

23. Énergie Métabolique

23.3 – Métabolisme anaérobie

François Péronnet, Ph.D.,
Professeur émérite, Université de Montréal

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.
Département de génie mécanique

Coralie Banon, M.Sc.A.
Bastien Thomasset, M.Sc.A.
Antoine Brégaïnt, M.Sc.A.

Plan de la présentation

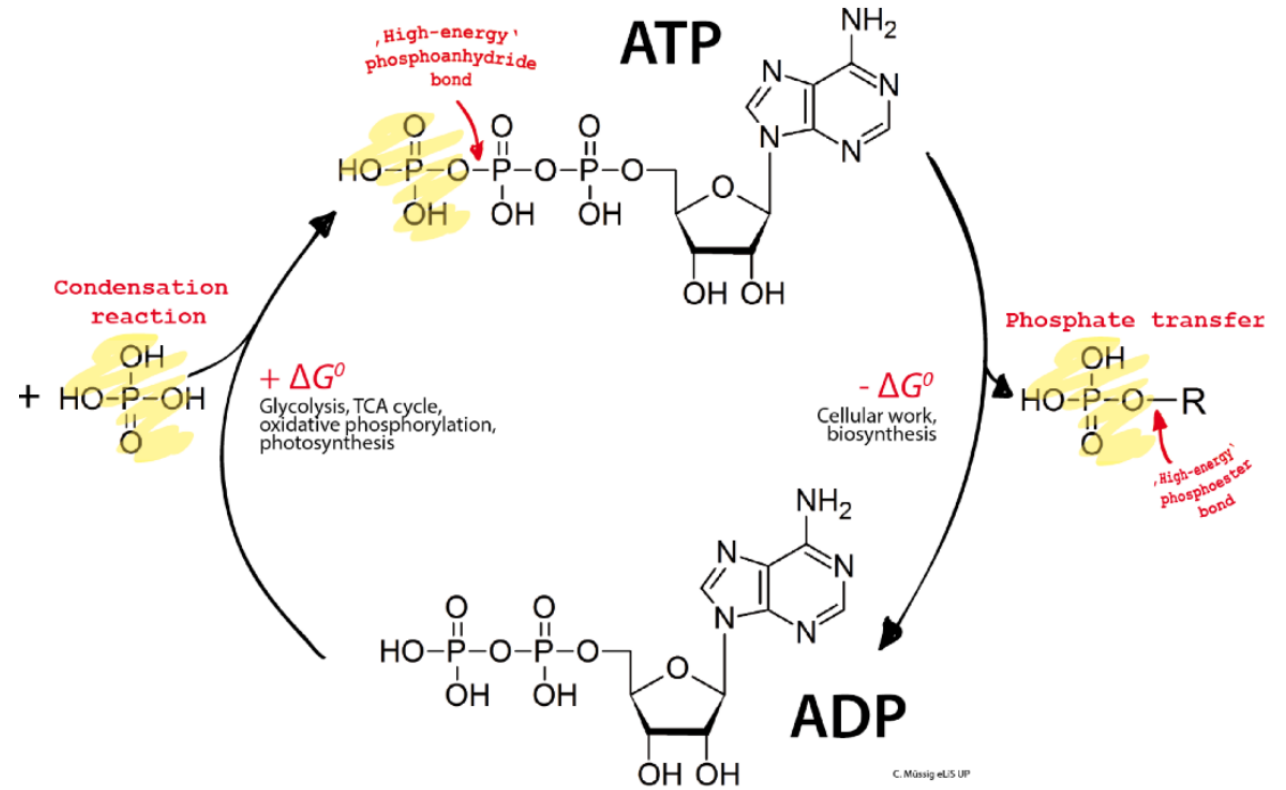
- Introduction et objectifs de la capsule
- Métabolisme anaérobie alactique
- Métabolisme anaérobie lactique
- Applications
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Métabolisme anaérobie alactique
- Métabolisme anaérobie lactique
- Applications
- Conclusion

Introduction et objectifs de la capsule

- On a étudié précédemment le métabolisme **aérobie**, que l'on peut assimiler à une énergie « **renouvelable** », avec toutefois quelques limitations (O_2 et substrats)
- Le métabolisme **anaérobie**, qui fonctionne sans O_2 , est quant à lui « **non renouvelable** » selon la même analogie : il fonctionne sur un principe de **réserves d'énergie limitées**, rapidement utilisables et lentement reconstituées.



Introduction et objectifs de la capsule

Il existe 2 types de métabolisme anaérobie :

- Alactique (« a » privatif) :

Il repose sur la dégradation de la phosphocréatine (PCr) pour produire de l'**ATP** et de la créatine (Cr)

- Lactique :

Il repose sur la glycolyse (ou fermentation du glucose) pour produire de l'**ATP** (et du lactate, anion de l'acide lactique)

Introduction et objectifs de la capsule

Le métabolisme anaérobie n'existe de façon importante que dans le muscle, pour répondre à une situation d'urgence.

C'est d'ailleurs dans le muscle qu'on trouve des quantités importantes de PCr, et c'est le seul tissu qui peut produire du lactate en grandes quantités à partir de ses réserves de glycogène.

Tableau II - Contribution des principaux organes à la consommation basale d'oxygène et au poids corporel. Ces valeurs sont approximatives, elles varient selon le sexe, l'âge et l'activité.

| | Consommation d'O ₂ (% du VO ₂ total) | Poids (% du poids du corps) |
|---------------|--|-----------------------------|
| Foie | 20 | 2,5 |
| Cerveau | 20 | 2,0 |
| Cœur | 10 | 0,5 |
| Reins | 10 | 0,5 |
| Muscles | 20 | 40,0 |
| Autres tissus | 20 | 54,5 |

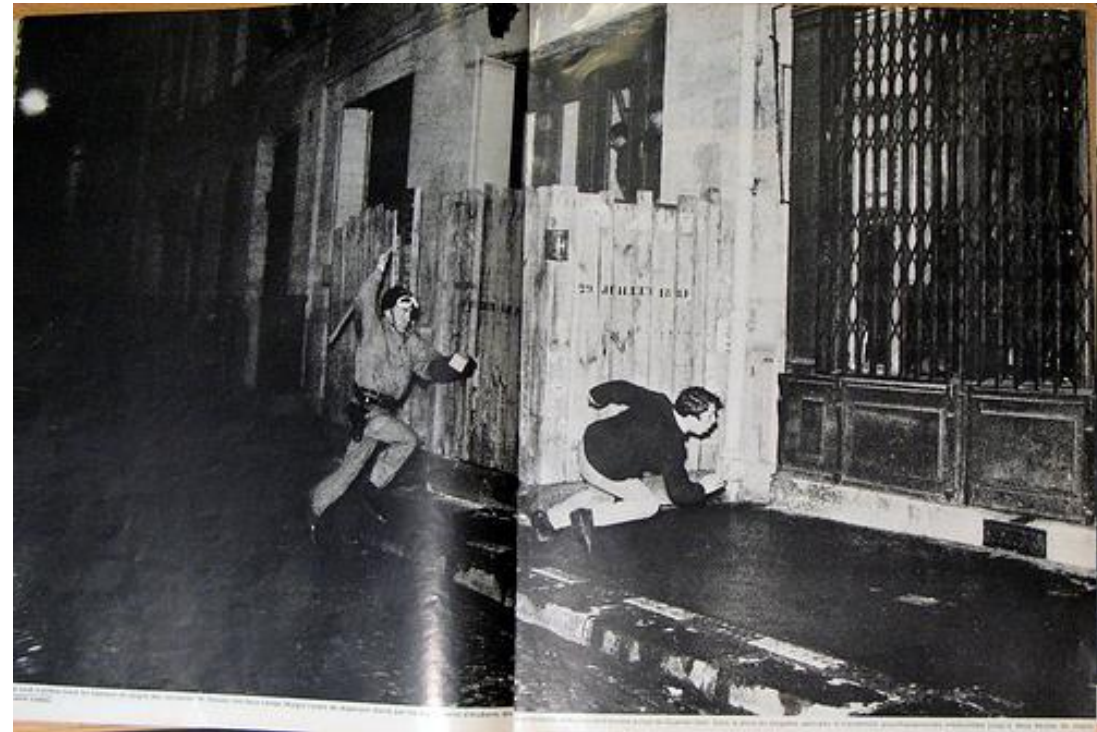
Introduction et objectifs de la capsule

- Le métabolisme anaérobie permet de soutenir une **puissance très élevée**, mais pour un **temps très court** (quelques minutes).
- Quelques ordres de grandeur :

| | Métabolisme anaérobie alactique | Métabolisme anaérobie lactique | Métabolisme aérobie (ex. marathon récréatif) | Métabolisme aérobie (toute la vie d'un homme sédentaire) |
|------------------------------|--|---------------------------------------|---|---|
| Type d'effort | Intense | Intense | Modéré | Peu intense avec des pics d'activité |
| Durée typique | Environ 10 s | 1 à 3 min | 4 h | ~ 82 ans (espérance de vie) |
| Puissance mise en jeu | Environ 3000 W | 500-1500 W | 1000 W | 120 W |
| Energie totale | 30 kJ | 90 kJ | 14400 kJ | ~ 300 GJ |

Introduction et objectifs de la capsule

- Historiquement, le métabolisme anaérobie permettait à nos ancêtres d'échapper à un prédateur ou une situation dangereuse en favorisant une fuite rapide (encore parfois utile aujourd'hui).



Introduction et objectifs de la capsule

- Cette capsule présente le **métabolisme anaérobie** avec pour objectifs :
 - Comprendre le fonctionnement énergétique des deux filières du métabolisme anaérobie et identifier ses différents acteurs
 - Effectuer des applications dans des situations simples pour mieux comprendre le métabolisme anaérobie

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Métabolisme anaérobie alactique***
- Métabolisme anaérobie lactique
- Applications
- Conclusion

Métabolisme anaérobie alactique

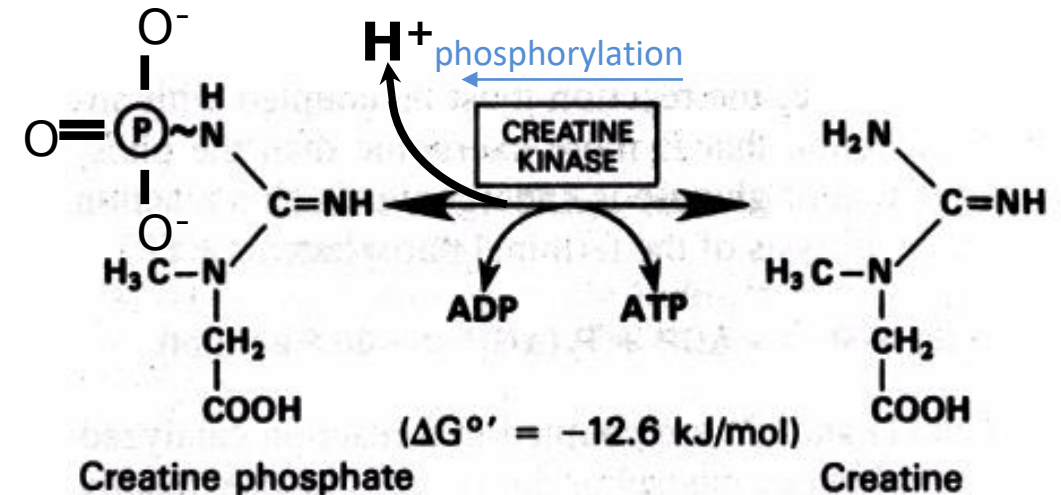
Synthèse de la PCr : à partir de la créatine (Cr)

Origine de la Cr :

- Synthèse à partir de 2 acides aminés
- Alimentation (produits d'origine animale)
- Suppléments consommés par les sportifs



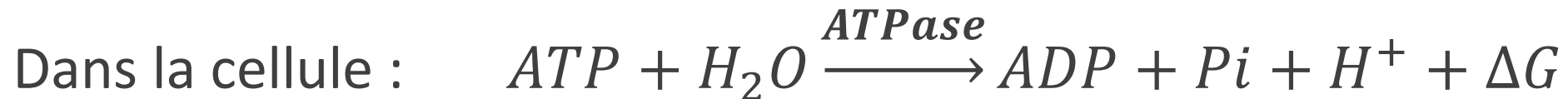
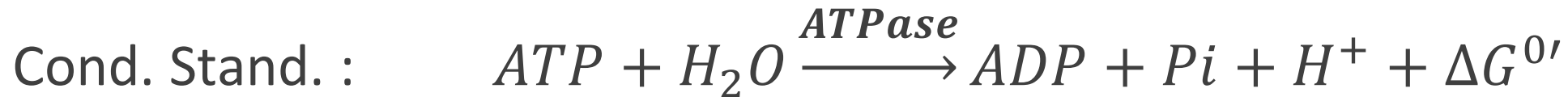
Phosphorylation en PCr par l'ATP d'origine aérobie :



Rendement dans la cellule = 100%

Métabolisme anaérobie alactique

- 1^{ère} étape : **Hydrolyse de l'ATP** (là où l'énergie est nécessaire)



Avec $\left\{ \begin{array}{l} \text{Variation d'énergie libre standard } \Delta G^{0'} = -7.3 \text{ kcal/mol} \\ \text{Variation d'énergie libre réelle (cellule) } \Delta G = -\mathbf{12 \text{ kcal/mol}} \end{array} \right.$

N.B. : Cond. Stand. = 760 mmHg, pH 7, 25°C, concentration molaire = 1

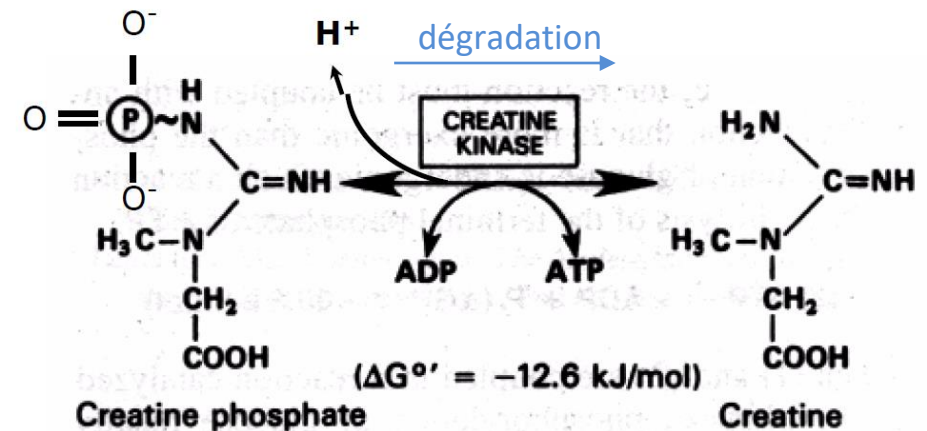
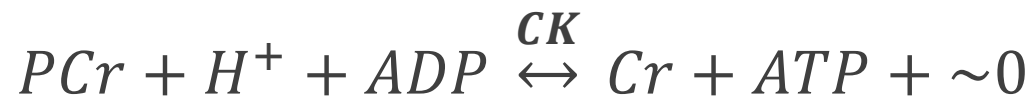
Métabolisme anaérobie alactique

- 2^{ème} étape : Resynthèse de l'ATP par dégradation de la PCr



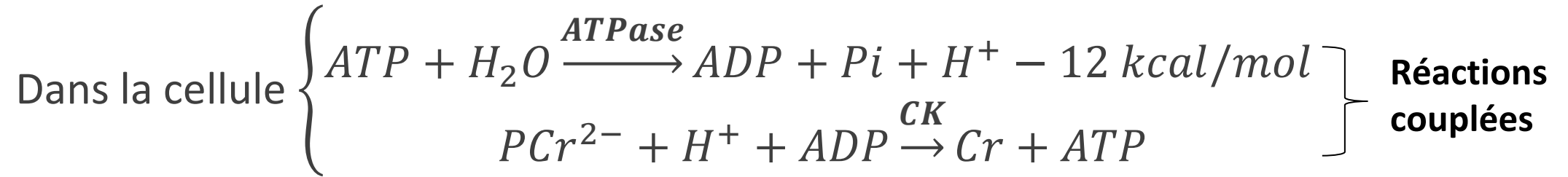
Caractéristiques de la dégradation de la PCr :

- Catalysée par la Créatine Kinase
- Alcalinise le milieu car consomme un H⁺ (tampon)
- Irréversible en Cond. Stand., mais réversible dans la cellule, à l'équilibre, avec un rendement de ~100% :



Métabolisme anaérobie alactique

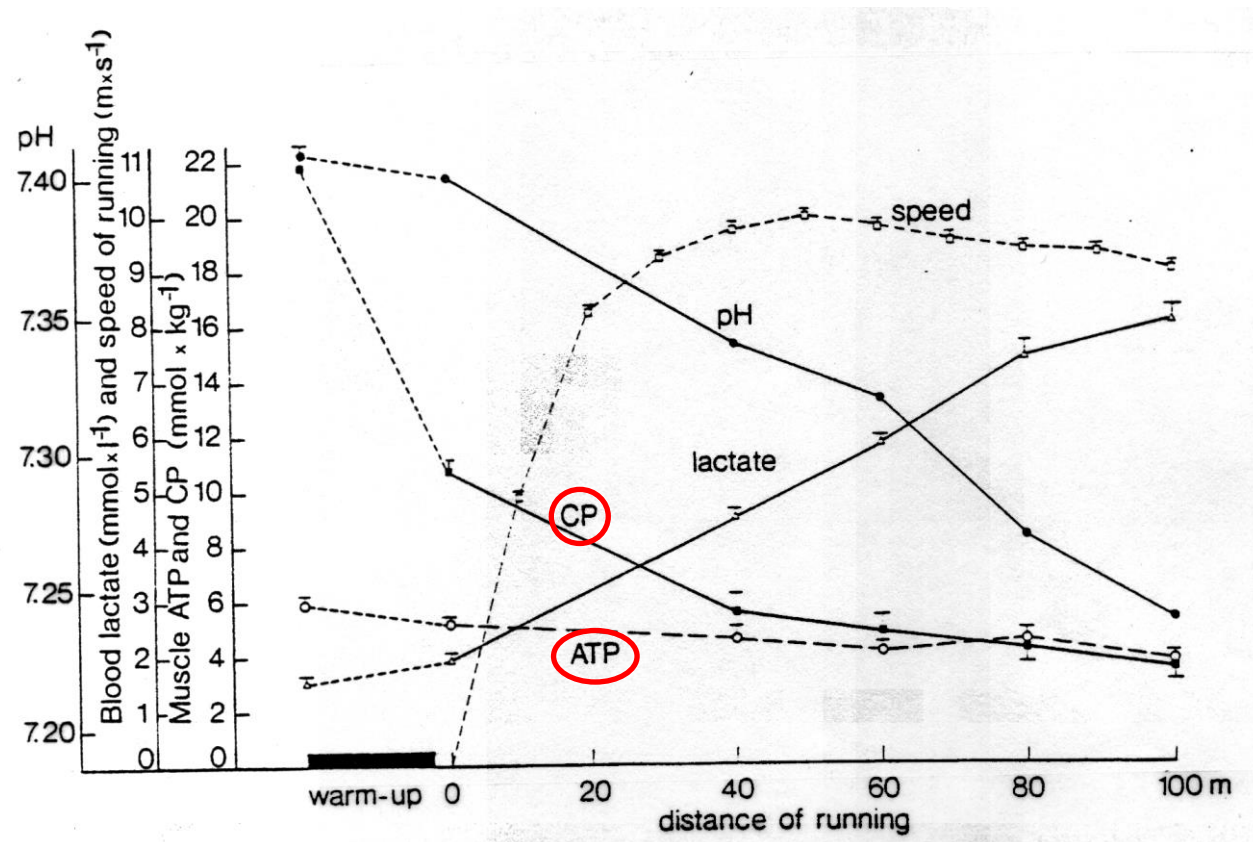
- Bilan : Métabolisme anaérobie lactique



Neutre pour le pH (H^+), augmentation de la concentration d'ATP

Métabolisme anaérobie alactique

Utilisation de l'ATP et de la PCr à l'exercice court et intense :

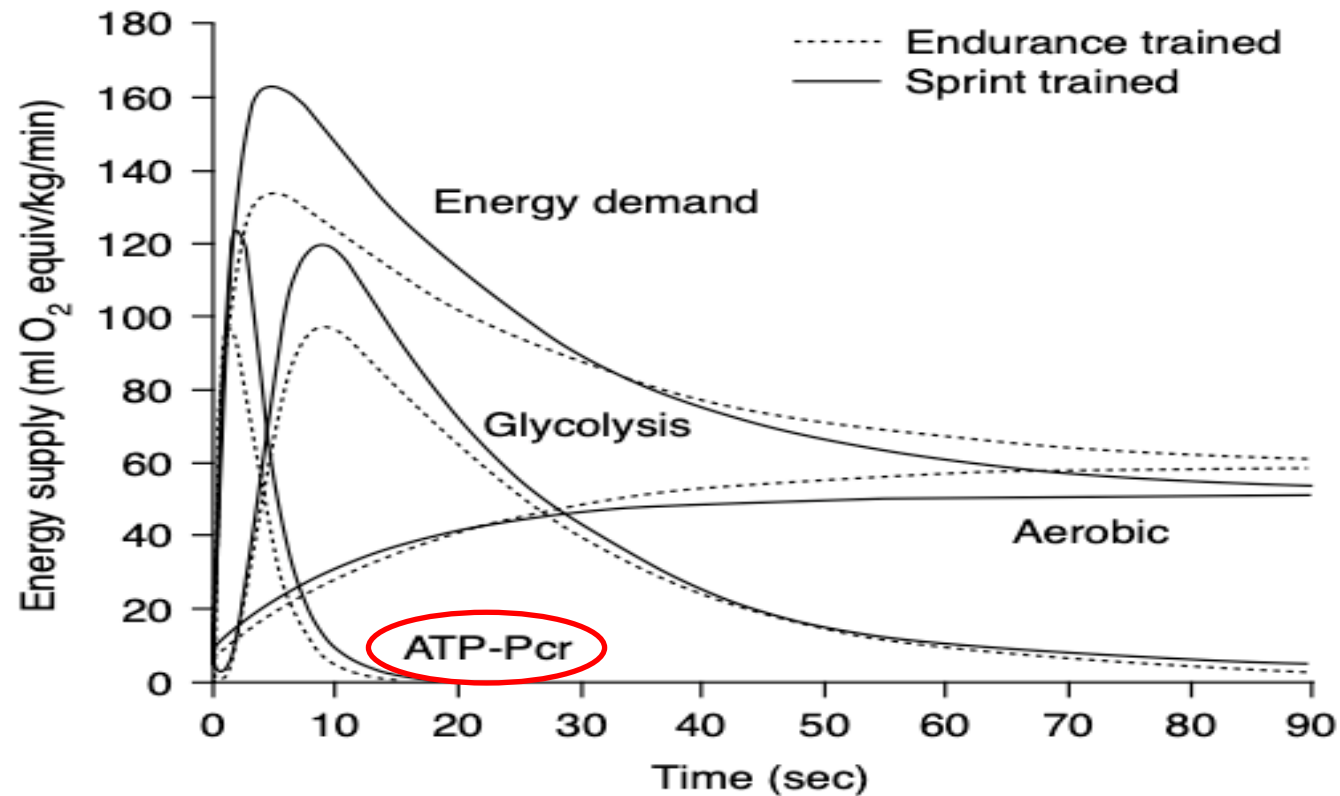


Hirvonen et al. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56:253,1987

- ATP diminue par hydrolyse pour fournir l'énergie aux muscles
- PCr (CP) diminue par dégradation pour reformer l'ATP et Cr
- ATP reste finalement assez stable

Métabolisme anaérobie alactique

Cinétique de la mise en jeu de la PCr :

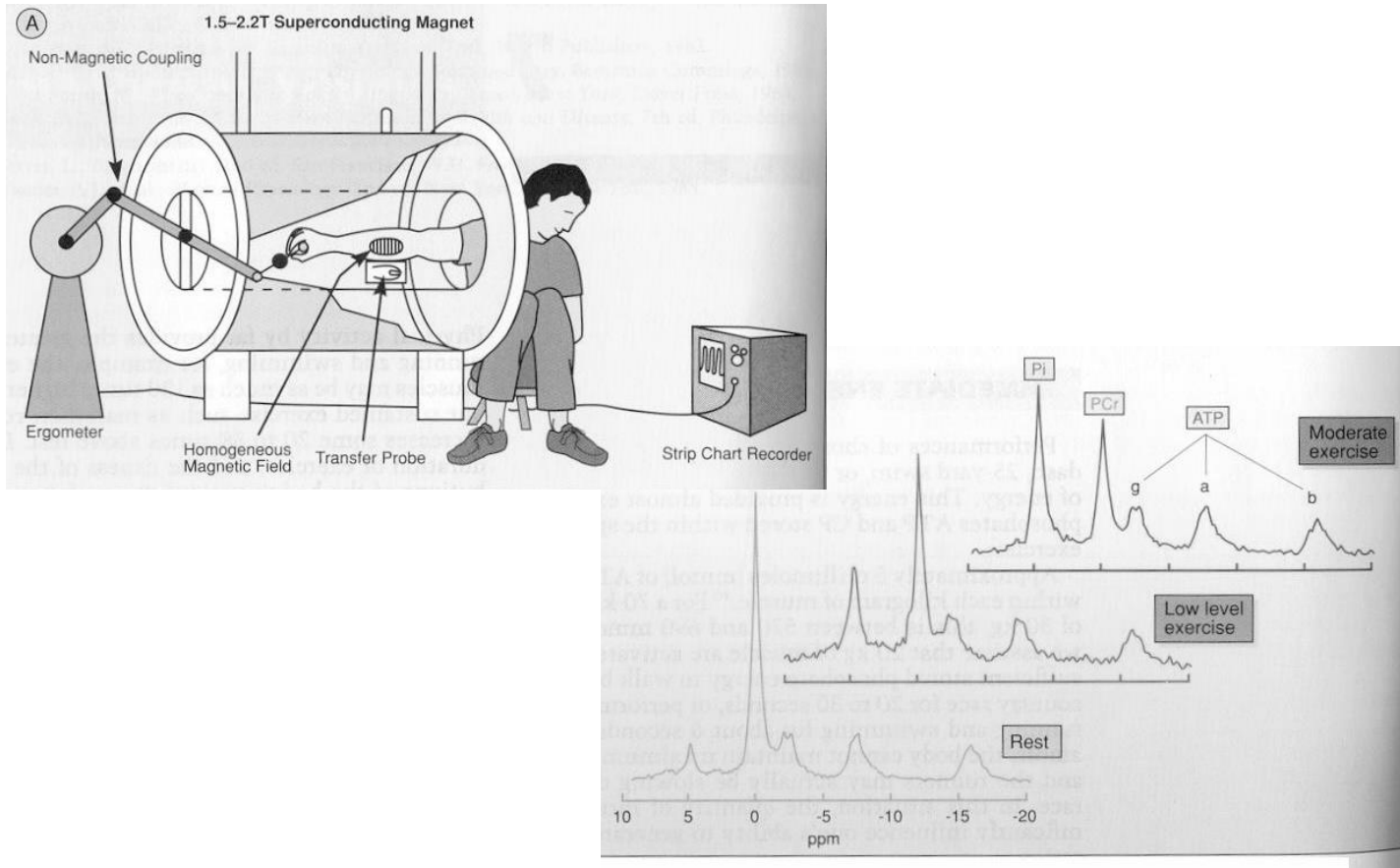


Gastin Sports Med 2001

- Le métabolisme anaérobie alactique est mis en jeu dès le début de l'activité
- Après un pic, les réserves de PCr sont rapidement utilisées

Métabolisme anaérobie alactique

Mesure RMN de la PCr, de l'ATP et du Pi à l'exercice localisé :



- ATP reste globalement stable
- PCr diminue par dégradation pour reformer l'ATP et Cr
- Pi augmente par hydrolyse de l'ATP

Métabolisme anaérobie alactique

Mesures à l'exercice localisé (30 préhensions/min – 10-20 min) :

| | ATP | PCr | Pi | ADP | pH | ΔG |
|------------------|------------|-------------|-----------|---------------------------------|-------------|------------------------------|
| | mM | mM | mM | μM | | kJ/mol |
| Repos | 8.2 | 38.2 | 4 | 6 | 7.02 | -63.9 |
| Ex. léger | 8.5 | 20.1 | 22 | 45 | 6.87 | -54.4 |
| Fatigue 1 | 7.7 | 10.1 | 35 | 43 | 6.37 | -53.0 |
| Fatigue 2 | 4.4 | 6.4 | 42 | 22 | 6.12 | -52.8 |

Taylor et al. Magn. Res. Med. 3:44, 1986

Métabolisme anaérobie alactique

Caractéristiques du métabolisme anaérobie alactique :

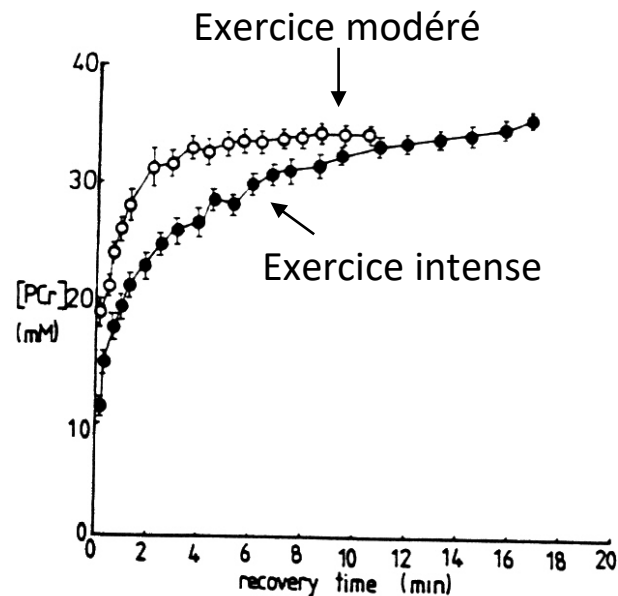
Sujet : 70 kg dont 30 kg de muscles (dont 15 kg membres inférieurs)

| | ATP | myokinase | PCr |
|------------------|--------------|------------------|---------------------|
| [] (mmol/kg) | 5 | | 25 |
| masse (mmol) | 150 | | 750 (30 kg) |
| PE (kJ/mole) | 51 | | 51 |
| PE (kJ/g) | 0.102 | | 0.255 |
| E virtuelle (kJ) | 7.65 | | 38.25 |
| % utilisable | 10 | | 80 |
| E réelle (kJ) | 0.77 | 0.38 | 30.6 |
| membres inf. | 0.38 | 0.19 | 15.3 (15 kg) |
| Tmin (s) | 1 | 1 | 5 |
| Pmax (W) | 383 | 191 | 3060 |

- Réserve d'énergie anaérobie sous forme de PCr : **~30 kJ**
- Puissance max via PCr : **~3 kW**

Métabolisme anaérobie alactique

- Restauration des réserves de PCr :
 - En récupération post-exercice
 - Nécessite de l'oxygène (garot : pas de régénération de PCr) → c'est le métabolisme aérobie qui donne des ATP pour la phosphorylation de la Cr
 - Temps de demi-vie (temps nécessaire pour restaurer la moitié des réserves) : de 50 s à 2.5 min selon la puissance de l'exercice (entre autres)
 - PCr diminue très vite lors de l'effort mais met du temps à se reconstituer pendant la récupération



Métabolisme anaérobie alactique

Bilan :

- Le métabolisme anaérobie alactique est directement disponible au tout début de l'exercice
- Il est particulièrement sollicité lors de l'exercice court et intense.
- Ordre de grandeur : la réserve de PCr permet de courir à pleine vitesse 20m ou 30m.

Plan de la présentation

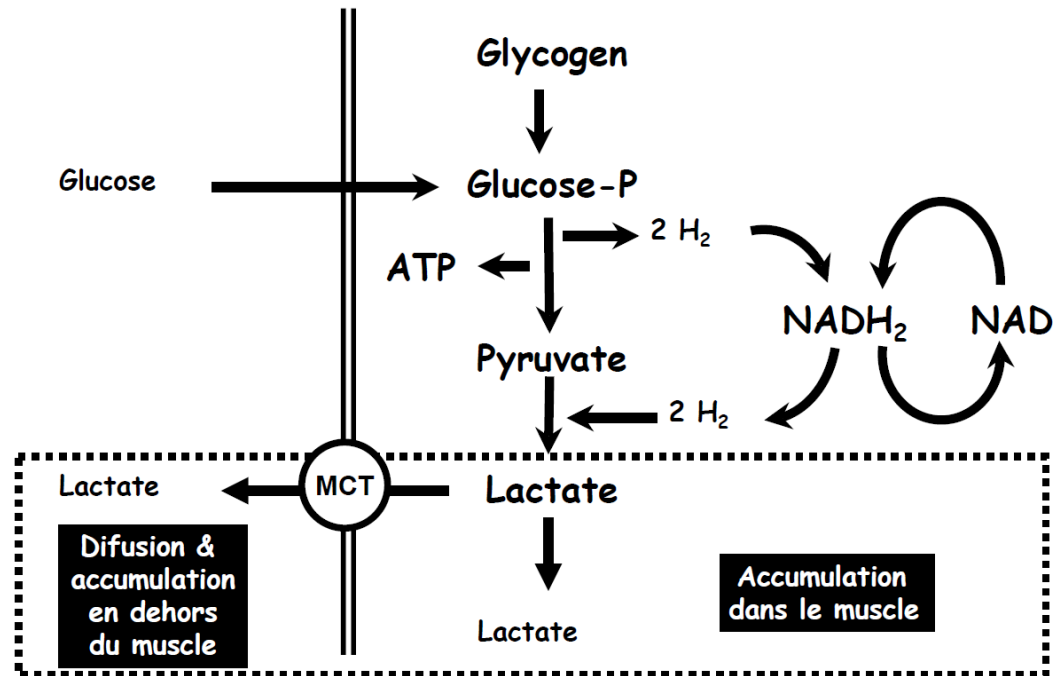
- Introduction et objectifs de la capsule
- Métabolisme anaérobie alactique
- ***Métabolisme anaérobie lactique***
- Applications
- Conclusion

Métabolisme anaérobie lactique

- $glucose \xrightarrow{\text{arrachage } H^+ \text{ et } e^-} 2 \text{ pyruvate} \xrightarrow{H^+ \text{ et } e^- \text{ rendus}} 2 \text{ lactate}$

Cette voie métabolique est la **glycolyse**.

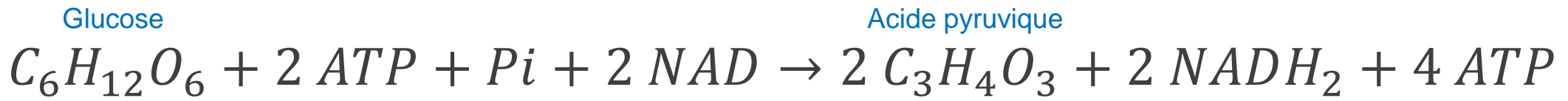
Devenir du pyruvate et de l'hydrogène en anaérobiose



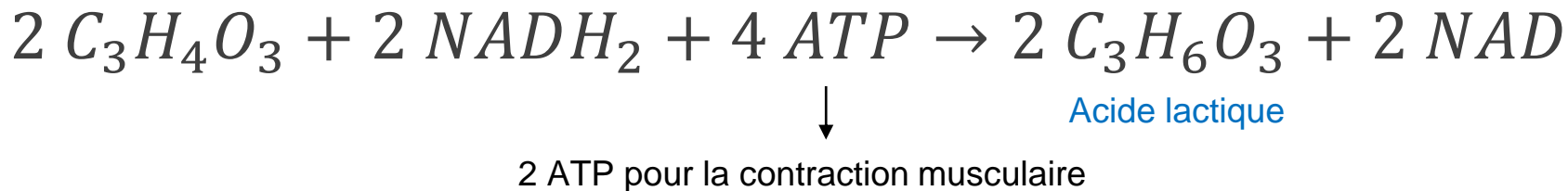
Il s'agit d'un processus de **fermentation** VS combustion pour métabolisme aérobie

Métabolisme anaérobie lactique

- 1^{ère} étape :



- 2^{ème} étape :

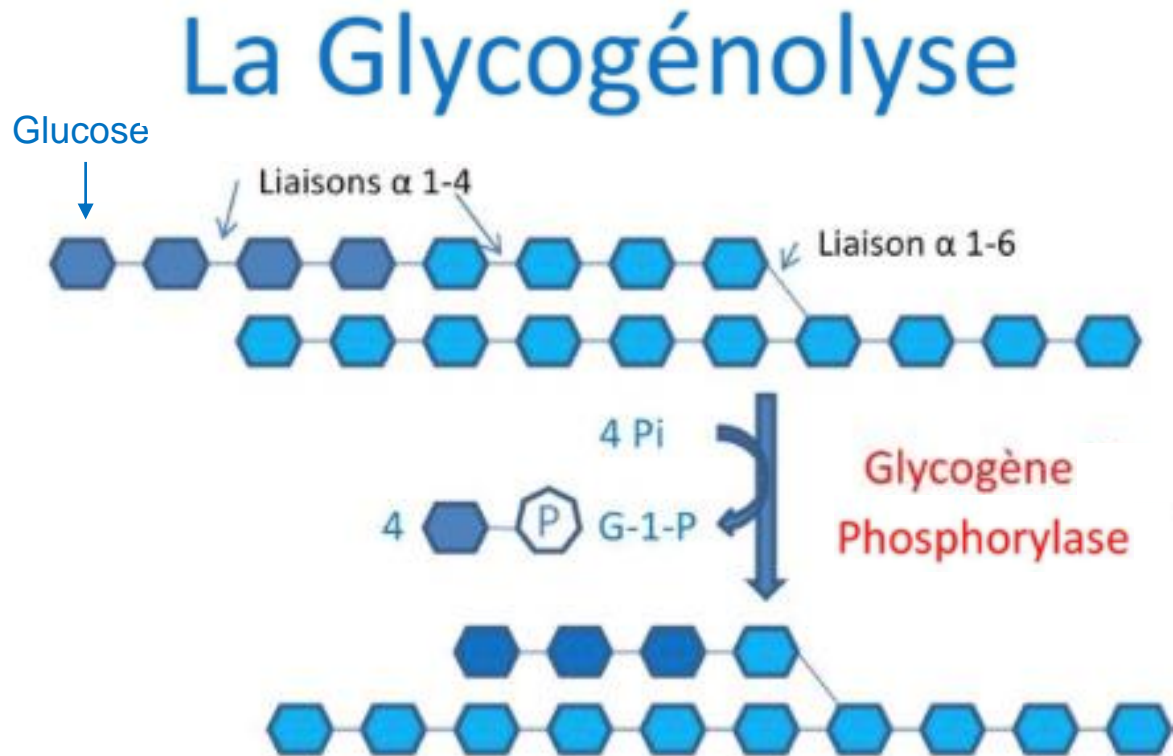


L'acide pyruvique est le vrai accepteur final des électrons mais l'acide lactique est formé pour continuer la réaction en reformant NAD.

NB : les composés de la glycolyse n'existent pas sous forme d'acides mais de leur bases conjuguées (anions): pyruvate ($C_3H_4O_3^-$), lactate ($C_3H_5O_3^-$)

Métabolisme anaérobie lactique

Cas du glycogène :



- Le glycogène est un polymère de glucose (accrochés bout à bout + ramifiés)
- La glycogène phosphorylase permet de séparer ces molécules de glucose, que l'on obtient sous forme de glucose phosphate (glucose + Pi)

Métabolisme anaérobie lactique

Bilan en ATP :

L'ATP est utilisé pour activer la glycolyse, mais il en est aussi un produit. L'ATP synthétisé par la réaction est utilisé pour la contraction musculaire.

- Cas du glucose : $glucose + 2 ATP + \dots \rightarrow 2 \times 2 ATP + \dots$
⇒ bilan : **2 moles d'ATP par mole** de glucose
- Cas du glycogène : $glycogène + ATP + Pi + \dots \rightarrow 2 \times 2 ATP + \dots$
⇒ bilan : **3 moles d'ATP par mole** de glycogène

Métabolisme anaérobie lactique

Gains énergétiques :

Unité glycosyl \rightarrow 2 lactate – 47 kcal

Unité glycosyl \rightarrow 2 lactate + 3 ATP – chaleur (11 kcal)

- **Equivalent énergétique lactate** : 47 kcal / 2 moles de lactate accumulées soit :

$$\frac{47 \text{ [kcal/mole glycosyl]}}{178 \text{ [g/2 moles lactate]}} = \mathbf{0.264 \text{ kcal/g}}$$

- **Rendement de la synthèse ATP** = $(47-11)/47 = \mathbf{77\%}$

→ plus élevé que le rendement aérobie (64%) car réactions plus simples

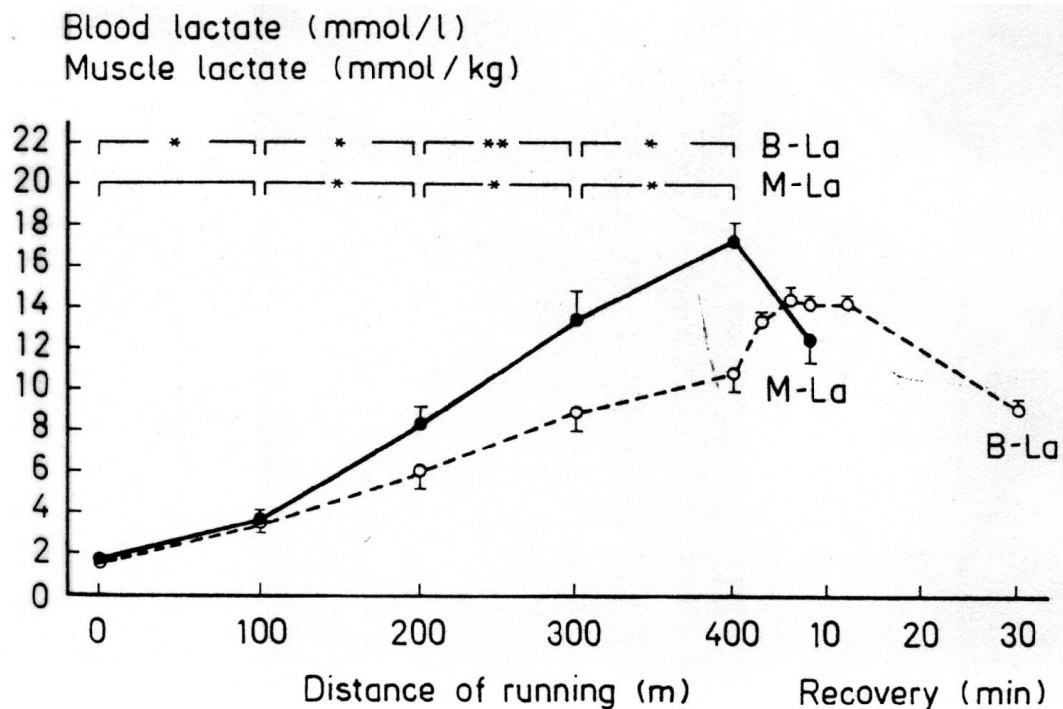
Métabolisme anaérobie lactique

Différenciation métabolismes anaérobie et aérobie pour la glycolyse :

- **Accepteur** de l'électron (et H^+) :
 - Métabolisme anaérobie lactique : **pyruvate**
 - Métabolisme aérobie : oxygène
- **Evolution** de la lactatémie (1 mmol/L au repos) :
 - Métabolisme anaérobie lactique : **accumulation rapide** (jusqu'à 25 mmol/L)
 - Métabolisme aérobie : stable (peut être plus élevée qu'au repos)
- **Type** de réaction :
 - Métabolisme anaérobie lactique : **fermentation**
 - Métabolisme aérobie : combustion

Métabolisme anaérobie lactique

Accumulation du lactate dans le corps :



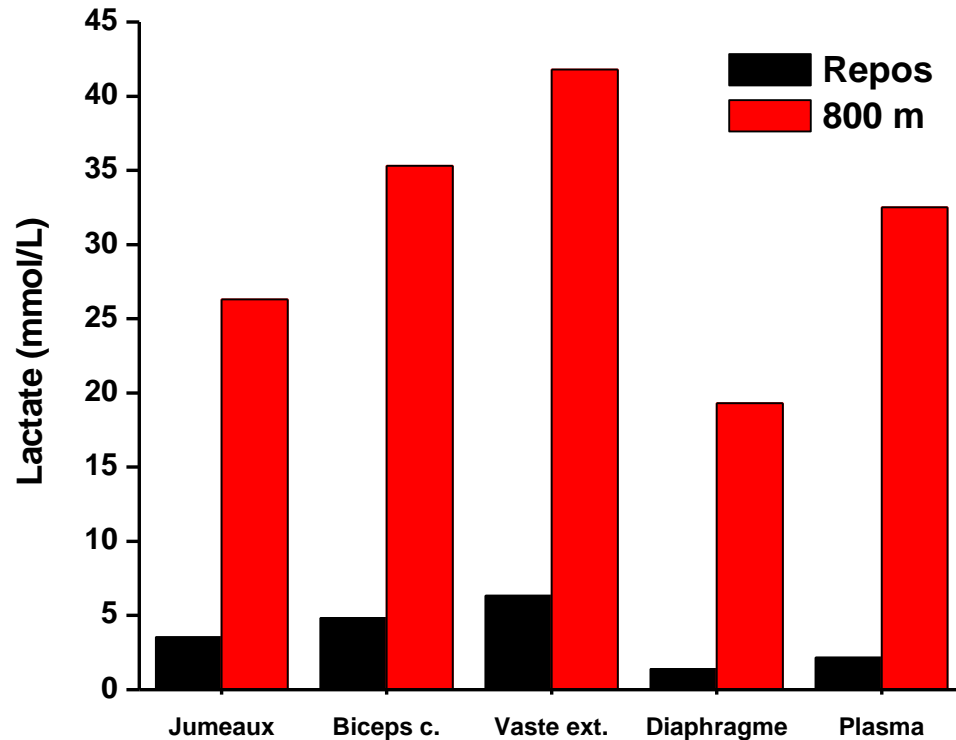
Hirvonen *Can. J. Appl. Sports Sci.* 17:141,1992

- Un sujet bien entraîné peut produire ~1 mole (90g) de lactate en 1 min
- La concentration de lactate commence par augmenter dans le muscle (où il est produit), puis dans le sang (d'où le « retard » observé)
- On a donc une distribution d'abord inhomogène puis plus homogène \Rightarrow il faut attendre l'**équilibre muscle/sang** pour mesurer la lactatémie

Métabolisme anaérobie lactique

Distribution inhomogène du lactate dans le corps :

Chien après un 800m en ~45s

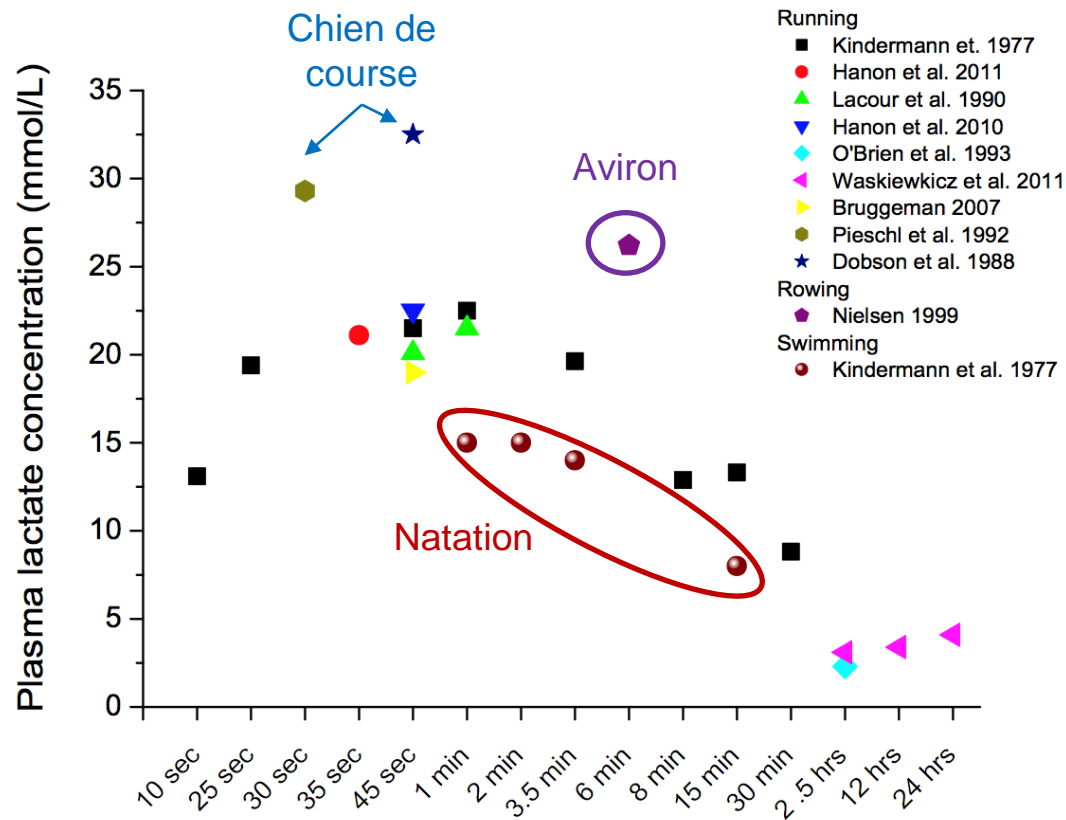


Dobson et al. AJP 255:R513, 1988

- Sur ce schéma, dépendant du muscle, on peut aller de 18 mmol/L à 42 mmol/L
- On a donc une répartition assez inégale du lactate dans le corps, y compris dans différents muscles

Métabolisme anaérobie lactique

Paramètres influant sur la concentration de lactate dans le sang :



- En abscisse : durée courses totales jusqu'à épuisement (valeur max) et non durée
- Paramètres d'influence :
 - Puissance mise en jeu
 - Durée de l'exercice
 - Type d'exercice
 - Espèce

Métabolisme anaérobie lactique

Relation entre lactate et performance sportive :

- Pour des exercices intenses de courte durée, une meilleure accumulation de lactate = une meilleure performance (équivalent de meilleur VO_2 max = meilleure performance en aérobie)

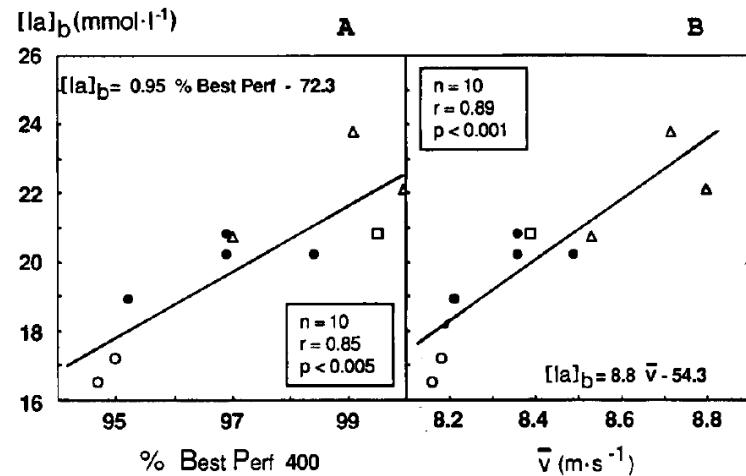


Fig. 1. Relationship between post-competition blood lactate concentration $[la]_b$ and performance over 400 m in male runners. Performance is expressed: A, in % of the best performance achieved in the year by the athlete (% best perf 400); B, by the average velocity for the race (\bar{v}). In A and B, similar symbols refer to the same subject

Lacour, 1990

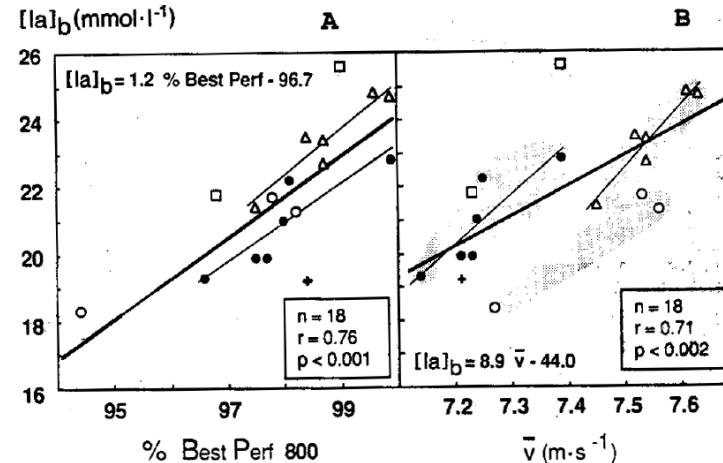
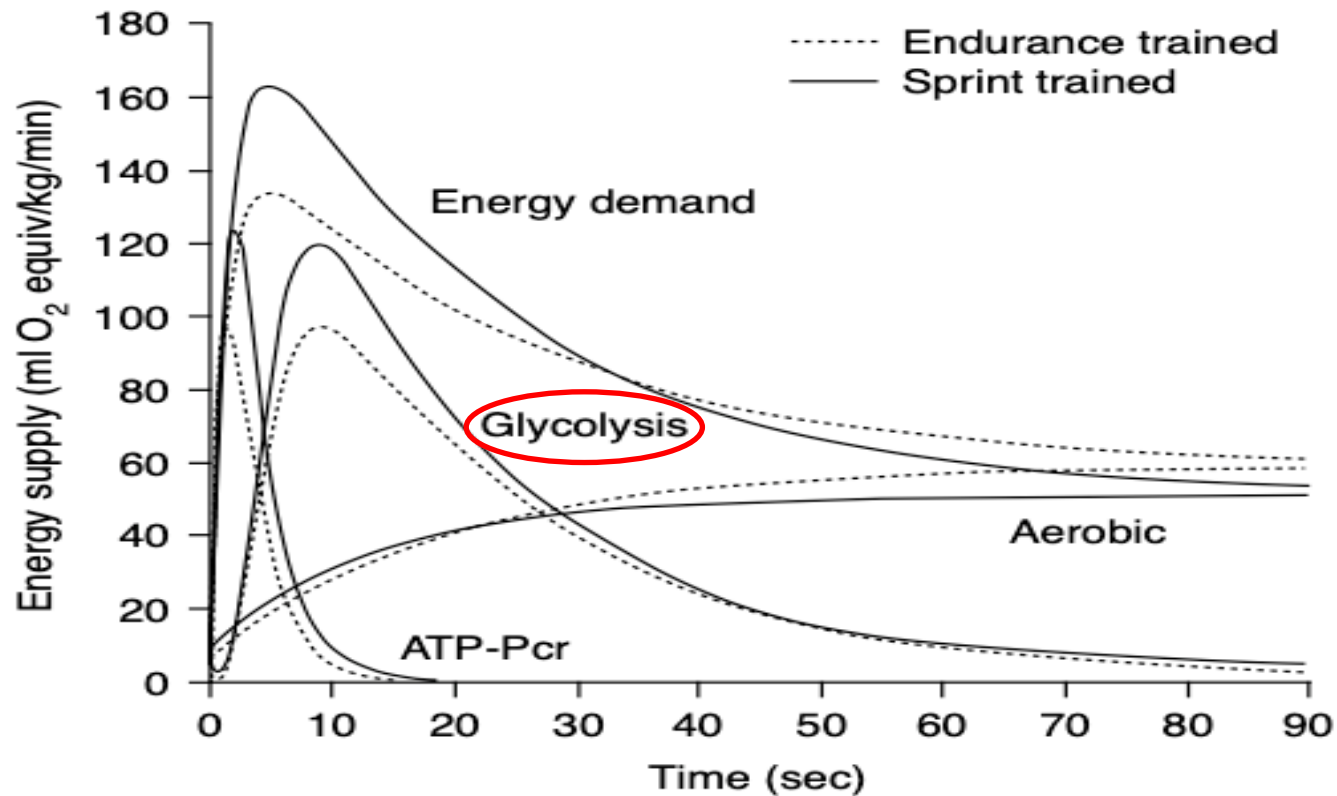


Fig. 2. Relationship between post-competition blood lactate concentration $[la]_b$ and performance over 800 m in male runners. Performance is expressed: A, in % of the best performance achieved in the year by the athlete (% best perf 800); B, by the average velocity for the race (\bar{v}). In A and B, similar symbols refer to the same subject. Two runners were measured six times. For these individuals, $[la]_b$ was significantly correlated to both % best perf and \bar{v} (●: $P<0.05$; △: $P<0.01$)



Métabolisme anaérobie alactique

Cinétique de la mise en jeu du métabolisme anaérobie lactique :



Gastin Sports Med 2001

- Le métabolisme anaérobie lactique est mis en jeu assez rapidement au début de l'activité
- Il met un peu plus de temps à se mettre en route que le métabolisme anaérobie alactique mais a une capacité plus grande donc dure plus longtemps

Métabolisme anaérobie lactique

Méthode de mesure :

- Il est simple de mesurer l'énergie et la puissance chimiques du métabolisme aérobie, de manière robuste, pratique et non invasive à partir du VO_2 . Les résultats sont clairs et exploitables.
- Ce n'est pas le cas pour le métabolisme anaérobie glycolytique :
 - Concentration du lactate dans le sang/plasma : très qualitatif, car la distribution est hétérogène.
 - Concentration du lactate dans le « muscle » : pas forcément mieux, on n'a pas un seul muscle, et la distribution y est encore hétérogène.

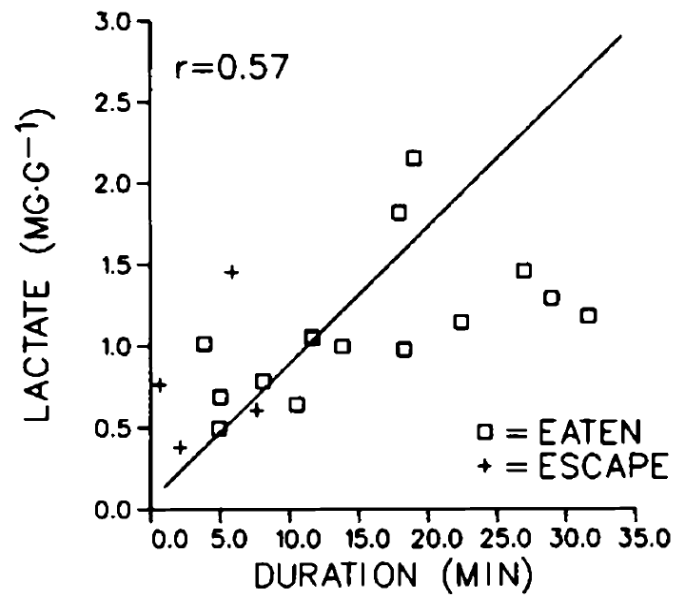
Métabolisme anaérobie lactique

Comment mesurer l'accumulation de lactate ?

- Dans l'organisme tout entier (contrôle vs post-exercice) :
- Etapes : immédiatement à la fin de l'exercice...
 - Sacrifice
 - Broyage de la carcasse
 - Centrifugation, volume du surnageant
 - Prélèvement d'un mL de surnageant et dosage du lactate
 - LA accumulé [mmol] = volume de surnageant [mL] x concentration de lactate [mmol/mL]
- Pour des raisons évidentes, utilisé seulement chez de petits animaux.

Métabolisme anaérobie lactique

Exemple - combat entre couleuvre (prédateur) et salamandre (proie):



| Treatment: | Lactate (mg/g) |
|-----------------------------|-----------------|
| Snake-salamander encounters | 1.05 ± 0.10 |
| Resting | 0.12 ± 0.01 |
| Forced activity for 2 min | 1.17 ± 0.21 |

- La salamandre lutte pour sa vie pendant un temps court (caractéristiques au maximum) jusqu'à 35 min
- On mesure ensuite l'accumulation du lactate par la méthode évoquée précédemment

Feder & Arnold *Oecologia* 53:93, 1982

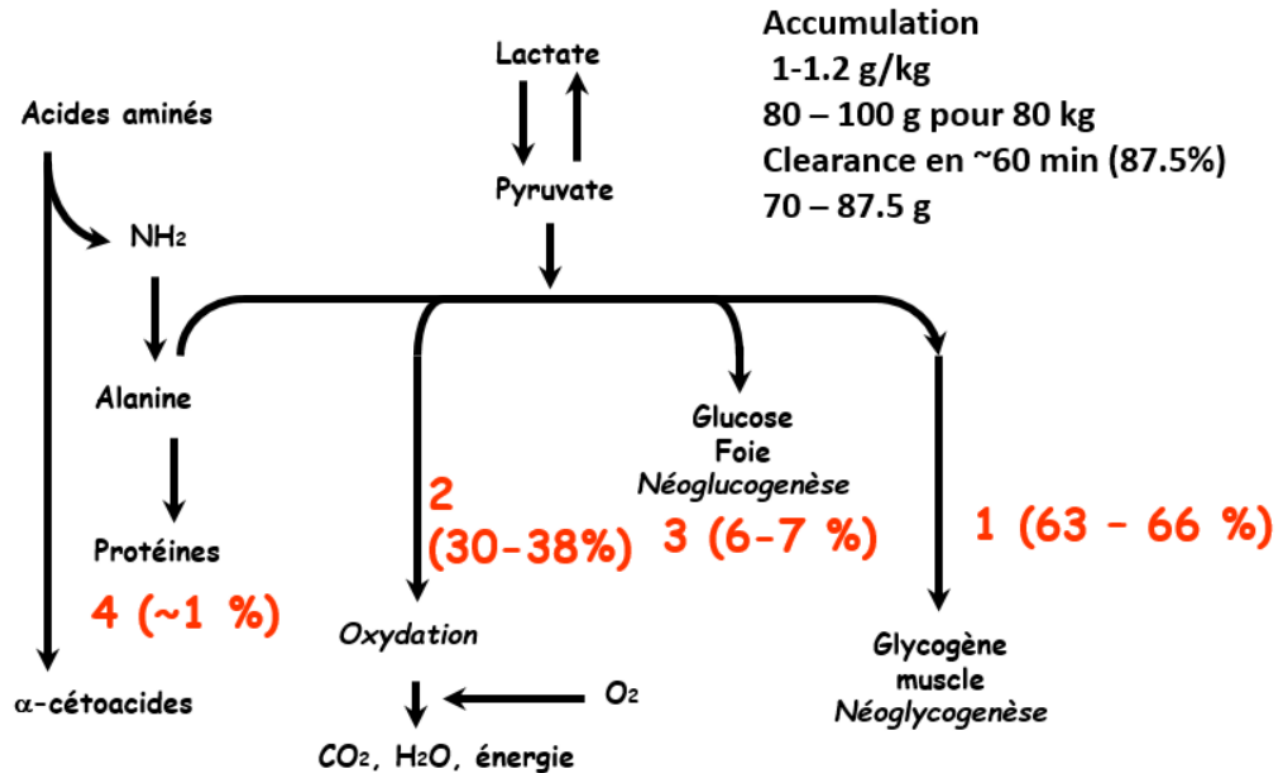
Métabolisme anaérobie lactique

Les mythes du lactate :

- Le lactate est responsable de la **fatigue** : **INCERTAIN**
 - On finit un marathon épuisé avec une lactatémie très basse
 - Le pH semble être un coupable potentiel ? (on ne comprend pas encore bien la fatigue)
- Le lactate est responsable des **crampes** : **FAUX**
 - On peut avoir des crampes avec une lactatémie très basse (sommeil)
 - On n'a pas forcément de crampes même avec une lactatémie très haute
- Le lactate est responsable des **courbatures** : **FAUX**
 - Sont causées par des dommages du tissu de soutien du muscle, par exemple lors d'exercices excentriques (descente bien plus propice aux courbatures que montée)

Métabolisme anaérobie lactique

Devenir du lactate :



- On a accumulé une quantité maximale de lactate pendant l'exercice, qui représente un **cul de sac métabolique** (on ne peut pas aller plus « loin »)
- On va l'éliminer en le retransformant en pyruvate, puis majoritairement en glycogène (63-66 %) ou en l'oxydant (30-38 %)

Métabolisme anaérobie lactique

Devenir du lactate :

- Glycolyse : le glycogène diminue fortement pendant l'exercice comparé aux valeurs de repos. On a le phénomène inverse pour le lactate.
- Pendant la récupération, la lactatémie diminue assez régulièrement. La concentration de glycogène augmente par resynthèse à partir du lactate.

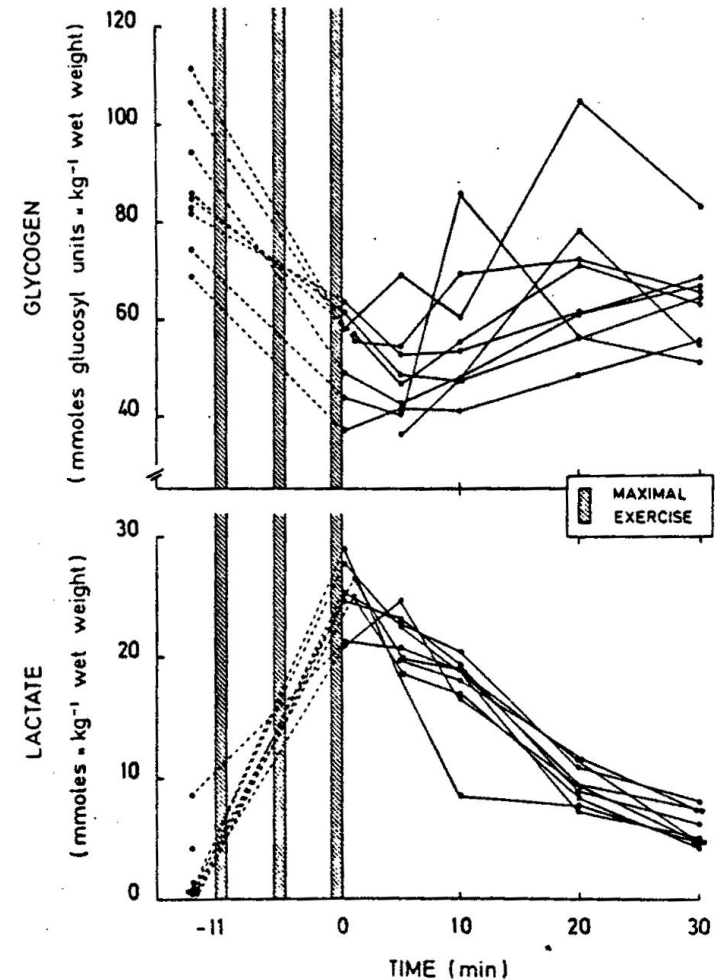


FIG. 1. Individual values for muscle glycogen content and muscle lactate concentration at rest before intermittent maximal exercise (i.e., 3 times 1-min exercise to exhaustion with 4-min rest periods in between) and during 1st 30 min of recovery.

Hermansen, *Am J Physiol*, 23:E422, 1977

Métabolisme anaérobie lactique

Bilan – quelques ordres de grandeur pour l'Homme :

- Capacité de 1 à 1,2 g/kg
 - 70-85 g de lactate
 - $\times 0,264 = 18-22 \text{ kcal}$
- Epuisable en $\sim 35\text{s}$
- Puissance élevée
 - $18-22 \text{ kcal} \times 4200 / 35 = 2,2-2,6 \text{ kW}$
- Très haut rendement
 - 77 % \rightarrow ATP
 - $P_{\text{utile}} = 1,7-2,0 \text{ kW}$



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Métabolisme anaérobie alactique
- Métabolisme anaérobie lactique
- ***Applications***
- Conclusion

Applications

Application n°1 : Puissance chimique utile chez l'Homme

- Lors d'un effort intense, un sportif convertit des unités glycosyle en lactate via le métabolisme anaérobie lactique. 30 grammes de lactate sont ainsi produits en 25 s.
 - On rappelle que le rendement de la synthèse ATP de l'unité de glycosyl est de 77% et que l'équivalent énergétique du lactate est de 0.264 kcal/g.
 - Données : $1 \text{ kcal} = 4200 \text{ J}$; $M_{\text{lactate}} = 90 \text{ g/mol}$
- Calculer l'énergie chimique (en kcal) de cette synthèse. En déduire la puissance chimique utile associée (en W).
- Calculer le nombre de moles d'ATP re-synthétisées par cette voie.

Applications

Application n°1 : Correction

$$\rightarrow E_{chimique} = 30 [g] \times 0.264 [kcal/g] = 7.92 \text{ kcal}$$

$$P_{chimique} = \frac{7.92 [kcal] \times 4200 [J/kcal]}{25 [s]} = 1331 \text{ W}$$

$$P_{chimique \text{ utile}} = 0.77 \times 1330 = \mathbf{1025 \text{ W}}$$

→ Lorsqu'on synthétise 2 moles de lactate, on en synthétise 3 d'ATP.

$$\text{Alors : } n_{ATP} = n_{lactate} \times \frac{3}{2} = \frac{m_{lactate}}{M_{lactate}} \times \frac{3}{2} = \frac{30}{90} \times \frac{3}{2} = \mathbf{0.5 \text{ mol}}$$

Applications

Application n°2 : Le guépard (1/2)

Inspirée de « Dynamics of a Cheetah's Run », Joshi et al., 2013

- Pour attraper ses proies, un guépard est capable d'une très grande accélération : il peut passer du repos à sa vitesse de course maximale (30 m/s) en 3.0s (meilleure performance qu'une voiture sportive). Cependant, cette course lui demande un effort considérable et ne dure qu'une vingtaine de secondes.
- On considère qu'un guépard de 50 kg a besoin de 256 kJ pour sa course. On fait l'hypothèse que le métabolisme anaérobie lactique fournit 50% de l'énergie, à partir du glucose (masse molaire : 180 g/mol).

Applications

Application n°2 : Le guépard (2/2)

Inspirée de « Dynamics of a Cheetah's Run », Joshi et al., 2013

- On pose l'hypothèse que la masse de lactate obtenue se distribue dans 80% de l'eau de l'organisme. On suppose que l'eau représente 60% de la masse du guépard.
→ Calculer la masse de glucose nécessaire pour la course à partir de l'équivalent énergétique du lactate (1.11 kJ/g).
→ En déduire l'accumulation de lactate chez le guépard pendant cette course (en mmol/L).

Applications

Application n°2 : Correction

→ On sait que le métabolisme anaérobie lactique permet de produire 2 moles de lactate par mole de glucose. Or, d'après l'équation de la glycolyse, la masse molaire du glucose vaut 2 fois celle du lactate. On a alors $m_{\text{glucose consommé}} = m_{\text{lactate produit}}$.

Dans ce cas, $m_{\text{glucose}} = \frac{0.5 \times 256 \text{ [kJ]}}{1.11 \text{ [kJ/g]}} = \mathbf{115.3 \text{ g}}$

→ Selon la réponse précédente, on a $n_{\text{lactate}} = \frac{115.3 \text{ [g]}}{89 \text{ [g/mol]}} = 1.3 \text{ moles}$ de lactate qui se distribuent dans $m_{\text{eau}} = 0.8 \times 0.6 \times 50 = 24 \text{ kg d'eau} \Rightarrow 24 \text{ L d'eau}$.

Alors, on a $[\text{LA}] = \frac{1300 \text{ [mmol]}}{24 \text{ [L]}} = 54 \text{ mmol/L}$ de lactate accumulé pendant cette course.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Métabolisme anaérobie alactique
- Métabolisme anaérobie lactique
- Applications
- ***Conclusion***

Conclusion

- Le métabolisme anaérobie met en jeu deux voies : lactique, via la glycolyse, et alactique, qui repose principalement sur la PCr.
- Sa petite capacité est compensée par sa disponibilité immédiate et la grande puissance qu'il permet de développer.
- Très utile à nos ancêtres dans le passé, il est aujourd'hui très peu utilisé en raison de notre mode de vie actuel.
- Il reste toutefois utile pour certaines espèces animales ainsi que pour l'Homme dans le domaine sportif.



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

