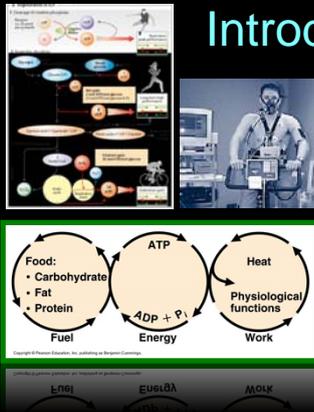


Introduction à la bioénergétique

*Intervention et interprétation
des différents systèmes à
l'exercice*



Sylvain DOREL
MCU, UFRSTAPS, Nantes



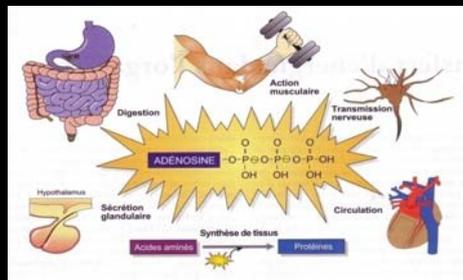
I. Introduction

L'enjeu = présenter les différents systèmes qui permettent à l'organisme d'extraire de l'énergie à partir des nutriments pour mieux répondre aux exigences de la pratique physique.

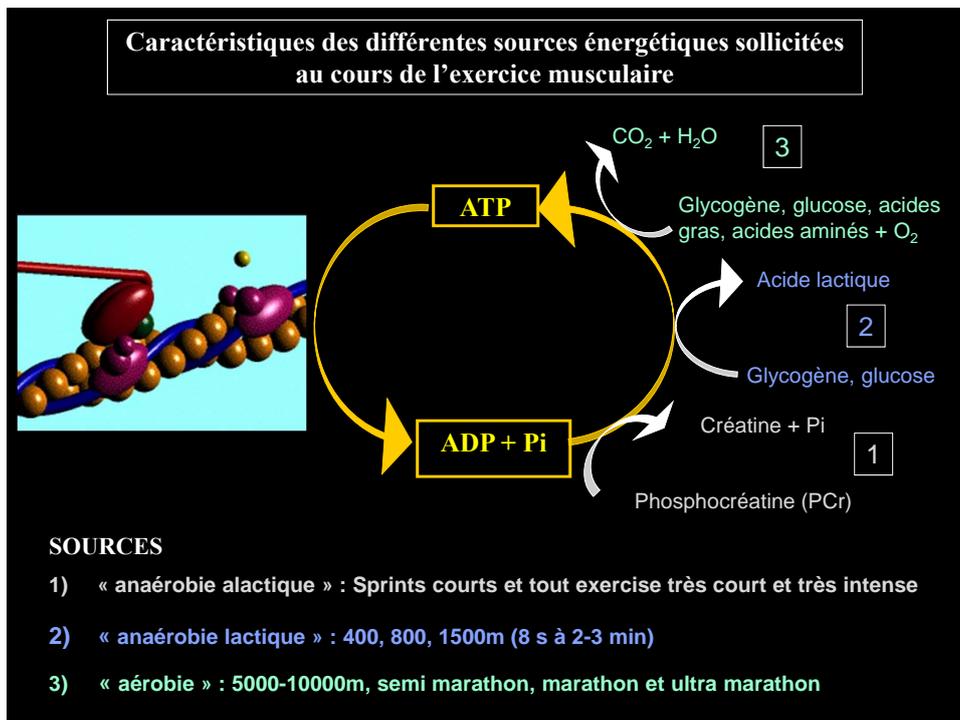
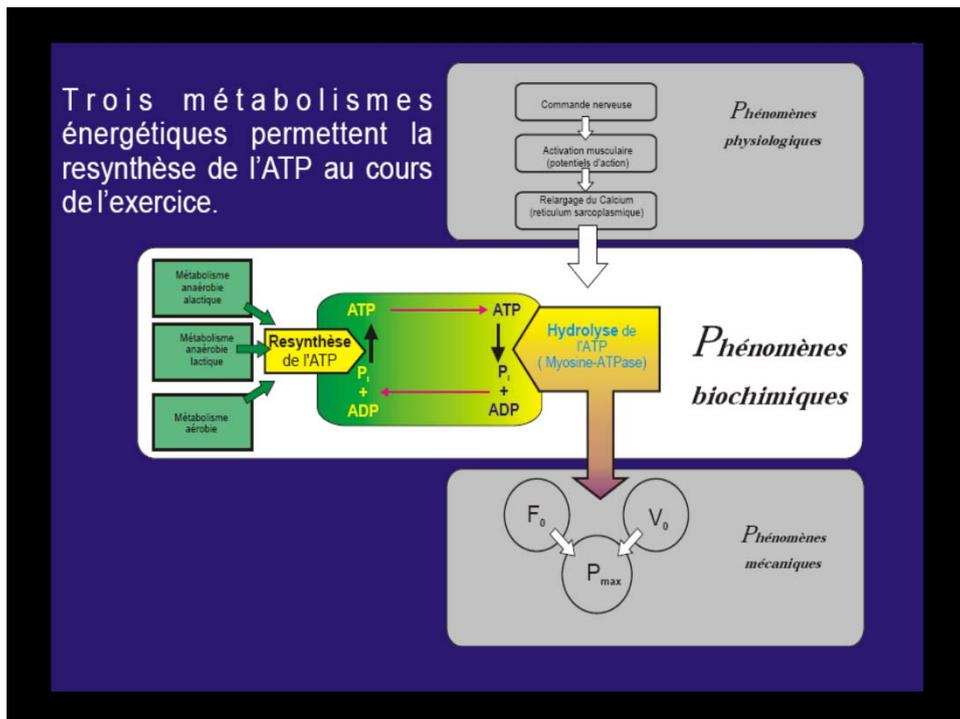
La réaction de resynthèse de l'ATP peut se réaliser :

. en présence d'oxygène:
aérobie

. en l'absence d'oxygène:
anaérobie



**ATP = devise énergétique de
l'organisme.**



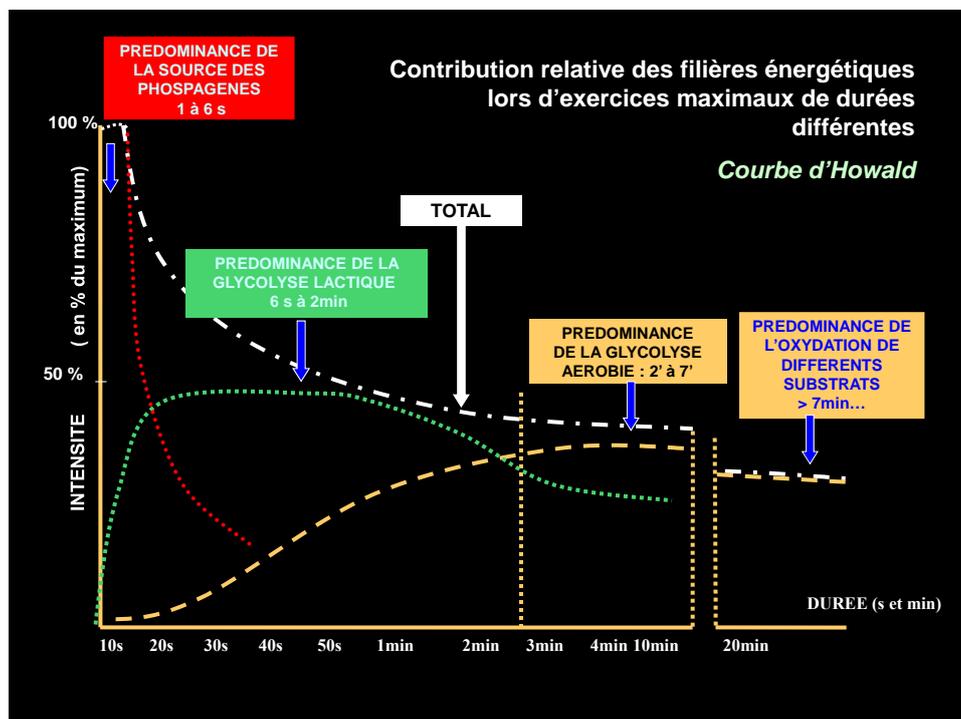
Comment caractériser les différents métabolismes? C'est définir:

- **inertie**: « lenteur » d'entrée en activité
- **puissance**: nombre de molécules d'ATP/s qu'il peut synthétiser = débit énergétique (quantité d'énergie par unité de temps)
- **capacité**: quantité totale de molécules d'ATP resynthétisées = quantité maximale de travail pouvant être effectué grâce à ce métabolisme
- + vitesse de récupération des métabolismes (surtout pour l'anaérobie): reconstitution des stocks de PCr et vitesse d'élimination de l'acide lactique.

Une filière sera prépondérante selon le type d'effort produit (fonction de la durée et de l'intensité de celui-ci).



MAIS: ces systèmes se chevauchent dans le temps. Ils ne se juxtaposent pas !

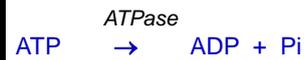


II. La filière des phosphagènes : « anaérobie alactique »

Pas de présence d'oxygène et pas de formation d'acide lactique

1. Réactions biochimiques :

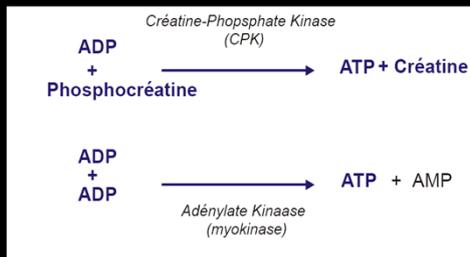
- Hydrolyse de l'ATP
- + 2 autres réactions



Phosphocréatine: (créatine-P)

peut rapidement céder son groupement P à l'ADP pour reformer de l'ATP

. Hydrolyse de l'ADP



II. La filière des phosphagènes : « anaérobie alactique »

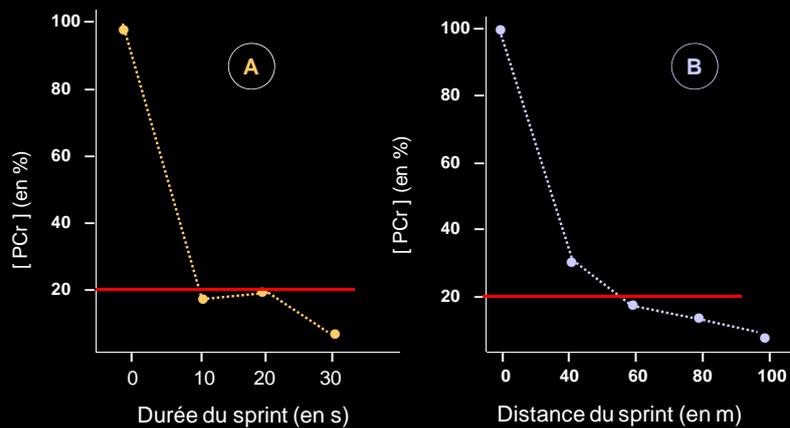
2. Inertie - puissance:

- Inertie très faible : puissance max quasi instantanée (donc lors d'exercices courts très intenses et en début d'exercice)
- Puissance max très élevée

Ainsi par exemple, cette puissance permet de produire, sur **bicyclette**, une puissance **mécanique** de 800 à 1000 W chez l'homme adulte moyen et plus de 2000 W chez les meilleurs.

II. La filière des phosphagènes : « anaérobie alactique »

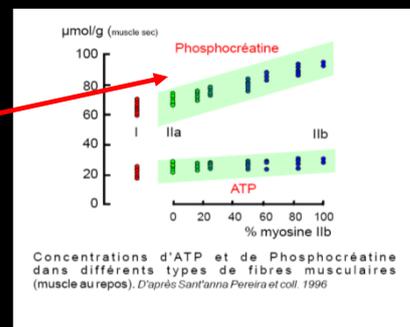
3. Capacité et resynthèse:



II. La filière des phosphagènes : « anaérobie alactique »

3. Capacité et resynthèse:

- Capacité très faible: faible quantité de PCr : **quelques secondes à puissance max**
- Facteurs limitant :
 - . Quantité de PCr: elle est supérieure dans fibres musculaires rapides (de type II)
 - . quantité et activité de CPK et Adénylate Kinase : supérieures dans les fibres II



II. La filière des phosphagènes : « anaérobie alactique »

3. Capacité et resynthèse:

- Resynthèse de PCr : dans la phase de récupération dans les 30 sec à 6-7 min :
84 % en 2 min
- La resynthèse de PCr est indissociable d'un apport suffisant d'oxygène

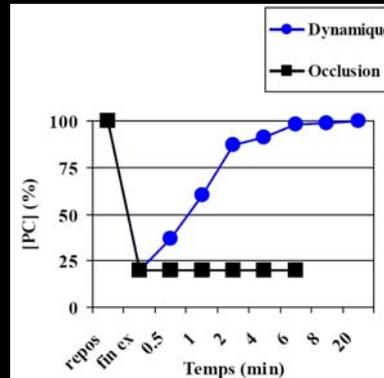


Tableau résumé: phosphagènes

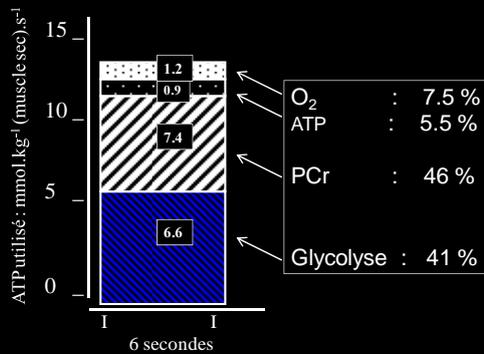
SOURCE D'ENERGIE	SUBSTRATS	PRODUCTION D'ATP	DELAI DE PRODUCTION OPTIMALE	CAPACITE	PUISSANCE	ENDURANCE
IMMEDIATE <i>Phosphagènes</i> ANAEROBIE ALACTIQUE	ATP + PCr	TRES FAIBLE 1 PCr = 1 ATP	NUL	TRES FAIBLE 20 - 60 kJ 65kJ (*)	TRES ELEVEE: 250 à 530 kJ.min ⁻¹ 750 kJ (*) 1 à 3 - 4 s	≤ 15 - 20s dépend du % de puissance max

(*) Sportif spécialiste entraîné et de haut niveau

Cependant...

Exemple d'un exercice maximal de 6 secondes

D'après Gaitanos et al.; J;Appl. Physiol, 1993



Donc

Dès le début de l'exercice musculaire la glycolyse est mise en jeu, donc **pas d'ALACTIQUE strict.**



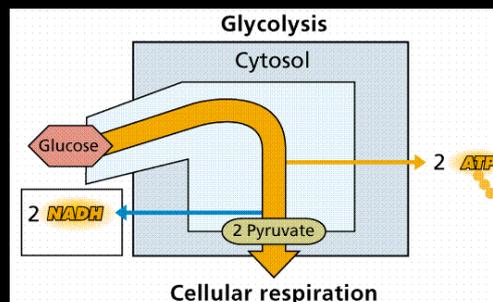
Pas d'intervention unique d'une filière énergétique dans l'apport total de l'énergie mais plutôt une contribution relative de chaque filière énergétique : avec prédominance de l'une d'entre elles

III. La glycolyse « anaérobie » : « anaérobie lactique »

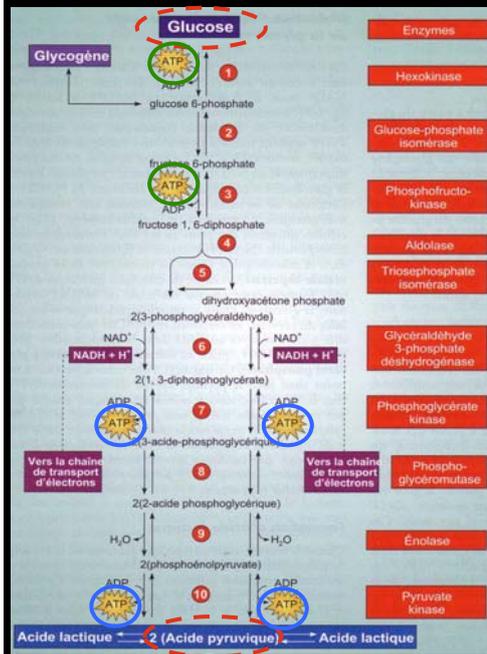
Sans présence d'oxygène + formation d'acide lactique

1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

- Glycolyse: succession de transformations enzymatiques constituant la première étape (avant la respiration cellulaire) qui, à partir du glucose cellulaire, permet de produire des molécules énergétiques



1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:



Synthèse de 2 molécules d'acide pyruvique à partir d'une molécule de glucose.

Lors de la glycolyse, on resynthétise:

. 2 molécules d'ATP à partir d'une molécule de glucose : 4 sont réellement synthétisées mais 2 sont dégradées

. 3 molécules d'ATP à partir du glycogène intra-musculaire

NAD: Nicotine-Adénine-Dinucléotide
= accepteur d'hydrogène

La poursuite de l'exercice grâce à la glycolyse implique la régénération du NAD à partir du NADH+H⁺ formé

Bilan de la glycolyse



↓ 10 enzymes



Énergie nette : 4 - 2 = 2 ATP

1 glucose = 686 kcal et 1 ATP = 7,3 kcal
Donc : 2 ATP x 7,3 kcal :
R=14,6 kcal / 686 kcal = 2 %

Rendement très faible

Que devient l'acide pyruvique?

En présence d'oxygène (aérobie)

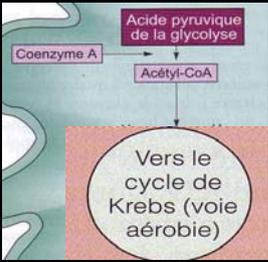
En l'absence d'oxygène (anaérobie)

Vers le cycle de Krebs (voie aérobie)

Acide lactique

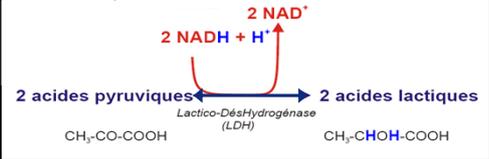
En présence d'oxygène (aérobie)

Les 2 acide pyruvique vont être oxydés



En l'absence d'oxygène (anaérobie)

Acide lactique est créé



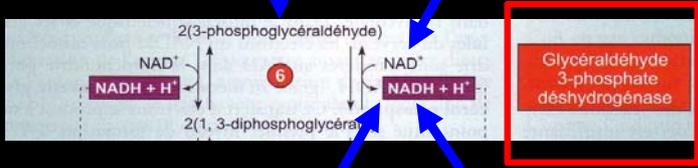
LDH: Lactate déshydrogénase

Qu'est ce qu'une oxydation?

Définitions (sur madoc)

Un élément est dit **oxydé** lorsqu'il perd des atomes d'hydrogènes (et/ou gagne des atomes d'oxygène)

Forme **oxydée** du NAD



Forme **réduite** du NAD

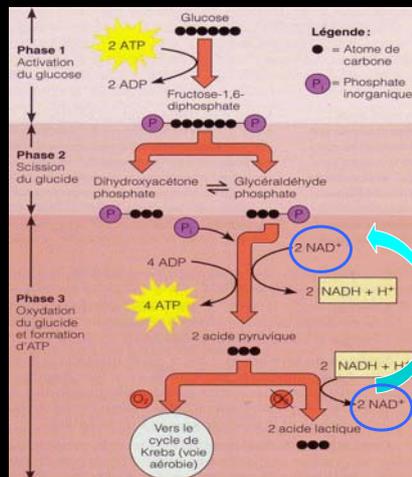
Un élément est dit **réduit** lorsqu'il reçoit des atomes d'hydrogènes

Une enzyme qui est responsable du prélèvement d'atomes d'hydrogènes est appelée **déshydrogénase** (présente dans la glycolyse et le cycle de Krebs)

En résumé...

La production d'acide pyruvique ne nécessite pas d'O₂. La glycolyse est donc par définition anaérobie

Par contre l'oxydation dans la chaîne respiratoire requière de l'O₂



La production d'acide lactique a pour but de régénérer des composés oxydés (NAD⁺) afin de réalimenter la glycolyse

Si la voie aérobie n'a pas eu le temps de se mettre en place (exercice brefs) ou qu'elle ne peut plus fournir suffisamment d'énergie car elle est sollicitée proche de son maximum (exercice intenses), une partie de l'ATP est produite par la filière anaérobie.

2. Inertie - puissance:

- Inertie faible : puissance max très rapidement (10-20 sec)
- Puissance max élevée : mais environ 2 fois < aux phosphagènes

3. Capacité et tolérance à l'acide lactique:

- Facteur limitant :
 - quantité et disponibilité de PFK et LDH
 - **concentration en acide lactique**: en augmentant, le pH intracellulaire chute car l'acide lactique est toujours véhiculé avec des ions H⁺. Ainsi, lors d'un effort violent, plus l'acide lactique s'accumule, plus le pH chute dans la cellule musculaire : **facteur limitant à la poursuite de la contraction musculaire**
- Capacité relativement faible: 4-5 fois celle des phosphagènes : **environ 30 sec à puissance max**

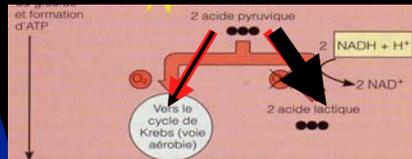


Que devient l'acide lactique? (sur madoc)

2 cas sont à envisager

L'effort est modéré : la voie aérobie peut accueillir l'acide lactique et le métaboliser

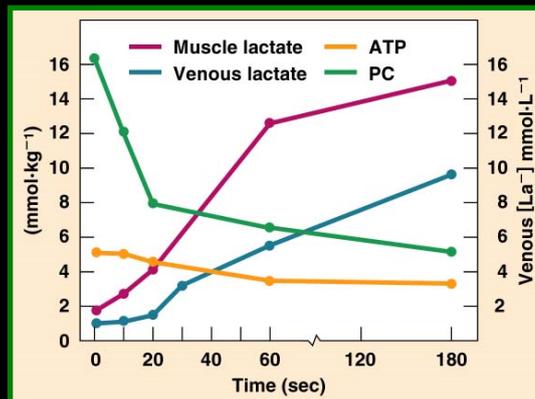
L'effort est violent : la voie aérobie est très sollicitée voire à son maximum et ne peut accueillir l'acide lactique



L'acide lactique formé est oxydé aussitôt : la machinerie reste en « état stable ». L'acide lactique n'est pas un « déchet métabolique » mais une source possible d'énergie

L'acide lactique formé s'accumule progressivement, l'acidité augmente, l'exercice devient de + en + difficile

Après un effort intense, une stratégie pour récupérer est le footing de récupération: l'acide lactique accumulé va pouvoir être pris en charge par la filière aérobie. La baisse de la lactatémie (reflet indirect du retour à un pH neutre) va engendrer le retour à des conditions meilleures pour la contraction musculaire.



Valeurs maximales de LACTATE sanguin à l'exercice intense

- 100m sprint.....environ 13-17 mmol/l
- 200m sprint.....environ 18-22 mmol/l
- 400, 800 et 1500m.....environ 23-28 mmol/l
- 5000m.....environ 13-15 mmol/l
- 10000m.....environ < 8 mmol/l

Tableau résumé: glycolyse

SOURCE D'ENERGIE	SUBSTRATS	PRODUCTION D'ATP	DELAI DE PRODUCTION OPTIMALE	CAPACITE	PUISSANCE	ENDURANCE
RETARDEE <i>Glycolyse lactique</i> ANAEROBIE LACTIQUE	GLYCOGENE GLUCOSE	FAIBLE 1 GL. = 3 ATP 1 Gluc = 2ATP	COURT: 15 à 20s	FAIBLE 75 - 200 kJ 130 à 210 kJ (*)	ELEVEE: 110 à 200 kJ.min ⁻¹ 500 kJ.min ⁻¹ (*)	Entre 1 et 3min dépend du % de PMA (entre 90 et 140% de PMA ou de VAM)

(*) Sportif spécialiste entraîné et de haut niveau

IV. La voie oxydative « aérobie »

Présence d'oxygène

1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

Le **métabolisme aérobie** correspond à une **combustion** (c'est à dire une **oxydation**) des **glucides, des lipides** et accessoirement des protéines.

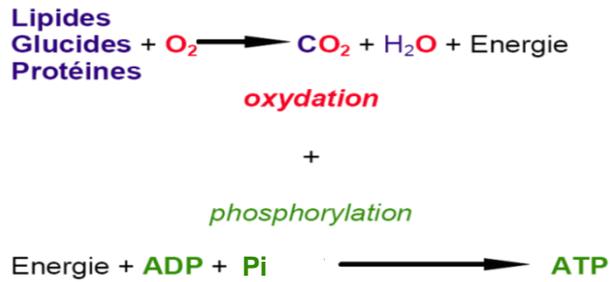
La particularité de ces « combustions lentes » est qu'elles sont couplées avec un processus de phosphorylation de l'ADP en ATP : l'**énergie** des **combustions** est **transformée en ATP**.

1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

Le métabolisme aérobie correspond donc à un processus très complexe appelé **phosphorylations oxydatives**.



mitochondrie

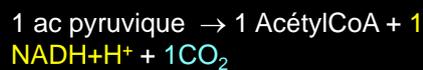


1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

GLUCIDES : GLUCOSE

A. Formation acétyl-coenzyme A

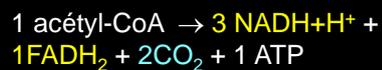
Bilan brut:



B. Cycle de Krebs:

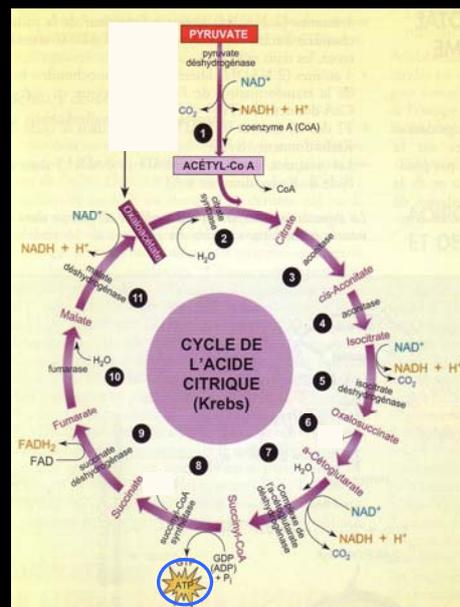
production d'hydrogène utilisable par les chaînes respiratoires (NADH) à partir de l'acétyl-coenzyme A et de CO_2

Bilan brut:



FAD: Flavine-Adénine-Dinucléotide

= accepteur d'hydrogène



1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

Le cycle de Krebs ne produit lui-même que peu d'énergie:

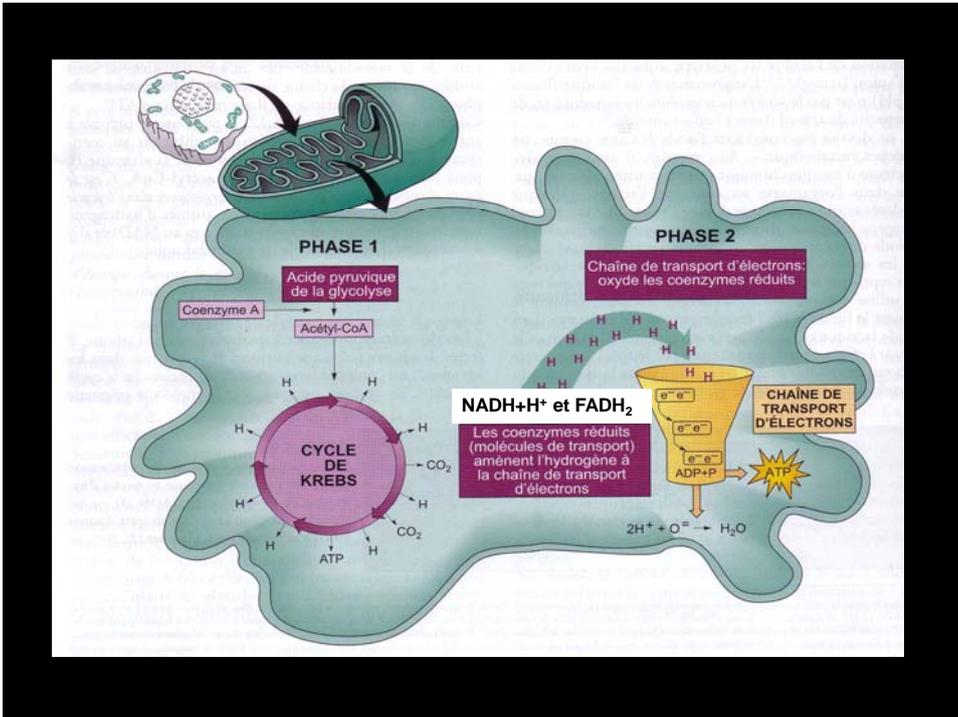
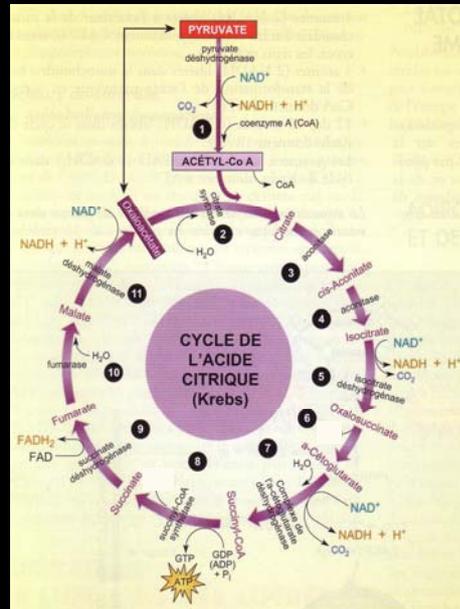
Énergie nette :
 1 ATP/acide pyruvique
 → 2 ATP/glucose

MAIS indirectement il permet la libération d'une grande quantité d'énergie aérobie.

COMMENT ?

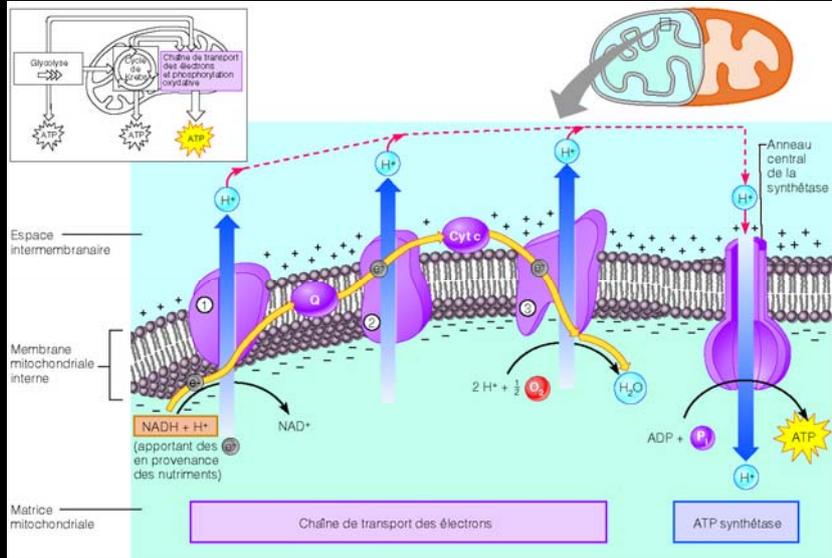
Rôle de NADH+H⁺ et FADH₂

En fait, le cycle de Krebs permet la libération de protons H⁺ qui sont amenés dans la chaîne de transport d'électrons (par NAD et FAD), où est effectivement resynthétisée une grande quantité d'ATP.



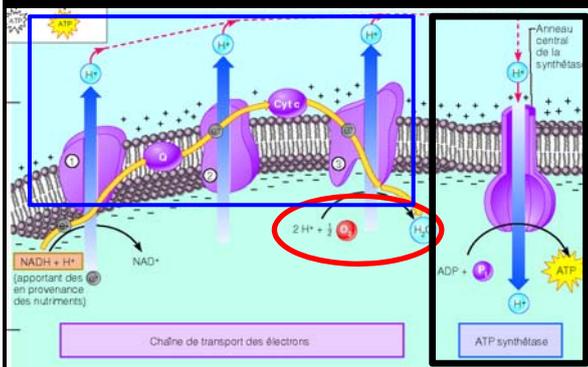
1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

C. Phosphorylations oxydatives au niveau des chaînes respiratoires



1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

C. Phosphorylations oxydatives au niveau des chaînes respiratoires



La libération des électrons à haute énergie du NADH active les « **pompes à H⁺** »

transfert en grande quantité des H⁺ de la matrice vers l'espace intermembranaire

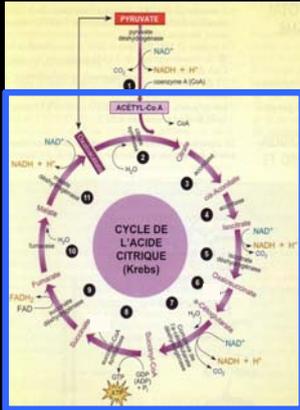
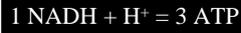
GRADIENT de H⁺
Entrée massive de H⁺

O₂ est l'accepteur final des e⁻ : en se liant aux H⁺ : produit H₂O

L'ATP-synthétase utilise le gradient d'énergie pour produire de l'ATP

1. Réactions biochimiques et bilan énergétique:

Bilan énergétique



Phosphorylations oxydatives

9 ATP

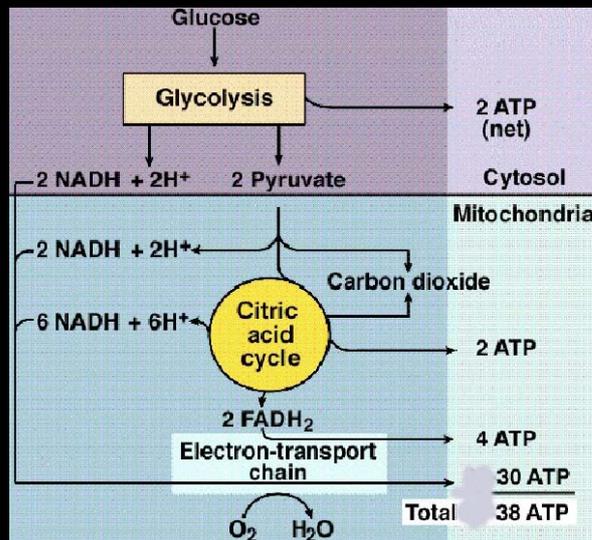
2 ATP

11 ATP/acétyl-CoA

AU TOTAL

GLUCIDES : GLUCOSE

- Glycolyse
- Cycle de Krebs
- Transport d'électrons & phosphorylation oxydatives



Énergie nette:
38 ATP /glucose
39 ATP/glycogène

GLUCIDES : GLUCOSE

Pour 1 glucose:



1 glucose = 686 kcal & 1 ATP = 7,3 kcal

38 ATP x 7,3 = 277 kcal

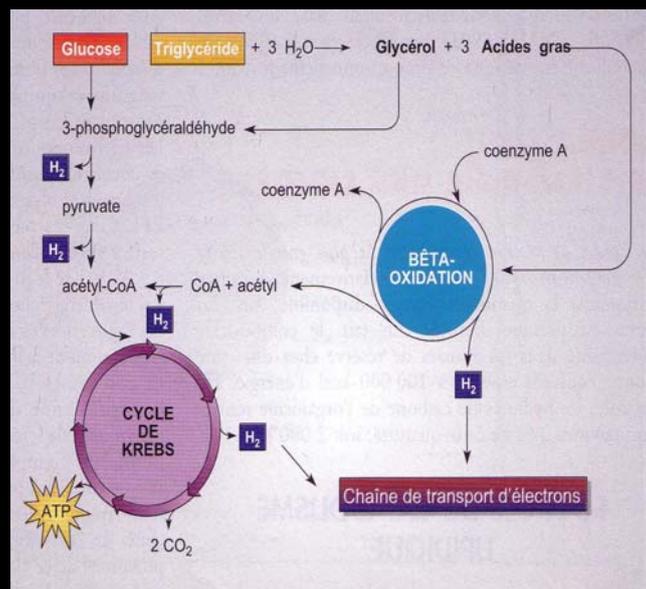
➔ Rendement = $(277 \text{ kcal} / 686 \text{ kcal}) \times 100 = 40 \%$ (donc 60% de chaleur)

(18 fois plus que la glycolyse !!)

Rendement élevé

Mais aussi

LIPIDES: triglycérides



LIPIDES: triglycérides

A. Etape d'activation:

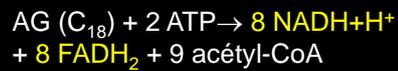


B. β -oxydation ou hélice de Lynen :

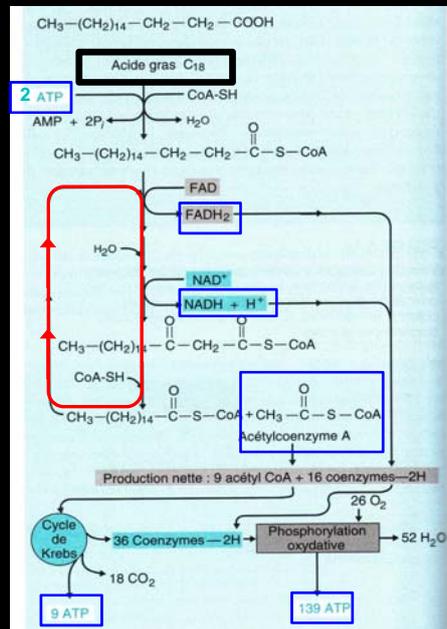
Pour chaque tour:

- 1 FADH_2
- 1 $\text{NADH} + \text{H}^+$
- 1 AcétylCoA

Bilan brut pour AG (C_{18}):

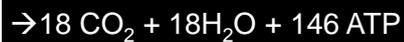
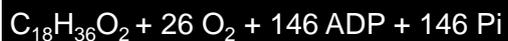


Énergie nette :
146 ATP/AG (en C_{18})



LIPIDES: triglycérides

Pour 1 AG (en C_{18}):



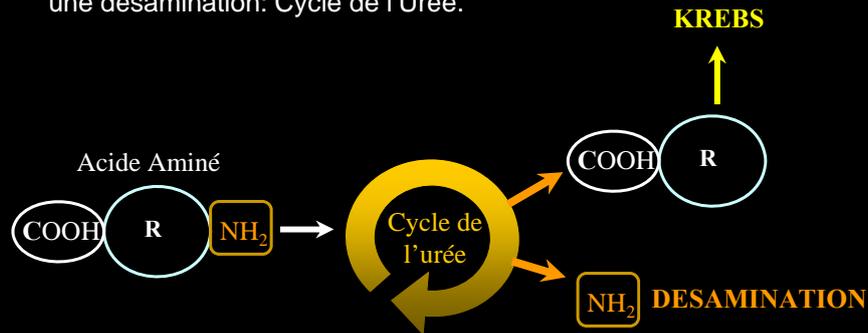
Les acides gras fournissent plus d'énergie que le glucose

Et de façon annexe:

Protéines: Acides aminés

(sur madoc)

- Après destruction des protéines, les acides aminés libérés peuvent rejoindre le cycle de Krebs selon différentes voies.
- Préalablement, ils doivent subir une désamination: Cycle de l'Urée.

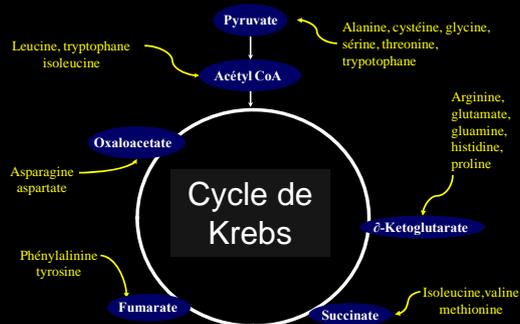


Protéines: Acides aminés

(sur madoc)

Que dans certaines conditions extrêmes :

efforts très longs (ultramarathon, trail, raid, etc.), période de surentraînement, alimentation inadaptée à la charge d'entraînement, etc.

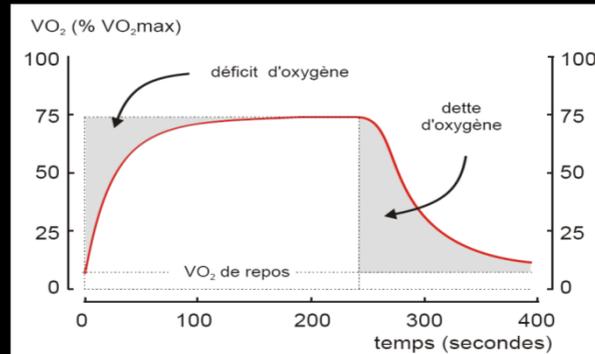


Le recours à cette voie métabolique n'est pas « intéressant » sur le plan physiologique car :

- le muscle est dégradé,
- l'azote issu des protéines est éliminé par l'urine. Ceci accroît les pertes hydriques (non profitable durant un effort)

2. Inertie - puissance:

- Inertie importante : puissance max requiert l'adaptation des paramètres ventilatoires et cardio-vasculaires (1-2 min)



Par exemple, au cours d'un exercice de pédalage à puissance maximale, la consommation d'oxygène atteint déjà 75% de VO_{2max} au bout de 30 secondes et près de 100% de VO_{2max} en environ 90 secondes.

2. Inertie - puissance:

- Inertie importante : puissance max requiert l'adaptation des paramètres ventilatoires et cardio-vasculaires (1-2 min)
- Puissance max plus faible (2-3 fois moins que la Glycolyse):
Puissance Maximale Aérobie (PMA) = débit maximal de consommation d'oxygène (VO_{2max} en L d' O_2 /min): dépend de nombreux facteurs: Débit cardiaque max, nombre de mitochondries..... (cf cours L2)

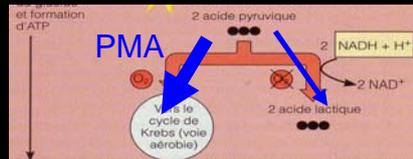
3. Capacité:

Elevée mais dépend directement du % de PMA maintenue

- À PMA : 4 à 8 min (1000 à 2000 m)
Facteur limitant : accumulation d'acide lactique: la glycolyse à PMA fournit déjà des quantités importantes d'acide lactique car la voie aérobie n'accepte pas les quantités suffisantes d'acide pyruvique au niveau du cycle de Krebs

À 100% de PMA

La voie aérobie est sollicitée à son maximum et ne peut accueillir tout l'acide pyruvique



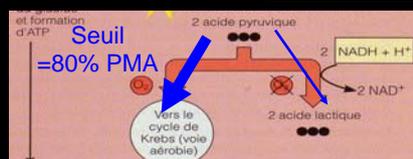
L'acide lactique formé s'accumule progressivement, l'acidité augmente, l'exercice devient de + en + difficile

3. Capacité:

- En dessous mais à des % élevés de PMA :
 - . Entre 80% et 100% de PMA: 10min (3000 m) à 40 min (10 km)
 - . Facteur limitant: accumulation de l'acide lactique
- Notion d'**endurance aérobie** et de **seuil anaérobie**

AU SEUIL ANAEROBIE :
environ 80% de PMA

la voie aérobie est fortement sollicitée (mais pas encore à son maximum) : une petite partie de l'acide pyruvique est transformée en acide lactique



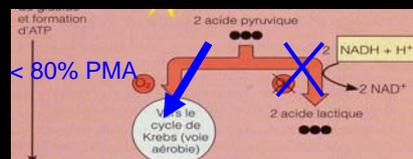
L'acide lactique formé est rejeté dans le sang puis éliminé: la lactatémie augmente mais se stabilise (< à 4 mmol/l) : l'acidité n'augmente pas

3. Capacité:

- En dessous mais à des % élevés de PMA :
 - . Entre 80% et 100% de PMA: 10min (3000 m) à 40 min (10 km)
 - . Facteur limitant: accumulation de l'acide lactique
 - Notion d'**endurance aérobie et de seuil anaérobie**
- En dessous de 80% de PMA :
 - . En théorie « illimité »
 - . Mais des facteurs limitant selon l'intensité:
 - . **réserve énergétique de glycogène: environ 1h30 à 70-80% de PMA**
 - . hydratation
 - . endurance musculaire locale
 - . thermorégulation....

< 80% de PMA:
Filière aérobie uniquement

La voie aérobie est sollicitée (loin de maximum) : l'acide pyruvique part dans les mitochondries et va être oxydé:



L'acide lactique formé est très faible : la lactatémie augmente un peu mais se stabilise (à des valeurs comprise entre 1 et 3 mmol/l) : l'acidité n'augmente pas

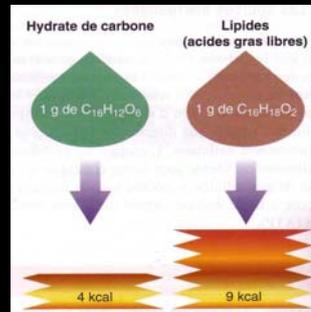
Les lipides, principal stock d'énergie de l'organisme (sur madoc)

Ils représentent la plus grande source d'énergie potentielle de l'organisme.

La quantité d'énergie disponible dans les graisses est presque illimitée.

Deux raisons l'expliquent :

A. L'équivalent énergétique des lipides est élevé.



B. Les stocks de graisses sont très importants.

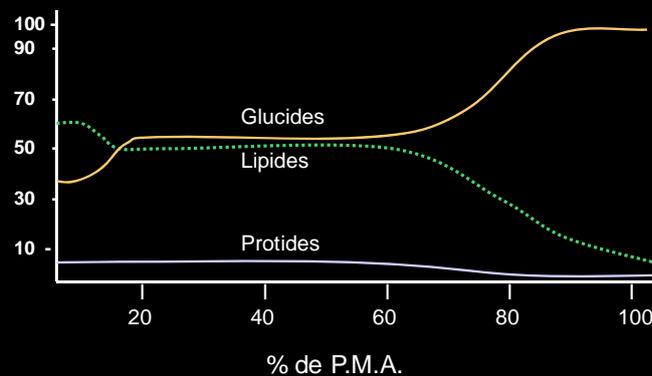
Stock de glucides (foie et muscles) = 500 g
Stock de lipides = 10 kg

Réserve d'énergie d'origine glucidique = 2000 kcal
Réserve d'énergie d'origine lipidique = 90 000 kcal



Utilisation Glucides / Lipides à l'exercice

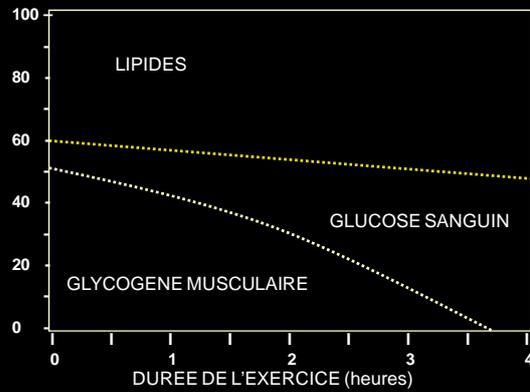
A. INFLUENCE DE LA PUISSANCE RELATIVE DE L'EXERCICE SUR LA CONTRIBUTION DES SUBSTRATS A L'APPORT D'ENERGIE



➡ Plus l'intensité augmente plus on sollicite les glucides

Utilisation Glucides / Lipides à l'exercice

B. INFLUENCE DE LA DUREE D'EXERCICE A INTENSITE CONSTANTE SUR LA CONTRIBUTION DES SUBSTRATS A L'APPORT D'ENERGIE

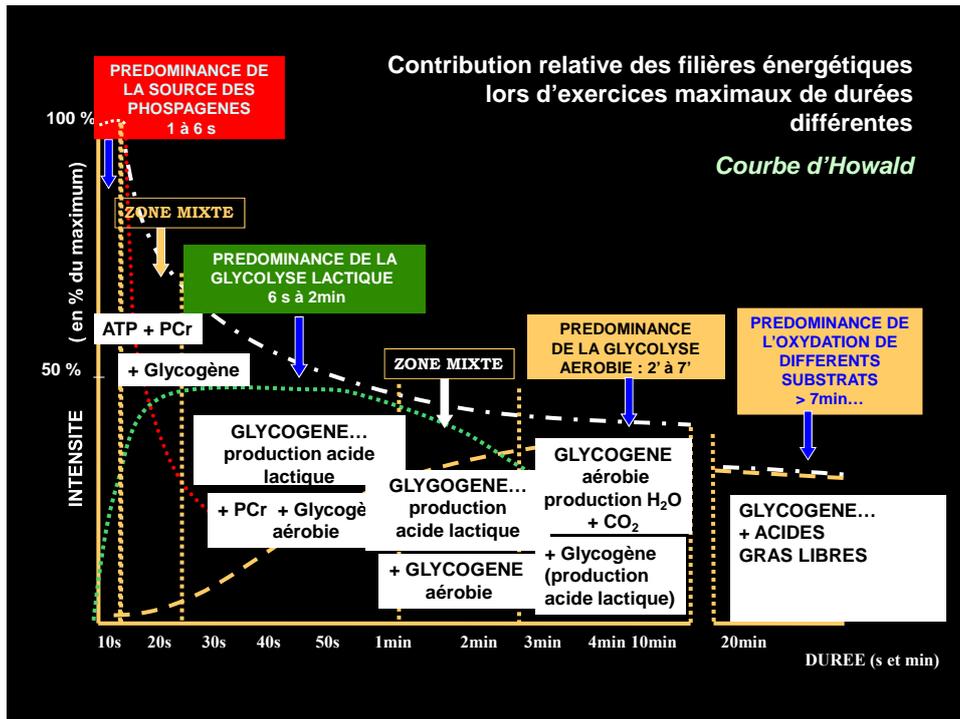


➔ Plus la durée augmente plus on sollicite les lipides et les sources externes de glucides (glucose sanguin)

Tableau résumé: voie oxydative

SOURCE D'ENERGIE	SUBSTRATS	PRODUCTION D'ATP	DELAI DE PRODUCTION OPTIMALE	CAPACITE	PUISSANCE	ENDURANCE
TRES RETARDEE <i>Oxydative</i> AEROBIE	GLYCOGENE + GLUCOSE + AGL + AA	TRES IMPORTANTE 1 GL. = 39 ATP ...	LONG : 1 à 3 min 1 à 1.30 min (*)	TRES ELEVEE: 1500 à 5300 kJ 45000 à 80000 kJ (*)	FAIBLE : 60 à 90 kJ.min ⁻¹ 135 à 155 kJ.min ⁻¹ Peut être maintenue de 3 à 15 min	Dépend du % de VO ₂ max Sollicité (entre 70 et 90% de VAM)

(*) Sportif spécialiste entraîné et de haut niveau



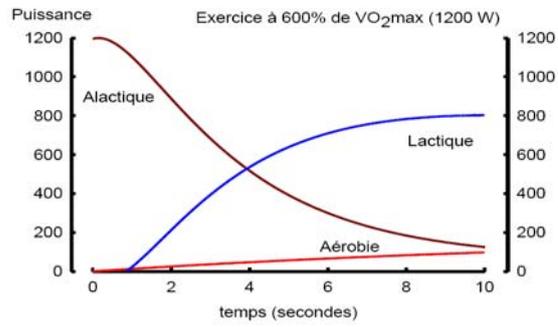
POURCENTAGES DE CONTRIBUTION DANS LA PRODUCTION D'ATP

D'après Newsholme et coll. (1992)

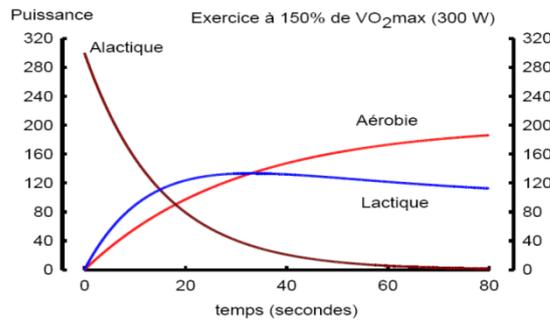
(sur madoc)

Courses (m)	PCr (%)	Anaérobie (%)	Aérobie (%)
100 m	48	48	4
200 m	25	65	10
400 m	12.5	62.5	25
800 m	6	50	44

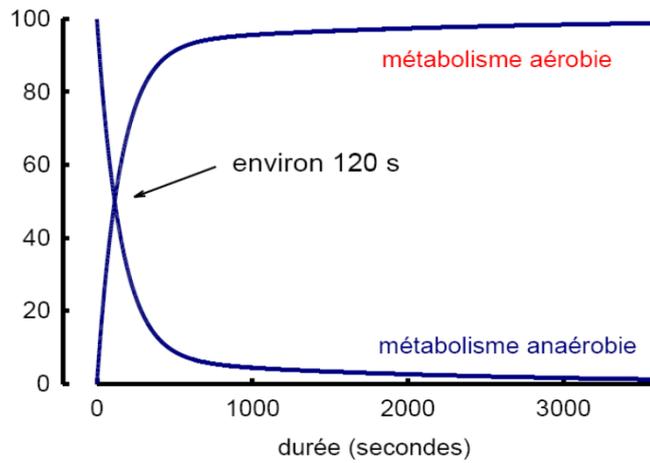
Un sprint
1200 W: 10s



Un effort intense
supramaximal
300 W: 1'20
(PMA=200W)



% dépense énergétique



POURCENTAGES DE CONTRIBUTION DANS LA PRODUCTION D'ATP

D'après Newsholme et coll. (1992)

(sur madoc)

Courses (m)	PCr (%)	Anaérobie (%)	Aérobie (%)
100 m	48	48	4
200 m	25	65	10
400 m	12.5	62.5	25
800 m	6	50	44
1500 m	(*)	25	75
5 000 m	(*)	12.5	87.5
10 000 m	(*)	3	97
42 195 m	(*)	1	99
80 000 m	(*)	—	100

(*) : Dans ces épreuves la PCr est utilisée dans les premières secondes et, si elle est resynthétisée pendant la course, elle servira aussi pour l'accélération finale.