

Dans ce chapitre :

Production d'énergie pour la contraction musculaire 96

Les trois systèmes énergétiques 97

Énergie immédiate : le système du phosphate à haute énergie 99

Énergie à court terme : le système d'acide lactique 100

Énergie à long terme : le système d'oxygène 103

Sommaire 106





Énergie et activité musculaire

Après avoir terminé ce chapitre, vous devriez pouvoir :

- utiliser et comprendre la terminologie de base du métabolisme humain associée à l'exercice sportif ;
- décrire les processus chimiques de base utilisés par le corps humain pour produire de l'énergie dans le muscle ;
- démontrer et comprendre les trois systèmes énergétiques du corps humain et leur contribution lors de la contraction musculaire ;
- comprendre les effets de l'entraînement et de l'exercice sur les systèmes énergétiques.

L'être humain peut accomplir des exploits physiques étonnants. Les sprinteurs dévalent la piste avec une vitesse et une puissance impressionnante ; les haltérophiles soulèvent, apparemment sans effort, des charges de plusieurs centaines de kilogrammes ; les nageurs traversent un lac entier en défiant les lois de la nature ; les coureurs de haies évitent tous les obstacles placés sur la piste et les joueurs de basket-ball semblent défier les lois de la gravité dans leurs sauts vers le panier. Une combinaison d'habiletés physiques et d'entraînement est requise pour accomplir tous ces exploits. Néanmoins, ces habiletés sont, dans chaque cas, caractérisées par les patrons d'activation musculaire décrits précédemment et le taux de développement de l'énergie musculaire ; le tout en quantité suffisante afin de satisfaire les demandes de l'activité.

Les demandes énergétiques des sports d'endurance, dont l'intensité est relativement faible, diffèrent de celles des sports nécessitant un rendement de puissance à une intensité élevée. Afin de planifier efficacement les programmes d'entraînement, les entraîneurs doivent connaître les demandes énergétiques de leur sport.

Un mouvement est généré durant la contraction musculaire grâce à la traction du muscle sur l'os, par le biais de l'attache tendineuse. De plus, toute contraction musculaire requiert l'utilisation d'une quantité d'énergie significative. Tout comme la voiture qui consomme une certaine quantité d'essence pour fonctionner efficacement, le muscle squelettique a besoin d'énergie pour atteindre une performance maximale. Toutefois, en fonction de l'activité pratiquée, l'organisme utilisera différents systèmes énergétiques afin de fournir le niveau et la quantité d'énergie nécessaire à cette activité. Ainsi, l'organisme produira de l'énergie à un rythme plus élevé (sur une durée plus courte) durant une activité demandant une puissance élevée et plus d'énergie mais à un rythme plus lent lors d'une activité d'endurance.

Quelles sont les principales sources d'énergie du corps humain ? Quels carburants utilisons-nous ? Pourquoi les muscles produisent-ils de l'énergie différemment selon les circonstances ? Ce sont quelques-unes des nombreuses questions

auxquelles nous répondrons dans ce chapitre. Nous explorerons aussi certaines méthodes d'évaluation et de quantification de la production d'énergie ainsi que les processus d'adaptation du corps humain à l'exercice.

Production d'énergie pour la contraction musculaire

L'énergie utilisée par le corps humain provient de la dégradation de trois nutriments complexes : les glucides, les lipides et les protéines. Le résultat de la dégradation de ces nutriments fournit la production d'une quantité de molécules **adénosine-triphosphate (ATP)** ; le transporteur d'énergie du corps humain. La molécule d'ATP procure l'énergie indispensable à la réalisation des processus biochimiques du corps humain, tels que la contraction musculaire ou la digestion. La capacité à accomplir le travail musculaire dépend d'un apport suffisant d'énergie et du rythme de production durant la durée de l'activité.

L'énergie utilisée pour générer une contraction musculaire est libérée lorsque les liaisons chimiques entre la molécule d'ATP et son groupement phosphate sont rompues par voie d'**hydrolyse**, selon la série de réactions chimiques suivantes :



La dégradation de l'ATP en **adénosine-diphosphate (ADP)** et un **groupement phosphate libre (P_i)** libèrent de l'énergie pour l'activité contractile, par la formation de complexes actine-myosine dans le muscle squelettique (voir chapitre 3, La structure et les fonctions des muscles). La quantité d'énergie libérée est d'environ 38-42 kilojoules (kJ) ou 9-10 kilocalories (kcal) par mole d'ATP (note : une **kilocalorie** représente la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température de 1,000 gramme d'eau de 1 degré Celsius).

Lors de l'activité physique, le corps humain a besoin d'un approvisionnement continu en ATP. Les



réserves musculaires d'ATP étant relativement petites, elles permettent de répondre aux besoins énergétiques initiaux lors de l'activité musculaire mais elles s'épuisent très rapidement. Ainsi, lorsque l'activité physique se prolonge, les réserves en ATP doivent être régénérées. L'ATP est une ressource énergétique renouvelable qui peut être régénérée par la recombinaison d'une molécule d'ADP avec un groupement phosphate. Le processus métabolique qui permet la recombinaison de l'ADP et du groupement phosphate (P_i) pour la formation de l'ATP se nomme la **resynthèse de l'ATP**. Cette réaction chimique peut se produire à une vitesse très élevée dans l'organisme. La resynthèse de l'ATP se définit par la série de réactions chimiques suivantes :



La régénération de l'ATP nécessite toutefois une addition d'énergie qui est obtenue par la dégradation des nutriments complexes, comme les glucides et les lipides.

Les trois systèmes énergétiques

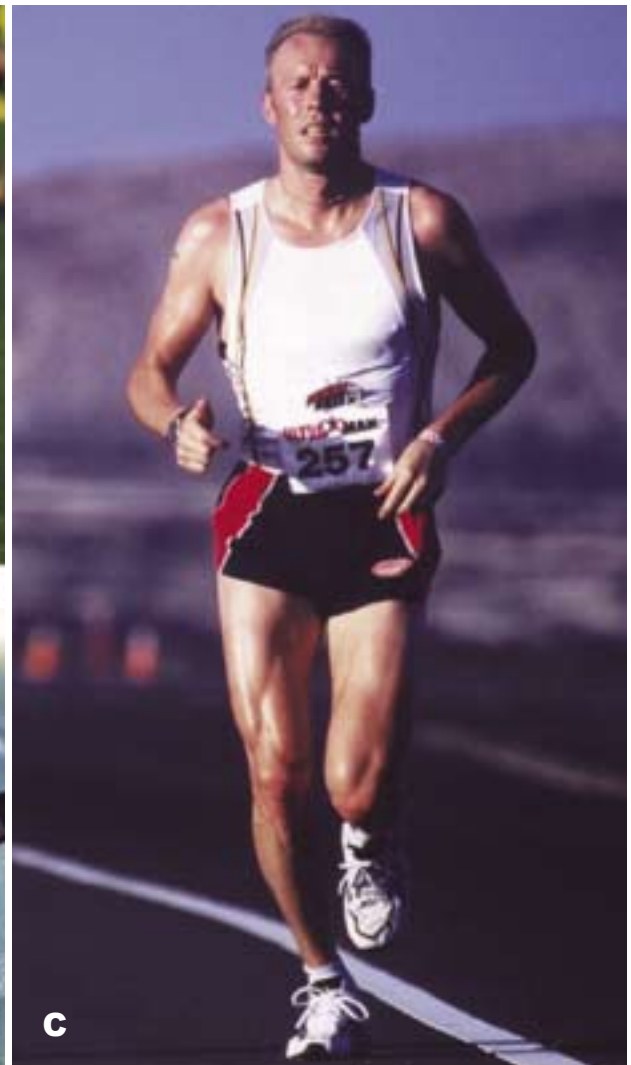
La production de la molécule d'ATP implique



A



B



C

Figure 5.1 **A.** Activité du système immédiat de production d'énergie. **B.** Activité du système de production d'énergie à court terme. **C.** Activité du système de production d'énergie à long terme.

Tableau 5.1 Le rôle des trois systèmes énergétiques dans les sports de compétition.

Type d'énergie	Voie anaérobie				Voie aérobie					
Source énergétique première	ATP produite sans la présence d'O ₂				ATP produite avec la présence d'O ₂					
Système énergétique	Alactique, immédiat		Lactique, court terme		Oxygène, long terme					
Nutriments	ATP, CP		Glycogène, glucose		Glycogène, glucose, lipides, protéines					
Durée	0 s	10 s	40 s	70 s	2 min	6 min	25 min	1 h	2 h	3 h
Événement sportif	Sprint (100 m)	Piste (200-400 m)		Natation (100 m)	Piste (distance moyenne), natation, patinage de vitesse		Piste (longue distance), natation, patinage artistique, canoë			
	Lancer	Patinage de vitesse (500 m)		Piste (800 m)	Canoë (1000 m)		Cyclisme, course sur route			
	Saut	Gymnastique (exercices divers)		Gymnastique (exercices au sol)	Boxe		Cyclisme, course sur route			
	Haltérophilie	Ski alpin		Ski alpin	Lutte		Cyclisme, course sur route			
	Saut à ski	Cyclisme, piste		Cyclisme, Piste (1000 m et poursuite)	Aviron		Triathlon			
	Plongée	Natation (50 m)			Patinage artistique					
	Gymnastique (saut à la perche)				Natation synchronisée					
	La plupart des sports d'équipe/sports de raquette/voile									

l'activation de trois systèmes énergétiques, chacun d'entre eux permettant de produire l'ATP à un taux différent pour une durée maximale donnée : (1) le système de production immédiat ou système du phosphate à haute énergie (système anaérobie alactique) ; (2) le système de production à court terme ou la glycolyse anaérobie (système anaérobie lactique) ; et (3) le système de production lent, aussi appelé système d'oxygène (système aérobie) (figure 5.1). Le tableau 5.1 présente le rôle principal des trois systèmes énergétiques dans les sports de compétition.

Chacun des trois systèmes énergétiques est classé **aérobie** ou **anaérobie**, selon

l'utilisation de l'oxygène par le système dans la production d'énergie. L'oxygène n'est pas utilisé par le **système du phosphate à haute énergie** et par le système **glycolytique**, cependant le système de la **phosphorylation oxydative** dépend de l'oxygène pour la production d'énergie. De façon similaire, les deux systèmes anaérobiques peuvent être définis par la présence ou l'absence d'acide lactique durant la production d'énergie. Avec le système glycolytique, une quantité d'acide lactique est produite (d'où le terme **anaérobie lactique**), alors que l'acide lactique n'est pas produit par le système du phosphate à haute énergie (de là le terme **anaérobie alactique**).



Énergie immédiate : le système du phosphate à haute énergie

Parmi les **sports de puissance** nous comptons plusieurs activités sportives telles que l'haltérophilie, le saut en hauteur, le saut en longueur, le 100 mètres-sprint ou le 25 mètres-sprint à la nage. La pratique de ces activités requiert une très grande production d'énergie par unité de temps. De plus, le travail musculaire est réalisé dans un intervalle de temps limité. Le principal système d'énergie utilisé, lors de la pratique de ces activités, est le système **immédiat** ou système du phosphate à haute énergie. Dans cette situation, la créatine phosphate (CP), un autre composé cellulaire à haut rendement énergétique, se rompt pour la production des complexes chimiques phosphate et créatine. Le phosphate libre peut alors se combiner avec l'ADP et resynthétiser de l'ATP (figure 5.2). Or, la quantité d'ATP et de CP emmagasiné dans chaque fibre musculaire est très faible. Puisque ce système possède un taux de production d'énergie élevé, il peut seulement en procurer aux muscles pendant une période de 7 à 12 secondes, pour un sport nécessitant un effort musculaire de haute intensité.

Ce système est aussi nommé anaérobie alactique ou système ATP-CP.

Caractéristiques du système anaérobie alactique

Le système anaérobie alactique présente les caractéristiques suivantes : (1) il peut produire une très grande quantité d'énergie sur une courte durée et (2) son taux de récupération est relativement rapide. Le système peut procurer de l'énergie jusqu'à l'épuisement des réserves intramusculaires d'ATP, et, par la suite, aussi longtemps que les réserves locales de créatine phosphate seront suffisantes pour resynthétiser l'ATP à partir de l'ADP. Toutefois, les réserves musculaires d'ATP sont très limitées et s'épuisent après seulement quelques secondes de travail à haute intensité. Les réserves de créatine phosphate musculaire étant aussi restreintes, elles sont épuisées rapidement lors de la réalisation d'un travail musculaire intensif.

La concentration initiale de créatine phosphate dans le muscle influe sur la capacité d'un individu à accomplir un travail intensif de courte durée. Si un athlète doit prolonger son activité très intensive au-delà de 7 à 12 secondes, ou effectuer un travail d'intensité modérée de 15 à 30 secondes, le système de phosphate à haute énergie ne sera pas en mesure de procurer toute l'énergie nécessaire à cette activité. Pour cette raison, un sprinteur de 100 mètres perd fréquemment de la vitesse après seulement 80 mètres de course, car les réserves de phosphate à haute énergie sont épuisées. L'organisme utilise alors une

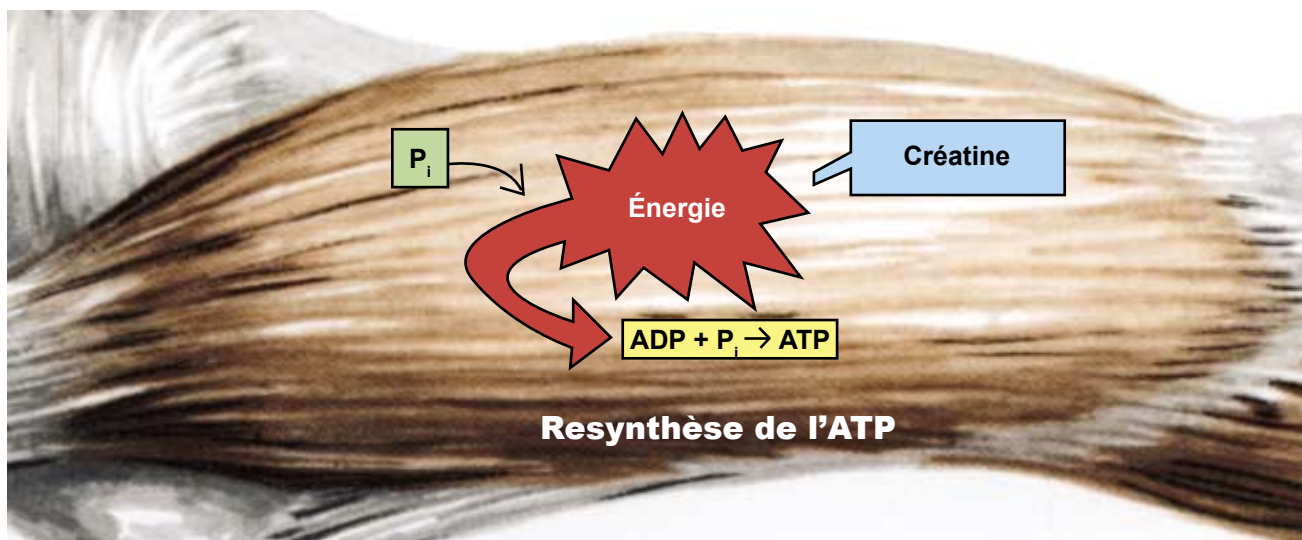


Figure 5.2 Le système d'énergie immédiat (alactique).

autre source d'énergie ; le système à court terme ou la source d'énergie du glycogène (tableau 5.1 et figure 5.3).

De façon similaire, lors d'un entraînement en musculation, les séries de courte durée (trois séries d'une durée de 30 secondes) en force maximale et un entraînement de la puissance dépendent des réserves d'ATP et de CP comme source principale d'énergie.

Énergie à court terme : le système d'acide lactique

Ce deuxième système d'énergie permet de produire de l'ATP aux dépens de la production d'acide lactique, un déchet métabolique indésirable. Ce processus se nomme la **glycolyse anaérobie**. Il implique la dégradation du glycogène (glucides emmagasinés dans le muscle) en acide pyruvique et en ATP (figure 5.3).

Le système d'acide lactique libère de l'énergie sous forme d'ATP par la dégradation des carburants glucidiques tels le glycogène et le glucose. Ce processus biochimique complexe de dégradation est appelé la glycolyse anaérobie. Lors de la glycolyse, chaque étape de dégradation (un total de 10 étapes, figure 5.4) implique l'action spécifique d'une **enzyme** dans la rupture des liaisons chimiques du glycogène ou du glucose sanguin sans utilisation de l'oxygène (référence au terme *anaérobie*). Le produit final de

dégradation se nomme le **pyruvate**. Lorsque le taux de travail est élevé, le pyruvate est alors transformé en **acide lactique**. Durant l'exercice, l'intensité qui déclenche l'augmentation de la concentration sanguine d'acide lactique s'appelle le **seuil anaérobie**. Le seuil anaérobie peut être défini par un inconfort ou une sensation de brûlement dans le muscle lors de l'exercice.

Le substrat utilisé par le système d'énergie anaérobie est le glucide. Le glycogène (forme de glucides emmagasinés dans le muscle et dans le foie) et le glucose sanguin (forme de glucides en circulation dans le sang) sont dérivés des glucides obtenus par l'alimentation. Les hydrates de carbone (pâtes, riz, pain, pomme de terre, féculents, sucreries, voir figure 5.5) sont les sources alimentaires principales de glucose. Ils sont utilisés comme carburant énergétique par le cerveau, les muscles, le cœur, le foie et plusieurs autres organes. Une fois ingérés, ces aliments sont dégradés en glucose par le système digestif. Le glucose passe alors dans les voies circulatoires sanguines. Une certaine quantité de glucose reste en circulation dans le sang, mais une grande partie est emmagasinée dans le foie et dans les muscles sous forme de glycogène. Le glycogène est constitué de centaines de molécules de glucose attachées ensemble et formant une chaîne. Le processus de formation du glycogène à partir du glucose se nomme **glycogénèse**.

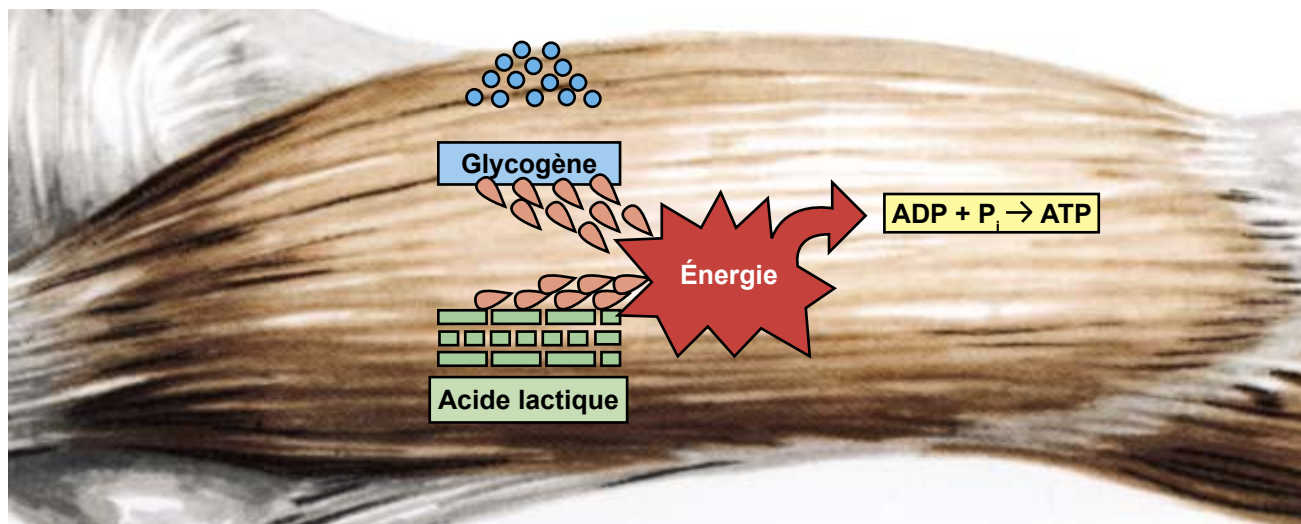


Figure 5.3 Le système d'énergie à court terme (acide lactique).

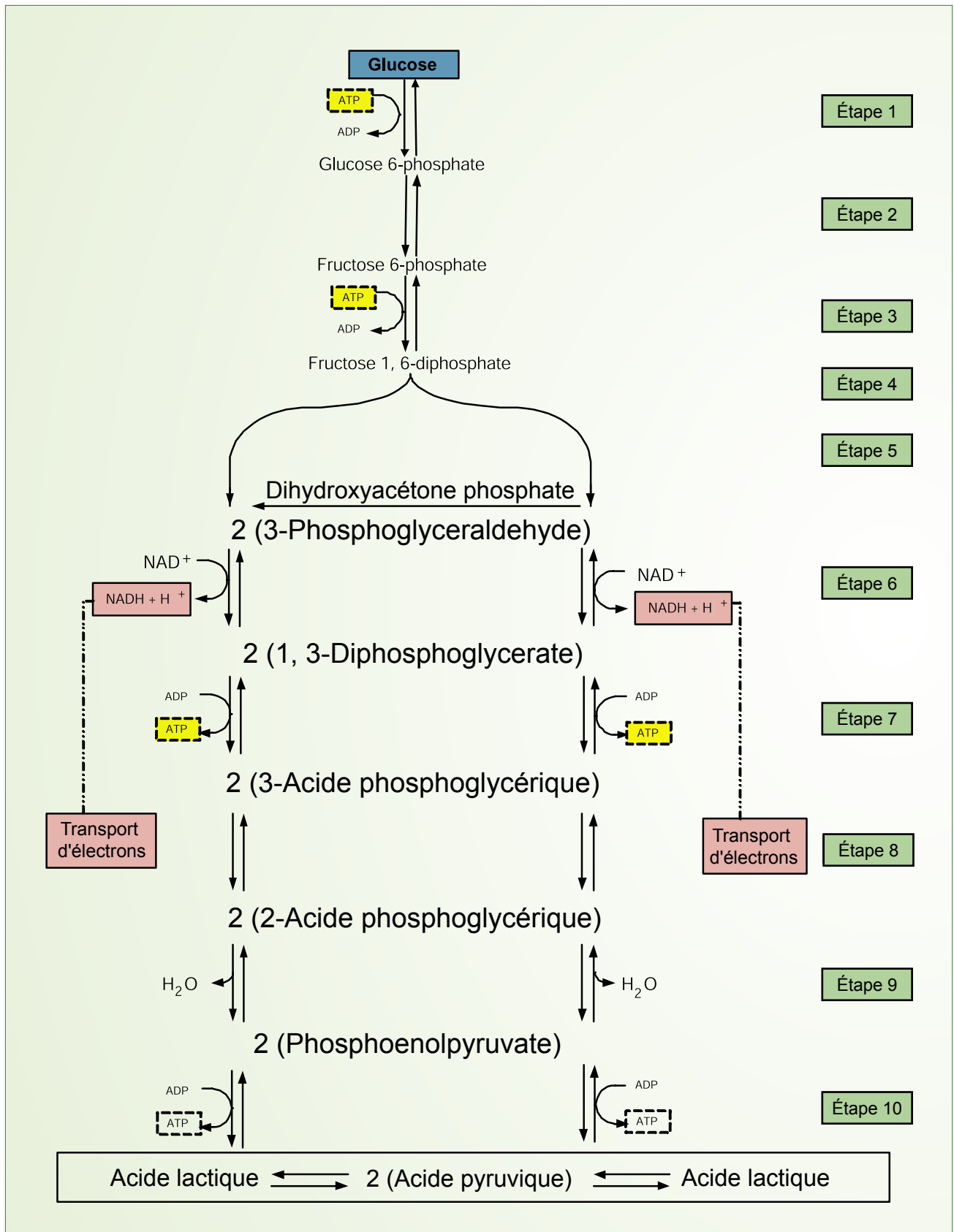


Figure 5.4 Les voies métaboliques complexes de la glycolyse.