatif. Au début du sprint, les trois montent, mais à des vitesses et des amplitudes différentes.

Plus le sprint se prolonge, plus la répartition évolue

Beneke et collaborateurs ont étudié onze hommes réalisant un Wingate maximal de trente secondes [11].

Contribution estimée	Part de l'énergie totale
Composante anaérobie alactique	31,1 %
Composante glycolytique	50,3 %
Métabolisme oxydatif	18,6 %

Ainsi, même pendant un exercice classiquement considéré comme fortement « anaérobie », plusieurs composantes énergétiques contribuaient simultanément à l'effort [11].

PRUDENCE

Ces pourcentages ne constituent pas des valeurs universelles. La composante de 31,1 % était estimée indirectement et ne doit pas être assimilée à une mesure directe de la quantité d'énergie fournie par la PCr lors de n'importe quel sprint.

Il n'existe pas un pourcentage universel de PCr pour « le sprint »

La contribution du système phosphagène dépend de la durée, de l'intensité, du mode d'exercice, de la masse musculaire impliquée, des réserves initiales, de l'état de récupération et des actions précédentes.

Le profil peut changer alors que la tâche reste identique

Dans l'étude de Gaitanos, le dixième sprint de six secondes ne possédait plus le même profil énergétique que le premier. La contribution glycolytique avait fortement diminué alors que la puissance moyenne restait encore à environ **73 % de celle du premier sprint** [1].

SUR LE TERRAIN

Un éducateur peut chercher une **forte contribution du système phosphagène** avec des sprints très courts et une récupération importante. Il ne doit simplement pas imaginer qu'il isole une filière.

À quelle vitesse les réserves de phosphocréatine diminuent-elles ?

La PCr peut diminuer extrêmement rapidement pendant un exercice maximal. Les résultats suivants donnent plusieurs ordres de grandeur issus de protocoles différents :

Durée et protocole	Évolution de la PCr
Sprint maximal de 6 s	≈ -57 % [1]
Exercice maximal de 9 s	-61,4 ± 2,4 % [2]
Exercice maximal de 30 s	-92,0 ± 1,2 % [2]
Sprint maximal de 30 s	PCr restante : 19,7 ± 1,2 % du repos [3]

PRUDENCE

Ces nombres ne constituent pas une courbe universelle. Les protocoles, muscles étudiés, participants et méthodes diffèrent. Leur convergence indique surtout que **la PCr peut diminuer très fortement en quelques secondes d'exercice maximal**.

Il n'existe pas une « durée de vie » fixe de la PCr

Les formulations comme « la phosphocréatine dure six secondes » sont trop rigides. La PCr ne passe pas brutalement de pleine à vide : sa concentration diminue progressivement.

IDÉE REÇUE

« Au bout de six secondes, il n'y a plus de phosphocréatine. »

Non. Six secondes peuvent suffire à utiliser une part importante des réserves, mais elles ne sont généralement pas entièrement épuisées [1].

La vitesse de diminution n'est pas constante

Bogdanis et collaborateurs ont comparé les dix premières secondes et la période comprise entre la dixième et la vingtième seconde d'un sprint maximal [12]. Le renouvellement anaérobie estimé de l'ATP était de **129 ± 12 mmol·kg⁻¹ de matière sèche** pendant les dix premières secondes, contre **63 ± 10 mmol·kg⁻¹** entre la dixième et la vingtième seconde [12].

Cette évolution s'accompagnait d'une forte réduction du débit de dégradation de PCr et du débit glycolytique, tandis que la consommation d'oxygène augmentait.

Toutes les fibres ne présentent pas la même déplétion

Greenhaff et collaborateurs observaient une dégradation de PCr de **$74,3 \pm 2,5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de matière sèche** dans les fibres de type II contre **$59,1 \pm 2,9 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$** dans les fibres de type I [4].

La durée n'est pas le seul facteur

Deux efforts de même durée peuvent produire une déplétion différente selon l'intensité, la puissance produite, le recrutement musculaire, le type de contraction, le muscle, les réserves initiales et l'état métabolique précédent.

Le moment de la mesure compte également

La PCr commence à être resynthétisée rapidement dès que l'exercice cesse. Dawson et collaborateurs observaient après un sprint de six secondes une PCr correspondant à environ **55 % de la valeur pré-exercice après 10 secondes**, puis **69 % après 30 secondes** [13].

PRUDENCE - Mesurer une molécule qui change très vite

Une mesure réalisée quelques secondes après l'arrêt ne correspond pas forcément exactement à la concentration présente au dernier instant de l'exercice.

SUR LE TERRAIN

Un sprint de trois ou quatre secondes ne « vide » pas automatiquement la PCr. Inversement, il n'est pas nécessaire d'atteindre dix secondes pour commencer à la solliciter fortement. La déplétion dépend surtout de **l'intensité réelle de l'action et de son contexte métabolique**.

La phosphocréatine est-elle totalement épuisée après un sprint ?

Les réserves musculaires de PCr peuvent diminuer très fortement. Cela ne signifie cependant pas qu'elles deviennent nécessairement nulles.

Après six secondes de sprint maximal, Gaitanos et collaborateurs observaient une diminution d'environ **57 %** [1]. Après neuf secondes, Walter et collaborateurs observaient **-61,4 ± 2,4 %** [2]. Dans les deux cas, une quantité substantielle restait encore mesurable.

Même après trente secondes, de la PCr peut subsister

Après trente secondes d'exercice maximal, Walter et collaborateurs observaient une déplétion moyenne de **92,0 ± 1,2 %** [2]. Dans un autre protocole, Bogdanis et collaborateurs mesuraient encore **19,7 ± 1,2 % de la valeur de repos** [3].

« Fortement diminuée » est souvent plus précis qu'« épuisée »

Le terme **épuisement** peut suggérer PCr = 0. Il est donc généralement plus précis de parler de **forte déplétion** ou de **diminution importante de la disponibilité en PCr**.

Une baisse de puissance ne signifie pas PCr = 0

La puissance peut diminuer alors que de la PCr reste présente. La fatigue lors d'un sprint ou de sprints répétés est multifactorielle et implique des phénomènes énergétiques, métaboliques, ioniques, contractiles et neuromusculaires [35].

POUR COMPRENDRE - Présente ne signifie pas pleinement disponible

Il faut distinguer **la présence d'une certaine quantité de PCr** et **la capacité du système à maintenir le même débit qu'au début du sprint**. Une réserve non nulle ne garantit pas le maintien de la capacité énergétique initiale.

Le muscle n'est pas un réservoir homogène

Les différences entre fibres observées par Greenhaff et collaborateurs rappellent qu'une valeur moyenne ne décrit pas l'état exact de chaque fibre [4]. Certaines fibres fortement recrutées peuvent être beaucoup plus déplétées que d'autres.

« Épuiser la PCr » n'est pas un objectif d'entraînement

Pour l'entraîneur, chercher à « vider complètement les réserves » n'a pas d'intérêt en soi. Selon l'objectif, il peut au contraire être préférable de préserver suffisamment de récupération pour maintenir la vitesse, l'accélération, la puissance et la qualité technique.

SUR LE TERRAIN

Si l'objectif est de faire produire aux joueurs des sprints de très haute qualité, attendre que la PCr soit « totalement épuisée » n'a aucun intérêt. L'enjeu est de contrôler la relation entre intensité, déplétion et récupération.

Comment la phosphocréatine est-elle resynthétisée pendant la récupération ?

Lorsque l'intensité diminue, la situation métabolique peut progressivement s'inverser. La réaction créatine kinase étant réversible :



peut permettre de reformer la PCr.

D'où vient l'ATP utilisé pour reformer la PCr ?

Pendant la récupération, l'ATP nécessaire est fourni très majoritairement par le **métabolisme oxydatif mitochondrial**. C'est pourquoi la cinétique de récupération de la PCr est largement utilisée comme indicateur fonctionnel de la capacité oxydative musculaire.

La resynthèse commence rapidement

Dawson et collaborateurs ont étudié des sportifs entraînés après un sprint maximal de six secondes [13]. La PCr représentait **55 % de la valeur pré-exercice après 10 secondes, 69 % après 30 secondes et 90 % après 3 minutes** [13].

SUR LE TERRAIN

Entre deux sprints, le muscle n'est pas simplement « au repos ». Une partie de l'activité métabolique sert déjà à **reconstituer la PCr utilisée pendant l'action précédente**.

La récupération est rapide au début puis ralentit

Après un sprint maximal de trente secondes, Bogdanis et collaborateurs mesuraient **19,7 % de la PCr de repos immédiatement après l'effort, puis 65,0 % après 1 min 30 et 85,5 % après 6 minutes** [3].

La récupération n'évolue donc pas de manière parfaitement linéaire : elle est généralement relativement rapide au début, puis ralentit à mesure que la concentration se rapproche de sa valeur de repos.

L'état métabolique du muscle influence la cinétique

Walter et collaborateurs observaient après neuf secondes d'exercice maximal un pH musculaire de **7,04 ± 0,03**, contre **6,45 ± 0,07** après trente secondes [2]. Une acidification importante peut modifier la cinétique globale de récupération et son interprétation.

Un sprint unique et des sprints répétés ne créent pas la même situation

Après un sprint unique de six secondes, Dawson et collaborateurs mesuraient environ **90 % de PCr après trois minutes**. Après cinq sprints de six secondes espacés de trente secondes : **84 % après trois minutes** [13].

PCr restaurée ne signifie pas récupération complète du joueur

D'autres paramètres peuvent rester perturbés : pH, phosphate inorganique, gradients ioniques, fonction contractile, activation neuromusculaire ou température.

PRUDENCE - Une récupération n'est jamais résumée par une seule variable

La PCr est particulièrement importante pour la capacité à reproduire une forte puissance, mais elle ne constitue pas un indicateur universel de « récupération complète ».

Pourquoi l'oxygène est-il important pour sa resynthèse ?

La réaction créatine kinase ne consomme pas directement d'oxygène lorsqu'elle reforme de l'ATP. Pourtant, la resynthèse de PCr pendant la récupération dépend fortement du métabolisme oxydatif.

La raison est simple : **reformer la PCr nécessite de l'ATP**, et cet ATP est principalement fourni par la phosphorylation oxydative mitochondriale.

oxygène → phosphorylation oxydative → ATP → resynthèse de PCr

Que se passe-t-il si l'apport sanguin est interrompu ?

Sahlin, Harris et Hultman ont étudié la resynthèse de créatine phosphate après exercice [14]. Lorsque la circulation sanguine locale était interrompue, la resynthèse de PCr était fortement inhibée [14].

Dans des échantillons musculaires incubés en présence d'oxygène, la PCr pouvait être reformée ; en atmosphère d'azote, cette resynthèse n'était pas observée [14].

IDÉE REÇUE

« Puisque la phosphocréatine est associée à une filière anaérobie, sa récupération ne dépend pas de l'oxygène. »

Cette conclusion confond utilisation et récupération. La restauration de la réserve dépend fortement de l'ATP fourni par le métabolisme oxydatif.

Réduire l'oxygène peut ralentir la récupération

Haseler, Hogan et Richardson ont étudié six hommes entraînés en hypoxie, normoxie et hyperoxie [15].

Condition	Constante de temps
Hypoxie	33,5 ± 4,1 s
Normoxie	25,0 ± 2,7 s
Hyperoxie	20,0 ± 1,8 s

La récupération était donc plus lente en hypoxie et plus rapide en hyperoxie dans ce protocole [15].

Mais davantage d'oxygène n'accélère pas nécessairement tout

Une autre étude de Haseler et collaborateurs chez des participants non entraînés montre que la disponibilité en oxygène devait être suffisamment réduite avant que la récupération soit clairement ralentie [16]. Lorsque la saturation artérielle restait supérieure à environ 92 %, la cinétique variait peu.

POUR COMPRENDRE - Nécessaire ne signifie pas toujours limitant

L'oxygène est nécessaire à la phosphorylation oxydative. Mais il n'est pas nécessairement le facteur qui limite toujours sa vitesse. Si suffisamment d'oxygène est déjà disponible, d'autres étapes peuvent devenir plus déterminantes.

Une récupération « aérobique » au service d'un nouvel effort explosif

sprint → déplétion de PCr → production oxydative d'ATP → resynthèse de PCr → nouveau sprint

SUR LE TERRAIN

Il est artificiel d'opposer complètement **explosivité** et **qualités aérobies**. Le métabolisme oxydatif participe notamment à la restauration d'une réserve particulièrement importante pour les prochaines actions explosives.

Combien de temps faut-il pour récupérer ses réserves ?

Une réponse revient fréquemment dans le langage sportif : « **environ trois minutes** ». Cette valeur peut constituer un ordre de grandeur dans certaines situations, mais elle n'est pas une loi physiologique.

Une grande partie peut revenir rapidement

Après un sprint maximal de six secondes, Dawson et collaborateurs mesuraient **55 % après 10 secondes, 69 % après 30 secondes et 90 % après 3 minutes** [13].

Après un effort plus long, elle peut être beaucoup plus lente

Après trente secondes de sprint maximal, Bogdanis et collaborateurs observaient **19,7 % immédiatement après, 65,0 % après 1 min 30 et 85,5 % après 6 minutes** [3]. La demi-vie moyenne calculée était **56,6 ± 7,3 secondes** [3].

Demi-vie ne signifie pas récupération complète

La demi-vie correspond au temps nécessaire pour récupérer environ la moitié de la différence séparant la valeur de fin d'exercice de la valeur de repos.

POUR COMPRENDRE - Demi-vie ≠ récupération complète

Si la PCr tombe à 20 %, il manque 80 points. Après une demi-vie, environ la moitié de ce manque a été récupérée : le niveau est donc proche de 60 %, pas de 100 %.

La constante de temps est encore une autre notion

Dans un modèle monoexponentiel simple, une constante de temps, τ , correspond à environ **63 % de la récupération possible**. Après environ 2τ , près de 86 % sont récupérés ; après 3τ , environ 95 %.

Il n'existe pas une constante universelle

La revue systématique et méta-analyse de Singh et collaborateurs regroupant **128 études** montre une importante hétérogénéité des cinétiques mesurées par ^{31}P -MRS [17]. Elles varient selon le muscle, la tâche, l'intensité, la déplétion, le pH, l'oxygénation, la capacité oxydative, l'âge, l'état de santé et la méthode d'analyse.

IDÉE REÇUE

« **La phosphocréatine met trois minutes à se reconstituer.** »

Cette formulation est trop catégorique. Une grande partie peut être restaurée bien avant trois minutes dans certaines situations ; dans d'autres, la récupération reste incomplète bien au-delà.

L'effort précédent change la signification de la récupération

Après deux minutes de récupération, Bogdanis et collaborateurs observaient environ **86 ± 3 % de PCr** après un sprint de 10 secondes contre **76 ± 3 %** après un sprint de 20 secondes [12].

Quelle durée choisir à l'entraînement ?

La question la plus utile est : « **quel degré de récupération est nécessaire pour l'objectif recherché ?** » Si l'objectif est de reproduire une très haute qualité de sprint, une récupération importante est cohérente. Si l'objectif est de répéter des efforts avant récupération complète, une récupération plus courte peut être volontairement recherchée.

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

Le deuxième, le cinquième ou le dixième sprint ne commencent pas nécessairement dans le même état que le premier. Lorsque les récupérations sont courtes, une partie seulement de la PCr utilisée a eu le temps d'être reformée.

Le chronomètre repart à zéro, pas le muscle

Dawson et collaborateurs comparaient un sprint maximal unique de six secondes à cinq sprints de six secondes démarrant toutes les trente secondes [13].

Moment de récupération	Après 1 sprint	Après 5 sprints
10 s	55 %	27 %
30 s	69 %	45 %
3 min	90 %	84 %

POUR COMPRENDRE - Le chronomètre repart à zéro, pas le muscle

Le nouveau sprint peut commencer avec moins de PCr, davantage de métabolites issus des efforts précédents, une consommation d'oxygène déjà élevée et un environnement physiologique différent.

La puissance peut diminuer progressivement

Dans l'étude de Gaitanos, dix sprints de six secondes séparés par trente secondes entraînaient une diminution progressive de performance. Au dixième sprint, la puissance moyenne représentait encore environ **73 % de celle du premier** [1].

La fatigue observée lors de sprints répétés est multifactorielle et ne doit pas être attribuée exclusivement à la PCr [35].

Le profil énergétique change

Pendant le premier sprint, PCr et glycolyse contribuaient fortement. Au dixième, la production supplémentaire de lactate musculaire était devenue très faible, indiquant une importante réduction de la contribution glycolytique [1].

IDÉE REÇUE

« Plus les sprints se répètent, plus le joueur utilise la filière lactique. »

Pas nécessairement. La contribution glycolytique peut au contraire diminuer fortement au fil d'une série [1,9].

Le métabolisme oxydatif prend davantage de place

Bogdanis et collaborateurs ont étudié deux sprints maximaux de trente secondes séparés par quatre minutes [18]. Avant le deuxième sprint, la PCr était revenue à **78,7 ± 3,3 % de sa valeur de repos**.

Le renouvellement anaérobie estimé de l'ATP diminuait de **235 ± 9 à 139 ± 7 mmol·kg⁻¹ de muscle sec** [18], tandis que la contribution oxydative augmentait.

La restauration de PCr est associée à celle de la puissance

Dans cette même étude, la récupération de PCr était fortement corrélée à la récupération de puissance (**r = 0,84**) et de vitesse de pédalage (**r = 0,91**) [18].

Ces corrélations ne démontrent pas une causalité unique, mais montrent que la disponibilité en PCr constitue un élément important de la capacité à reproduire une forte puissance.

Sprint maximal et sprints répétés ne sont pas la même qualité

La capacité à produire un sprint maximal dépend fortement de facteurs mécaniques et neuromusculaires. La capacité à répéter des sprints implique en plus la récupération entre les actions.

Une faible baisse de performance au cours d'une série doit elle-même être interprétée avec prudence, car elle peut notamment dépendre du niveau initial de performance [35].

Comment la durée de récupération modifie-t-elle la performance ?

Deux exercices peuvent comporter les mêmes sprints mais produire des contraintes très différentes si la récupération change.

Une récupération plus longue permet généralement de mieux préserver la performance

Padulo et collaborateurs ont étudié dix-sept jeunes footballeurs réalisant six sprints-navettes de 40 m avec 15, 20 ou 25 secondes de récupération [19]. Passer de 15 à 25 secondes améliorait le temps total d'environ **3 %**. La hauteur de saut mesurée après le test était également environ **7 % plus élevée** avec 25 secondes [19].

SUR LE TERRAIN

Dix secondes supplémentaires peuvent sembler minimales. Répétées entre chaque sprint, elles peuvent pourtant modifier sensiblement la qualité de la série.

Une récupération courte modifie également la contrainte métabolique

Dans la même étude, la lactatémie après l'exercice était environ **33 % plus élevée** avec quinze secondes qu'avec vingt-cinq secondes de récupération [19]. Cela montre un contexte physiologique différent ; cela ne signifie pas que le lactate provoque directement la fatigue.

Un même rapport travail-récupération ne garantit pas la même récupération

Abt et collaborateurs ont étudié 22 × 15 m, 13 × 30 m et 8 × 50 m avec un rapport sprint-récupération initial d'environ **1:10** [20]. La performance était mieux maintenue sur 15 m que sur les distances plus longues.

Distance et récupération interagissent

Little et Williams ont étudié six footballeurs professionnels avec des sprints de 15 ou 40 m et des rapports de récupération de 1:4 ou 1:6 [21]. La distance et le ratio influençaient chacun la diminution de performance.

Le mode de récupération compte également

Spencer et collaborateurs ont comparé récupération active et passive pendant six sprints de quatre secondes avec un nouveau sprint toutes les vingt-cinq secondes [22]. La diminution de puissance maximale était plus importante avec récupération active : **7,4 ± 2,2 %** contre **5,6 ± 1,8 %** avec récupération passive.

L'interaction durée × mode est importante

Ohya et collaborateurs ont étudié dix sprints maximaux de cinq secondes avec 25, 50 ou 100 secondes de récupération active ou passive [23]. La récupération passive préservait mieux la puissance avec les intervalles de 25 et 50 secondes, mais la différence disparaissait avec 100 secondes.

IDÉE REÇUE

« La récupération active est toujours meilleure parce qu'elle élimine le lactate. »

Une élimination plus rapide du lactate ne garantit pas une meilleure restauration de la capacité à sprinter.

Faut-il toujours rester immobile ?

Non. Si l'objectif est la plus grande qualité du prochain sprint, une récupération passive ou très légère peut être avantageuse lorsque l'intervalle est court. Si l'objectif est de reproduire davantage les contraintes d'une séquence de match, une récupération active peut être volontairement choisie.

L'entraînement peut-il améliorer la resynthèse de phosphocréatine ?

La vitesse de récupération de la PCr n'est pas totalement fixe. Certaines formes d'entraînement peuvent améliorer la capacité oxydative du muscle et accélérer cette resynthèse.

Une amélioration peut apparaître après quelques séances

Forbes, Slade et Meyer ont étudié sept participants physiquement actifs réalisant six séances de travail intermittent à haute intensité sur deux semaines [24]. La constante de temps de récupération passait de **43 ± 14 secondes** à **37 ± 15 secondes**, soit une diminution d'environ **14 %** [24].

L'amélioration semble liée à la capacité oxydative

Larsen, Befroy et Kent-Braun ont étudié huit hommes non entraînés réalisant eux aussi six séances comprenant des efforts maximaux de trente secondes [25]. Après six séances, la capacité oxydative musculaire estimée avait augmenté d'environ **14 %** [25].

Stock et vitesse de récupération sont deux choses différentes

Dawson et collaborateurs ont étudié neuf hommes entraînés après six semaines de travail de sprint [27]. Plusieurs performances s'amélioraient, mais les concentrations de repos en ATP et PCr ne changeaient pas significativement.

IDÉE REÇUE

« Améliorer le système phosphagène signifie forcément stocker davantage de PCr. »

Non. La quantité présente au repos et la vitesse à laquelle elle peut être restaurée sont deux caractéristiques différentes.

Les sportifs d'endurance présentent une récupération plus rapide

Yoshida, Abe et Fukuoka ont comparé des coureurs de fond à des hommes non entraînés [26].

Muscle	Coureurs de fond	Non entraînés
Fléchisseurs plantaires	17,3 ± 3,6 s	26,7 ± 6,7 s
Fléchisseurs du genou	29,7 ± 4,7 s	42,7 ± 2,8 s

PRUDENCE

Cette comparaison transversale ne démontre pas à elle seule que l'entraînement d'endurance a provoqué la différence. Les études longitudinales [24,25] apportent une démonstration plus directe de l'entraînabilité du phénomène.

Sprint et capacité aérobie ne sont donc pas opposés

Les protocoles de Forbes et Larsen reposaient eux-mêmes sur des exercices intermittents maximaux [24,25]. Un travail très intense peut donc stimuler des adaptations oxydatives.

Améliorer la PCr ne garantit pas automatiquement un meilleur sprint

La vitesse de sprint dépend également de la force, des qualités neuromusculaires, de la coordination, de la technique et des propriétés mécaniques. Une meilleure resynthèse de PCr peut être particulièrement pertinente lorsqu'il faut **répéter** les efforts.

SUR LE TERRAIN

Pour le footballeur, l'intérêt n'est pas de chercher un « exercice de resynthèse de phosphocréatine ». Il est de développer simultanément **la capacité à produire une action explosive** et **la capacité à récupérer suffisamment vite pour pouvoir la reproduire**.

Que se passe-t-il pendant un match de football ?

Un match alterne continuellement marche, courses, accélérations, décélérations, changements de direction, duels, sauts, sprints et périodes de récupération active.

La PCr ne suit donc probablement pas une diminution progressive du début à la fin du match. Elle connaît plutôt des cycles répétés : **déplétion** → **resynthèse** → **nouvelle déplétion**.

Mesurer la PCr pendant un match est difficile

Il est impossible de réaliser une biopsie pendant qu'un joueur sprinte. Les prélèvements sont donc réalisés après une période de jeu. Or la PCr commence déjà à se resynthétiser lorsque l'intensité diminue.

PRUDENCE - Une biopsie est une photographie prise après l'action

Une concentration mesurée après une séquence intense peut être supérieure à la concentration minimale atteinte pendant les actions elles-mêmes. Les valeurs de match doivent donc être interprétées avec cette limite.

Les études de match confirment néanmoins sa mobilisation

Krustrup et collaborateurs ont étudié trente et un joueurs danois au cours de matchs amicaux [28]. Des biopsies étaient réalisées avant, après et après certaines périodes particulièrement intenses. La capacité de sprints répétés diminuait temporairement après certaines séquences et après la rencontre [28].

Des données existent également chez des joueuses élite

Krustrup et collaborateurs ont étudié vingt joueuses de niveau élite [29]. Après une période intense de première mi-temps, la PCr était réduite d'environ **16 %**. Après une période intense de deuxième mi-temps : **12 %** [29].

POUR COMPRENDRE

Une diminution de 12 ou 16 % mesurée après une période intense ne signifie pas que la PCr n'a diminué que de cette valeur pendant les actions. Une partie peut déjà avoir été resynthétisée avant le prélèvement.

Une séquence très intense peut provoquer une diminution beaucoup plus importante

Vigh-Larsen et collaborateurs ont étudié onze footballeurs bien entraînés pendant un protocole simulant un match avec deux périodes de cinq minutes de très haute intensité [30]. Après ces périodes, la PCr diminuait d'environ **50 %** alors que l'ATP diminuait d'environ **4 %**. Les performances sur 10 m diminuaient parallèlement d'environ **10 %** [30].

Le 5 contre 5 fournit une autre observation directe

Randers et collaborateurs ont étudié dix joueuses entraînées pendant une rencontre de football à cinq organisée en quatre périodes de douze minutes [31]. Dans les biopsies considérées comme post-SSG par les auteurs, **la créatine phosphate musculaire était diminuée d'environ 22 % par rapport à la valeur pré-exercice, tandis que l'ATP musculaire restait globalement inchangé** [31].

PRUDENCE

Les prélèvements post-SSG étaient réalisés de manière échelonnée pendant les dernières minutes du protocole et nécessitaient le déplacement des joueuses jusqu'à la salle de biopsie. Comme la PCr commence rapidement à se resynthétiser lorsque l'intensité diminue, ces mesures ne correspondent pas nécessairement à la concentration minimale atteinte pendant les actions les plus intenses [31].

Il n'existe pas « un niveau de PCr pendant le match »

Deux sprints identiques peuvent commencer dans des états différents selon ce qui les a précédés et le temps de récupération disponible. La distance et la vitesse observées ne suffisent donc pas à connaître la PCr disponible.

La fatigue de fin de match n'est pas un « épuisement de PCr »

La fatigue du football implique notamment les réserves de glycogène, les perturbations neuromusculaires, les contraintes mécaniques, les équilibres ioniques, la thermorégulation, des facteurs centraux et d'autres processus [28-31] [35].

IDÉE REÇUE

« **Plus le match avance, plus la PCr baisse jusqu'à être vide à la 90e minute.** »

Ce n'est pas le modèle le plus fidèle. La PCr est continuellement utilisée puis restaurée au gré des séquences de jeu.

Les périodes calmes participent à la préparation des actions suivantes

Marcher ou courir lentement ne signifie pas que la récupération s'arrête. Le métabolisme oxydatif continue, la PCr peut être resynthétisée et différents équilibres cellulaires sont progressivement restaurés.

SUR LE TERRAIN

La capacité d'un joueur à produire une nouvelle accélération dépend également de **ce qui s'est passé avant elle**. Dans un sport intermittent, produire et récupérer constituent deux dimensions du même problème de performance.

Comment utiliser ces connaissances pour construire les exercices de sprint ?

La physiologie de la PCr ne fournit pas une recette universelle du type : **6 secondes d'effort + 3 minutes de récupération**. Elle fournit surtout un cadre permettant de comprendre comment la durée, l'intensité, la récupération, le volume et la forme de l'exercice modifient la contrainte réellement produite.

La première question est l'objectif de l'exercice

Avant de choisir la récupération, il faut déterminer ce que l'on souhaite réellement entraîner : accélération maximale, vitesse maximale, répétition de sprints ou actions intenses réalisées avec récupération incomplète.

POUR COMPRENDRE - Partir de l'objectif

Au lieu de : « **je veux travailler l'anaérobie alactique** », il est plus utile de formuler : « **je veux que mes joueurs reproduisent des accélérations maximales de très haute qualité** ».

Pour travailler la qualité maximale, il faut protéger la qualité du sprint

Si la priorité est la vitesse ou l'accélération maximale, la récupération doit être suffisamment importante pour permettre au joueur de reproduire une forte performance. La relation entre récupération de PCr et récupération de puissance [18] ainsi que les études manipulant la récupération [19-21] soutiennent ce principe.

La performance réellement produite peut guider la séance

Sur le terrain, l'éducateur ne mesure pas la PCr. Il peut cependant mesurer le temps ou la vitesse réellement atteinte. Si les performances diminuent fortement alors que l'objectif est la vitesse maximale, la nature de l'exercice a changé.

PRUDENCE

Une perte de vitesse n'est pas un « test de PCr ». Elle peut avoir de nombreuses causes. Elle renseigne néanmoins directement sur la qualité de performance que l'on cherchait à reproduire.

Une récupération courte construit volontairement un autre exercice

Iaia et collaborateurs ont comparé pendant cinq semaines chez de jeunes footballeurs six sprints de 30 m séparés soit par **15 secondes**, soit par **30 secondes** de récupération [32]. Les deux programmes amélioraient différentes performances, mais leur profil d'adaptation n'était pas parfaitement identique.

Durée et distance doivent correspondre à l'objectif

Un sprint de trois secondes et un effort maximal de trente secondes ne doivent pas être regroupés simplement parce qu'ils sont tous les deux réalisés « à fond ». De même, 10 m départ arrêté et 30 m lancés ne sollicitent pas la même qualité mécanique.

Les séries peuvent servir à contrôler la fatigue

Une étude récente de Fernández-Penedo et collaborateurs chez des U16 a comparé différentes structures de séries avec un volume total comparable [33]. Les deux organisations amélioraient plusieurs performances sans différence significative claire entre groupes.

Pour un travail de très haute qualité, fractionner le volume peut néanmoins permettre de mieux contrôler la dégradation de la performance.

Davantage de fatigue ne signifie pas automatiquement davantage d'efficacité

Raccourcir la récupération rend facilement l'exercice plus difficile. Mais **plus difficile** ne signifie pas nécessairement **plus adapté à l'objectif**.

IDÉE REÇUE

« Moins je laisse récupérer, plus je travaille efficacement les sprints répétés. »

Pas nécessairement. L'objectif n'est pas de produire le maximum de fatigue, mais **la contrainte adaptée à la qualité recherchée**.

Et les changements de direction ?

Ajouter un changement de direction modifie simultanément la vitesse atteinte, l'accélération, la décélération, les forces mécaniques et la durée de l'effort.

Dans une étude de Beato et collaborateurs, des joueurs ont suivi pendant deux semaines soit un entraînement de sprints linéaires, soit un entraînement comportant un demi-tour à 180° [34].

Les deux modalités différaient toutefois également par la distance totale de chaque répétition : 30 m en ligne droite contre 20 + 20 m dans la condition avec changement de direction. L'étude ne permet donc pas d'isoler expérimentalement le seul effet du demi-tour.

Les résultats illustrent néanmoins un principe important : modifier la géométrie d'un sprint modifie simultanément la vitesse atteignable, les accélérations et décélérations ainsi que les contraintes mécaniques de la tâche [34].

PRUDENCE

Un sprint linéaire et une navette couvrant une distance totale comparable ne constituent pas deux exercices physiologiquement et mécaniquement équivalents.

Le ballon modifie encore la tâche

Ajouter une conduite, une passe, un duel, une finition ou une prise d'information peut améliorer certaines dimensions de spécificité, mais peut aussi modifier la vitesse réellement produite. Un exercice avec ballon n'est donc pas automatiquement « meilleur » : il correspond à un objectif différent.

Trois grandes familles pratiques

Objectif dominant	Organisation générale	Récupération
Sprint de très haute qualité	Efforts très courts, volume maîtrisé	Importante
Sprints répétés	Efforts très courts répétés	Volontairement incomplète
Séquence spécifique football	Sprints, freinages, COD, éventuellement ballon	Variable et souvent active

Cette classification est une **proposition pratique issue de la synthèse**, et non une nomenclature physiologique universelle.

Un exercice ne doit pas être nommé d'après une molécule

Les expressions « exercice ATP-PCr », « séance phosphocréatine » ou « travail 100 % alactique » peuvent laisser croire qu'un système peut être isolé. Il est plus précis de décrire des **sprints maximaux avec récupération importante** ou des **sprints répétés avec récupération courte**.

SUR LE TERRAIN

Avant un exercice de sprint, l'éducateur peut se demander : Quelle qualité mécanique est recherchée ? Quelle baisse de performance est acceptable ? Quel degré de récupération est souhaité ? Quel volume peut être réalisé sans transformer involontairement l'exercice ? Ce que les joueurs produisent réellement correspond-il encore à l'objectif ?

L'objectif n'est donc pas de « vider la phosphocréatine ». Il est de construire la relation **effort - récupération - répétition** qui correspond réellement à la qualité que l'on souhaite entraîner.

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

La place de la PCr dans les efforts explosifs est solidement documentée. Mais ces connaissances perdent rapidement en précision lorsqu'elles sont transformées en règles telles que : « la PCr dure six secondes », « un sprint est 100 % alactique » ou « trois minutes = récupération complète ».

La PCr répond très rapidement à une forte demande en ATP

Lorsque la demande énergétique augmente brutalement, la PCr peut transférer rapidement son groupement phosphate à l'ADP grâce à la créatine kinase. Les études humaines montrent une forte diminution de PCr alors que l'ATP est beaucoup mieux préservé [1-5].

Mais elle ne remplace jamais l'ATP

Il est incorrect de présenter ATP puis PCr comme deux carburants successifs. L'ATP reste directement utilisé par les ATPases cellulaires. La PCr contribue à **le resynthétiser**.

Les systèmes ne fonctionnent pas successivement

Les premières secondes ne sont pas exclusivement phosphagènes. La glycolyse intervient rapidement [1,9] et le métabolisme oxydatif commence lui aussi à augmenter [10].

IDÉE REÇUE

« Les six premières secondes sont 100 % alactiques. »

Les données disponibles ne soutiennent pas cette affirmation. Il est plus juste de parler d'une **forte contribution phosphagène**.

Il n'existe pas une durée fixe de fonctionnement de la PCr

La PCr peut diminuer de plus de la moitié en six à neuf secondes [1,2], mais elle peut rester mesurable même après trente secondes [2,3].

Forte déplétion ne signifie pas nécessairement épuisement complet

Le terme « réserve vide » doit être utilisé avec prudence. Il vaut mieux parler de déplétion ou de diminution de disponibilité.

La fatigue n'a pas une cause unique

La PCr est importante pour soutenir une forte puissance. Mais la fatigue lors de sprints isolés ou répétés implique de nombreux mécanismes [35].

La PCr commence rapidement à se reconstituer

Après un sprint de six secondes, Dawson et collaborateurs retrouvaient déjà **55 % de la valeur pré-exercice après dix secondes** et **69 % après trente secondes** [13].

Trois minutes ne représentent pas une loi

Après certains efforts courts, une grande partie de la PCr peut être revenue après trois minutes [13]. Après un effort maximal plus prolongé, la récupération peut rester incomplète après six minutes [3]. La méta-analyse de Singh et collaborateurs confirme une importante variabilité [17].

La récupération dépend fortement du métabolisme oxydatif

La réaction CK ne consomme pas directement d'oxygène dans le sens PCr → ATP. Mais la restauration de la PCr nécessite de l'ATP fourni principalement par la phosphorylation oxydative [14-16].

Nécessaire ne signifie pas toujours limitant

L'oxygène est indispensable au métabolisme oxydatif, mais davantage d'oxygène ne signifie pas systématiquement une récupération plus rapide dans toutes les conditions [15,16].

Les sprints successifs ne sont pas métaboliquement identiques

Au fil des répétitions, la PCr disponible évolue, la glycolyse peut contribuer moins, le métabolisme oxydatif peut prendre davantage de place et la fatigue neuromusculaire peut progresser [1,18,35].

La récupération n'est pas un temps neutre

Changer la récupération revient à changer l'exercice [19-23]. Mais aucun rapport tel que 1:5, 1:10 ou 1:20 ne garantit un pourcentage universel de PCr restaurée.

La capacité à restaurer la PCr est entraînable

Des interventions à haute intensité ont amélioré la récupération de PCr et/ou la capacité oxydative musculaire [24,25]. Cela ne signifie pas nécessairement que la quantité de PCr au repos augmente [27].

Le football confirme la mobilisation de PCr

Les études directement réalisées dans des contextes de football montrent une diminution de PCr après certaines périodes intenses [28-31]. Mais les biopsies ne permettent pas de suivre sa concentration seconde par seconde.

Le GPS ne donne pas la concentration de PCr

Distance, vitesse et récupération permettent de caractériser une partie de la charge externe. Ils ne permettent pas de convertir directement une séquence de course en pourcentage précis de PCr restante.

Le message principal est finalement simple

La phosphocréatine n'est ni la seule source d'énergie du sprint, ni une batterie fonctionnant exactement six secondes. Elle constitue une réserve rapidement mobilisable permettant de contribuer fortement au maintien de l'ATP lorsque la demande augmente brutalement.

Puis, lorsque l'intensité diminue, elle est progressivement restaurée grâce principalement à l'ATP fourni par le métabolisme oxydatif.

produire → récupérer → reproduire

La physiologie ne fournit donc pas un chronomètre universel. Elle fournit un cadre permettant de mieux comprendre et construire la relation entre **effort, récupération et répétition**.

À retenir

- **La phosphocréatine permet de resynthétiser très rapidement l'ATP** lorsque la demande énergétique augmente brutalement. Elle joue donc un rôle majeur lors des accélérations, sprints, sauts et autres efforts explosifs.
- **Elle est mobilisée dès les premières secondes**, mais elle n'agit jamais seule. La glycolyse et le métabolisme oxydatif contribuent eux aussi à la resynthèse de l'ATP dès le début de l'effort.
- **Un sprint très court n'est donc pas « 100 % alactique »**. Il est plus juste de parler d'une forte contribution du système phosphagène que d'une filière énergétique exclusive.
- **Les réserves de PCr peuvent diminuer très rapidement**, parfois de plus de la moitié en quelques secondes d'exercice maximal [1,2]. Mais elles ne deviennent pas nécessairement nulles.
- **La baisse de puissance ne dépend pas uniquement de la PCr**. La fatigue résulte de plusieurs phénomènes métaboliques, ioniques, contractiles et neuromusculaires [35].
- **La PCr commence à être resynthétisée dès que l'intensité diminue**. Cette récupération dépend fortement de l'ATP produit par le métabolisme oxydatif [14-16].
- **Il n'existe pas un temps universel de récupération complète**. Trois minutes peuvent permettre une restauration importante après certains efforts courts, mais la récupération dépend de nombreux facteurs [2,3,13,17].
- **Lorsque les sprints se répètent, le contexte énergétique change**. Le sprint suivant peut commencer avec une PCr encore partiellement restaurée et des contributions énergétiques différentes [1,13,18].
- **Pour l'entraîneur, la récupération est une véritable variable de programmation**. L'objectif n'est pas de « vider la phosphocréatine », mais de construire la relation entre **effort, récupération et répétition** correspondant à la qualité recherchée.

À propos de cette revue

Méthode

Cette revue est une **synthèse structurée de la littérature scientifique**. Elle ne constitue pas une revue systématique au sens méthodologique du terme.

La recherche bibliographique a privilégié les études expérimentales réalisées chez l'être humain, les travaux mesurant directement la PCr par biopsie ou 31P-MRS, les études portant sur les sprints et efforts intermittents, les travaux réalisés chez des footballeurs lorsque des données spécifiques étaient disponibles, ainsi que les revues utiles pour replacer ces résultats dans leur contexte.

Les articles historiques ont été conservés lorsqu'ils apportaient une démonstration physiologique fondamentale toujours pertinente.

Dernière recherche bibliographique : 10 août 2026.

Interprétation des données

Une attention particulière a été portée à la distinction entre **ce qui a été directement mesuré, l'interprétation physiologique proposée et les conséquences pratiques raisonnables pour l'entraînement**.

Les résultats obtenus lors d'un sprint sur ergocycle, d'une contraction musculaire isolée ou d'un exercice dans un appareil de 31P-MRS ne sont donc pas considérés comme directement équivalents à une action réalisée pendant un match de football.

Limites de cette revue

La PCr est difficile à mesurer pendant des mouvements sportifs réalisés librement sur le terrain. Une grande partie des connaissances disponibles provient de protocoles de laboratoire utilisant l'ergocycle, des contractions localisées, la course sur tapis, des biopsies ou la 31P-MRS.

Les biopsies réalisées après une période de jeu présentent une limite importante : **la resynthèse de PCr commence rapidement dès que l'intensité diminue**. Une concentration mesurée quelques secondes après une action intense peut donc être supérieure à la valeur minimale réellement atteinte.

Les études utilisent par ailleurs des muscles, durées, intensités, niveaux d'entraînement et méthodes de mesure différents, souvent avec de petits effectifs. Les valeurs numériques ne doivent donc pas être transformées en règles universelles.

Enfin, la performance en sprint et la fatigue ne dépendent jamais de la seule PCr. Les mécanismes énergétiques, neuromusculaires, contractiles et mécaniques interagissent en permanence [35].

Références scientifiques

1. 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
2. Walter G, Vandenborne K, McCully KK, Leigh JS. Noninvasive measurement of phosphocreatine recovery kinetics in single human muscles. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*. 1997;272(2 Pt 1):C525-C534. DOI · PubMed
3. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HKA, Nevill AM. Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. *The Journal of Physiology*. 1995;482(Pt 2):467-480. DOI · PubMed · Texte intégral
4. Greenhaff PL, Nevill ME, Söderlund K, Bodin K, Boobis LH, Williams C, Hultman E. The metabolic responses of human type I and II muscle fibres during maximal treadmill sprinting. *The Journal of Physiology*. 1994;478(Pt 1):149-155. DOI · PubMed · Texte intégral
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. Goudemant JF, Francaux M, Mottet I, Demeure R, Sibomana M, Sturbois X. 31P NMR saturation transfer study of the creatine kinase reaction in human skeletal muscle at rest and during exercise. *Magnetic Resonance in Medicine*. 1997;37(5):744-753. DOI · PubMed
7. Wallimann T, Schlösser T, Eppenberger HM. Function of M-line-bound creatine kinase as intramyofibrillar ATP regenerator at the receiving end of the phosphorylcreatine shuttle in muscle. *Journal of Biological Chemistry*. 1984;259(8):5238-5246. DOI · PubMed · Texte intégral
8. Gabr RE, El-Sharkawy AMM, Schär M, Weiss RG, Bottomley PA. High-energy phosphate transfer in human muscle: diffusion of phosphocreatine. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*. 2011;301(1):C234-C241. DOI · PubMed · Texte intégral
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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
13. Dawson B, Goodman C, Lawrence S, Preen D, Polglaze T, Fitzsimons M, Fournier P. Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 1997;7(4):206-213. DOI · PubMed
14. Sahlin K, Harris RC, Hultman E. Resynthesis of creatine phosphate in human muscle after exercise in relation to intramuscular pH and availability of oxygen. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*. 1979;39(6):551-558. DOI · PubMed
15. 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
16. Haseler LJ, Lin A, Hoff J, Richardson RS. Oxygen availability and PCr recovery rate in untrained human calf muscle: evidence of metabolic limitation in normoxia. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2007;293(5):R2046-R2051. DOI · PubMed
17. Singh M, Jhajharia A, Pruthi R, Carmichael OT. 31P-MRS-Measured Phosphocreatine Recovery Kinetics in Human Muscles in Health and Disease - A Systematic Review and Meta-Analysis. *NMR in Biomedicine*. 2025;38(5):e70023. DOI · PubMed · Texte intégral
18. 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
19. Padulo J, Tabben M, Ardigo LP, Ionel M, Popa C, Gevat C, Zagatto AM, Dello Iacono A. Repeated sprint ability related to recovery time in young soccer players. *Research in Sports Medicine*. 2015;23(4):412-423. DOI · PubMed
20. Abt G, Siegler JC, Akubat I, Castagna C. The effects of a constant sprint-to-rest ratio and recovery mode on repeated sprint performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2011;25(6):1695-1702. DOI · PubMed

-
21. Little T, Williams AG. Effects of sprint duration and exercise: rest ratio on repeated sprint performance and physiological responses in professional soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2007;21(2):646-648. DOI · PubMed
22. Spencer M, Bishop D, Dawson B, Goodman C, Duffield R. Metabolism and performance in repeated cycle sprints: active versus passive recovery. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2006;38(8):1492-1499. DOI · PubMed
23. Ohya T, Aramaki Y, Kitagawa K. Effect of duration of active or passive recovery on performance and muscle oxygenation during intermittent sprint cycling exercise. *International Journal of Sports Medicine*. 2013;34(7):616-622. DOI · PubMed
24. Forbes SC, Slade JM, Meyer RA. Short-term high-intensity interval training improves phosphocreatine recovery kinetics following moderate-intensity exercise in humans. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2008;33(6):1124-1131. DOI · PubMed
25. Larsen RG, Befroy DE, Kent-Braun JA. High-intensity interval training increases in vivo oxidative capacity with no effect on Pi → ATP rate in resting human muscle. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2013;304(5):R333-R342. DOI · PubMed · Texte intégral
26. Yoshida T, Abe D, Fukuoka Y. Phosphocreatine resynthesis during recovery in different muscles of the exercising leg by 31P-MRS. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2013;23(5):e313-e319. DOI · PubMed
27. Dawson B, Fitzsimons M, Green S, Goodman C, Carey M, Cole K. Changes in performance, muscle metabolites, enzymes and fibre types after short sprint training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1998;78(2):163-169. DOI · PubMed
28. 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
29. Krstrup P, Mohr M, Nybo L, Draganidis D, Randers MB, Ermidis G, Ørntoft C, Røddik L, Batsilas D, Poullos A, Ørtenblad N, Loules G, Deli CK, Batrakoulis A, Nielsen JL, Jamurtas AZ, Fatouros IG. Muscle metabolism and impaired sprint performance in an elite women's football game. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2022;32(Suppl 1):27-38. DOI · Texte intégral
30. Vigh-Larsen JF, Ørtenblad N, Stoltz V, Fransson D, Yousefian F, Panduro J, Randers MB, Ehlers TS, Krstrup P, Mohr M. Muscle Metabolism and Performance During Simulated Peak-Intensity Periods Occurring Early and Late in a Soccer-Specific Exercise Protocol in Well-Trained Male Players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2025;35(5):e70075. DOI · PubMed · Texte intégral
31. Randers MB, Panduro J, Ermidis G, Vigh-Larsen JF, Yousefian F, Sogaard K, Krstrup P, Mohr M. Muscle metabolic responses to a 5v5 football game in trained female football players. *European Journal of Applied Physiology*. 2026;126(3):1845-1855. DOI · PubMed · Texte intégral
32. Iaia FM, Fiorenza M, Larghi L, Alberti G, Millet GP, Girard O. Short- or long-rest intervals during repeated-sprint training in soccer? *PLoS ONE*. 2017;12(2):e0171462. DOI · PubMed · Texte intégral
33. Fernández-Penedo D, Padrón-Cabo A, Costa PB, Rey E. Effects of Repeated-Sprint Training Set Structure on Sprint Performance, Force-Velocity Profile, and Repeated-Sprint Ability in Youth Soccer Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2026. Online ahead of print. DOI · PubMed
34. Beato M, Coratella G, Bianchi M, Costa E, Merlini M. Short-Term Repeated-Sprint Training (Straight Sprint Vs. Changes of Direction) in Soccer Players. *Journal of Human Kinetics*. 2019;70:183-190. DOI · PubMed · Texte intégral
35. Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Medicine*. 2011;41(8):673-694. DOI · PubMed