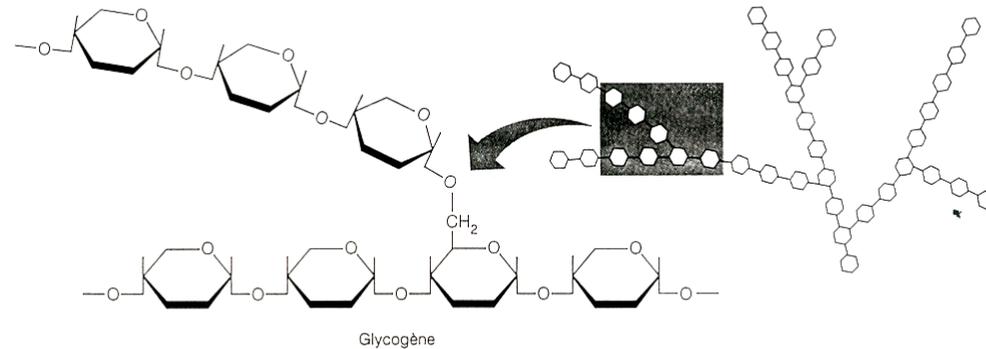
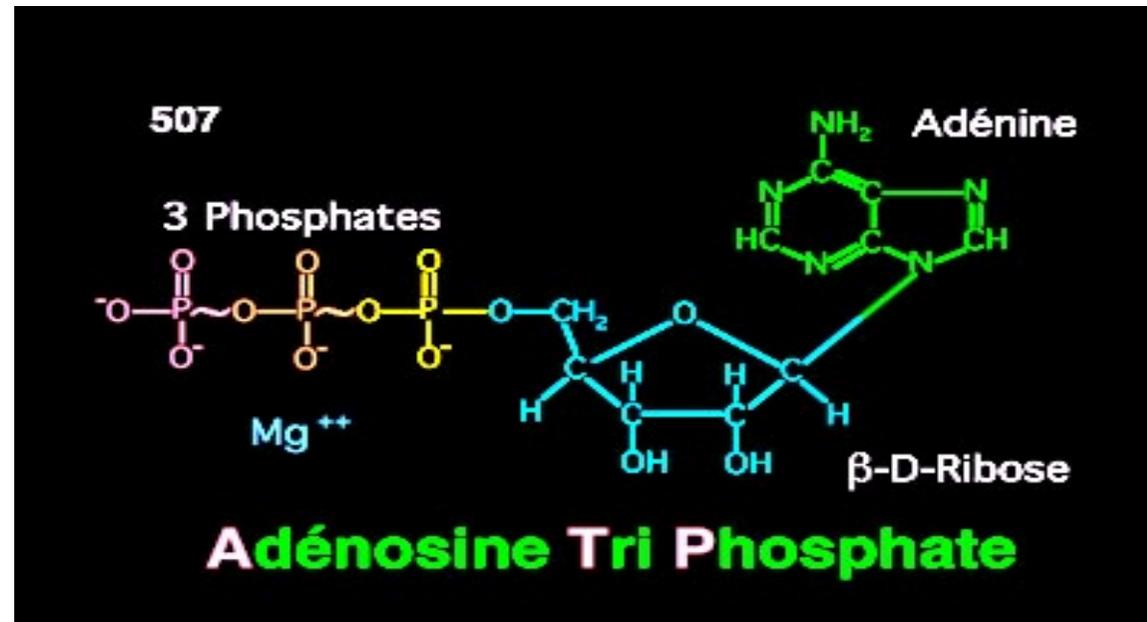


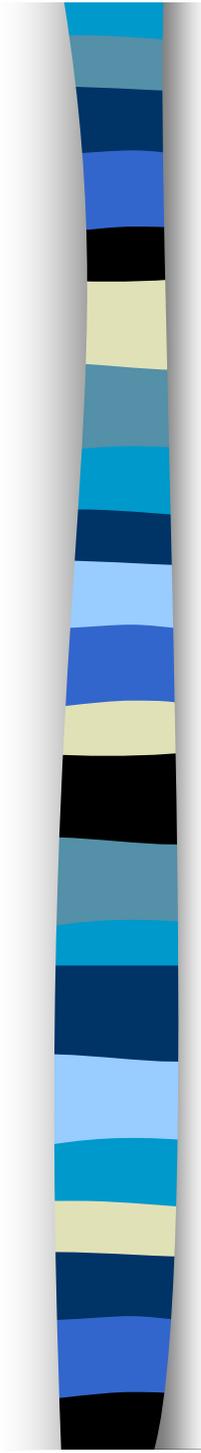
# Utilisation des substrats énergétiques à l'effort



## I) 1) Rappel : l'ATP

Toute contraction musculaire nécessite l'hydrolyse des molécules d'ATP en ADP + Pi





## Les concentrations basales d'ATP

- comprises entre 4,5 et 6,7 mmol.kg<sup>-1</sup> de poids frais (soit moins de quelques secondes d'exercice)
- peu de différence entre les groupes musculaires
- concentrations légèrement supérieures dans les fibres de type II

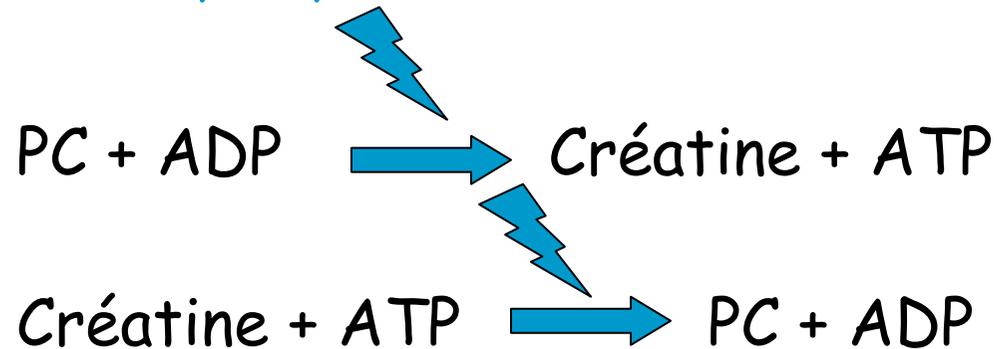
L'ADP doit être rapidement rephosphorilé afin d'assurer la réplétion des réserves en ATP et permettre la poursuite de la contraction.

## 2) Réplétion des réserves d'ATP

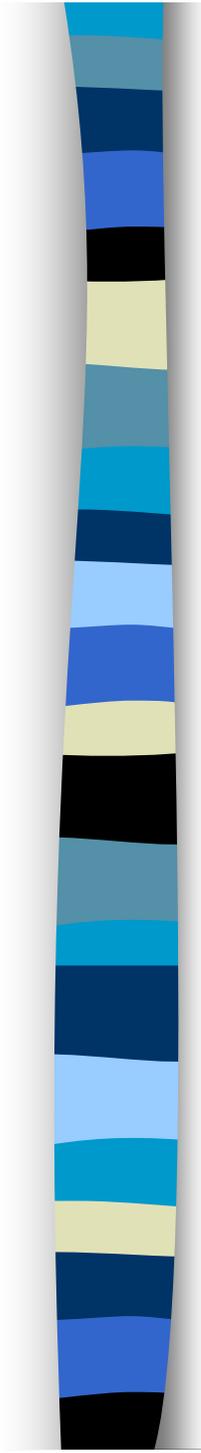
La synthèse rapide d'énergie peut provenir :

### A) Réserves en phosphorylcréatine (PC)

Phosphorylcréatine Kinase (PCK)



La créatine = arginine + glycine  $\xrightarrow{\text{foie}}$  muscle  
 $\xrightarrow{+ Pi} PC$



## Concentrations basales en PC

- comprises entre 14 et 20 mmol.kg<sup>-1</sup> de poids frais.

3 fois sup. à celles d'ATP.

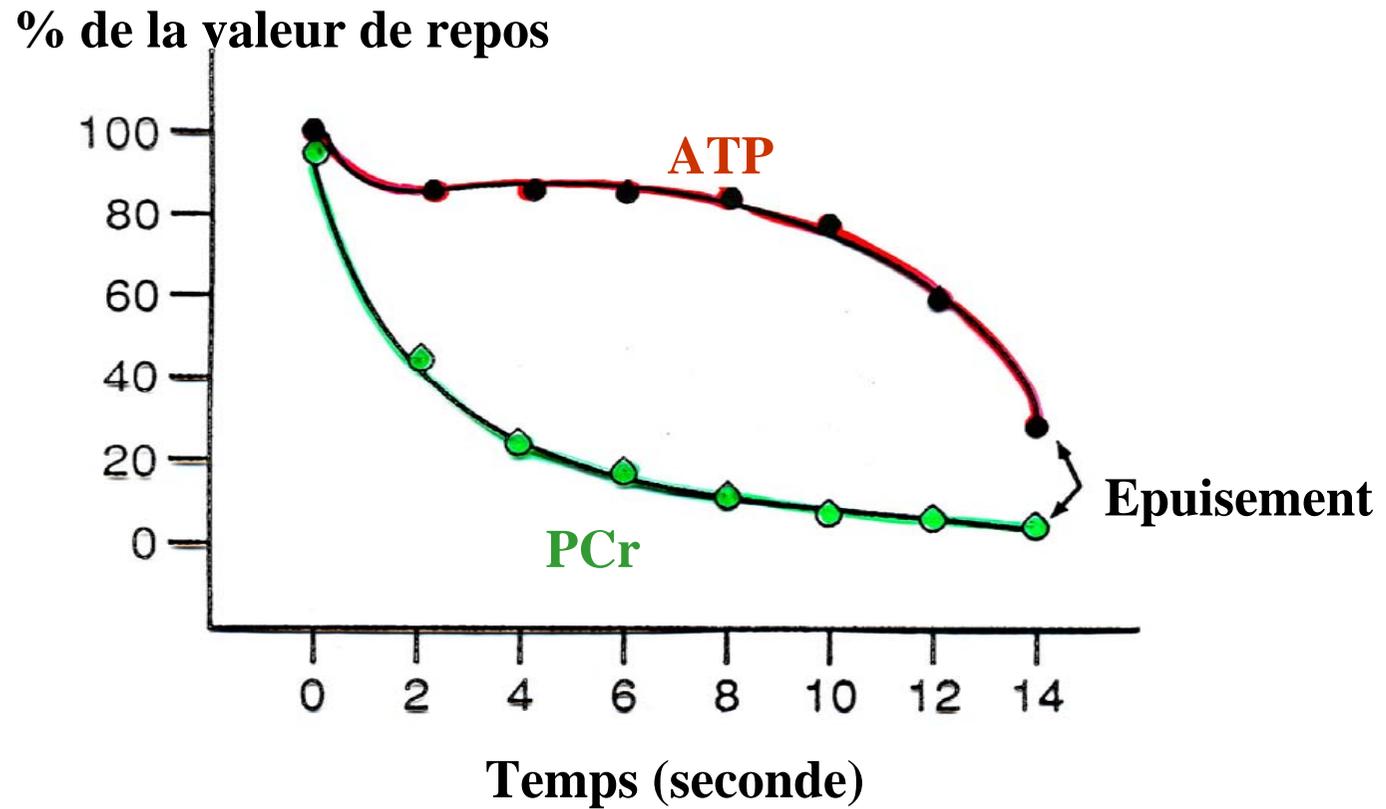
Epuisées en 10 s lors d'un exercice max et 20 à 30 s à 70% de VO<sub>2</sub>max.

- peu de différence entre les groupes musculaires

- concentrations légèrement supérieures dans les fibres de type II

Des observations ont permis d'affirmer que la déplétion en PC est en relation avec la performance : intérêt d'une supplémentation en créatine ???

# Exercice de sprint



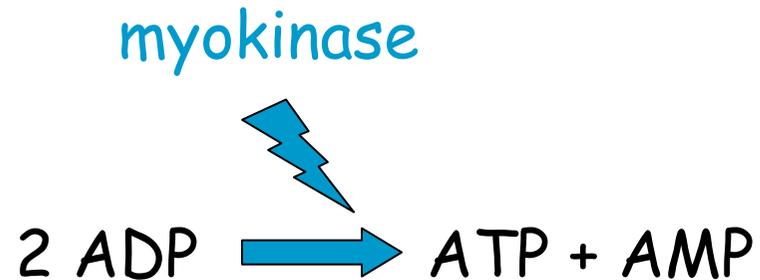
# Effets de l'entraînement sur les concentrations en ATP et PC

Les études sont discordantes :

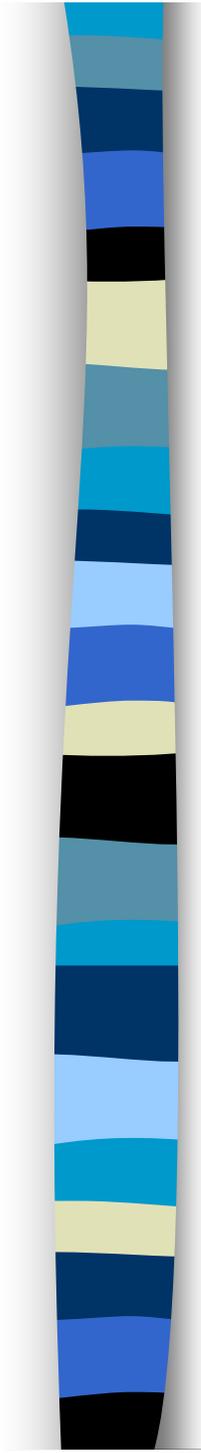
Substrat	Avant	Après	Conditions	Références
ATP	3,8 ± 0,2	4,5 ± 0,2*	3 mois, aérobie	Karlsson et coll. (1972)
	5,5 ± 0,2	6,1 ± 0,5*	5 mois, force	MacDougall et coll. (1977)
	5,0 ± 0,2	4,0 ± 0,2	6 sem, force	Grimby et coll. (1973)
	6,2 ± 0,8	5,6 ± 0,7	2 mois, vitesse	Nevill et coll. (1989)
PC	16,9 ± 0,8	18,4 ± 0,5	3 mois, aérobie	Karlsson et coll. (1972)
	16,7 ± 0,2	17,2 ± 0,5*	5 mois, force	MacDougall et coll. (1977)
	17,8 ± 0,8	16,8 ± 1,3	6 sem, force	Grimby et coll. (1973)
	19,5 ± 2,5	19,3 ± 1,0	2 mois, vitesse	Nevill et coll. (1989)

## B) La myokinase

Cette enzyme assure la reconversion de l'ADP en ATP.



L'AMP va être catabolysée en divers déchets azotés comme l'ammoniaque.



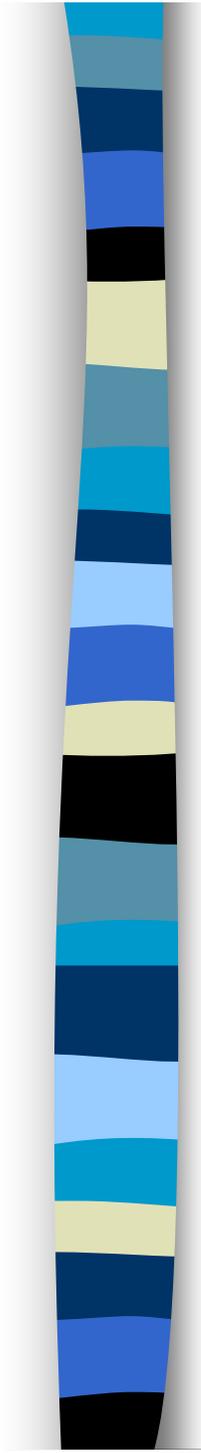
### 3) Le métabolisme des glucides

Les glucides sont des molécules organiques composées d'atomes de carbone. Le glucose contient 6 C.

Le glucose est absorbé au niveau du tube digestif, et se répartit dans différents organes comme le foie, le cerveau, les muscles.

La glycémie à jeûn au repos se situe aux environs de  $4,6 \pm 0,4$  mmol/l.

Des transporteurs spécifiques (GLUT-4) vont faire passer le glucose dans les cellules sensibles à l'insuline



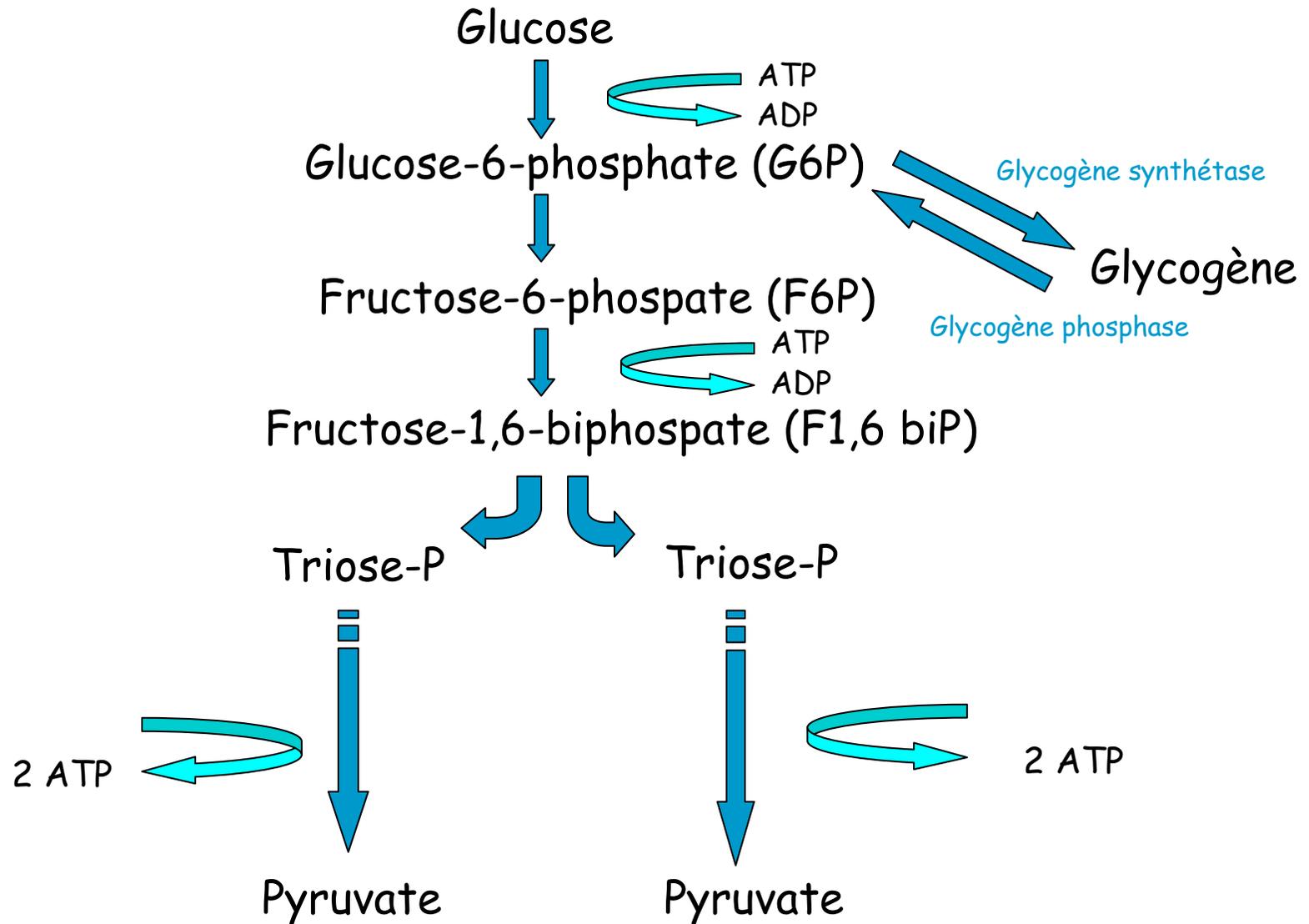
## 4) Le catabolisme du glucose: la glycolyse

C'est la voie de transformation du glucose en pyruvate au niveau cytosolique.

C'est une voie anaérobie.

Elle est stimulée par le manque d'ATP, et inhibée par l'augmentation de la concentration en  $H^+$

Elle commence à produire de l'ATP au bout de 1,5 s

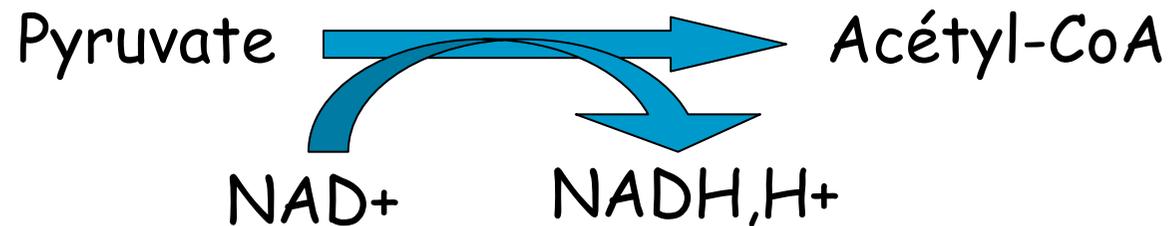


Bilan : 1 glucose  $\longrightarrow$  2 ATP (4 produits et 2 utilisés),  
2 pyruvates et 2 NADH,H<sup>+</sup>

## 5) Le devenir du pyruvate

### A) Conditions normales d'oxygène

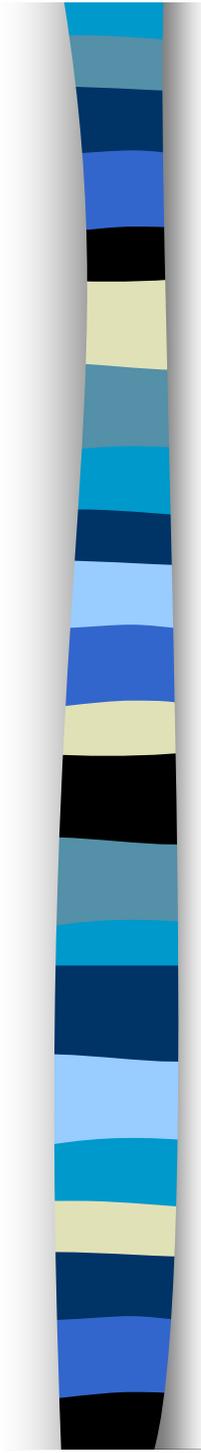
Le pyruvate entre dans la mitochondrie, où il est oxydé et décarboxylé en acétyl-CoA.



L'acétyl-CoA est encore riche en énergie: il va entrer dans le cycle de Krebs

Bilan de l'oxydation complète du glucose = 38 ATP

Bilan de la glycogénolyse = 39 ATP



## Le cycle de Krebs

Dans les cellules aérobies, c'est une plate-forme commune au catabolisme des substrats énergétiques. Il a lieu dans la matrice mitochondriale.

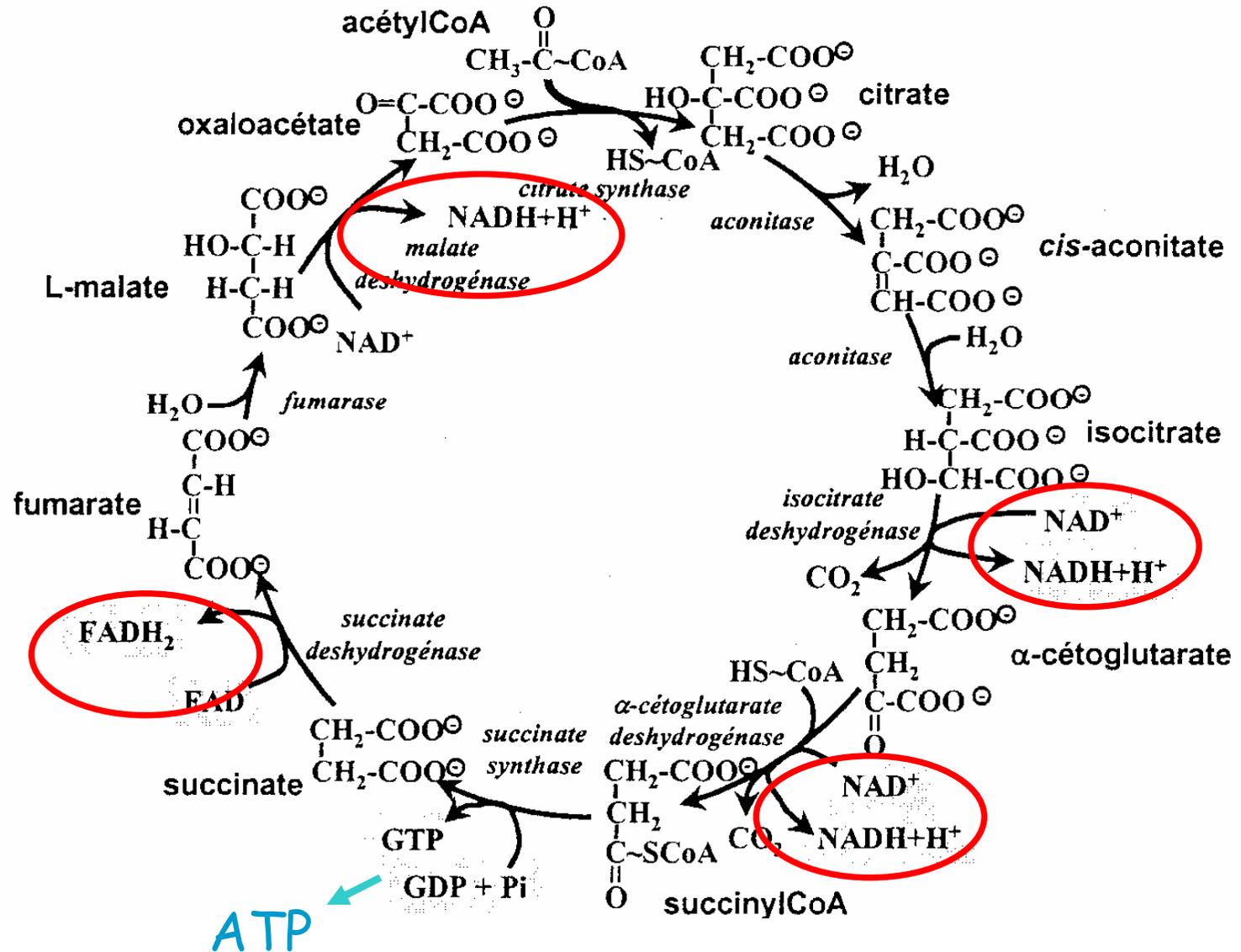
C'est un ensemble de 8 réactions qui permet d'extraire l'énergie de l'acétyl-CoA.

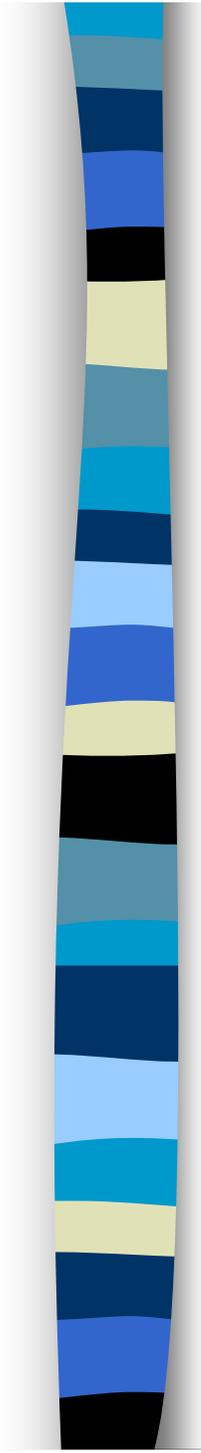
Un cycle produit 1 ATP, mais surtout, il va réduire 3 NAD<sup>+</sup> et 1 FADH en 3 NADH,H<sup>+</sup> et 1 FADH<sub>2</sub>.

C'est une machine à capter les électrons.

Les coenzymes réduits NADH,H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub> vont permettre la synthèse d'ATP dans la chaîne respiratoire.

# Cycle de Krebs



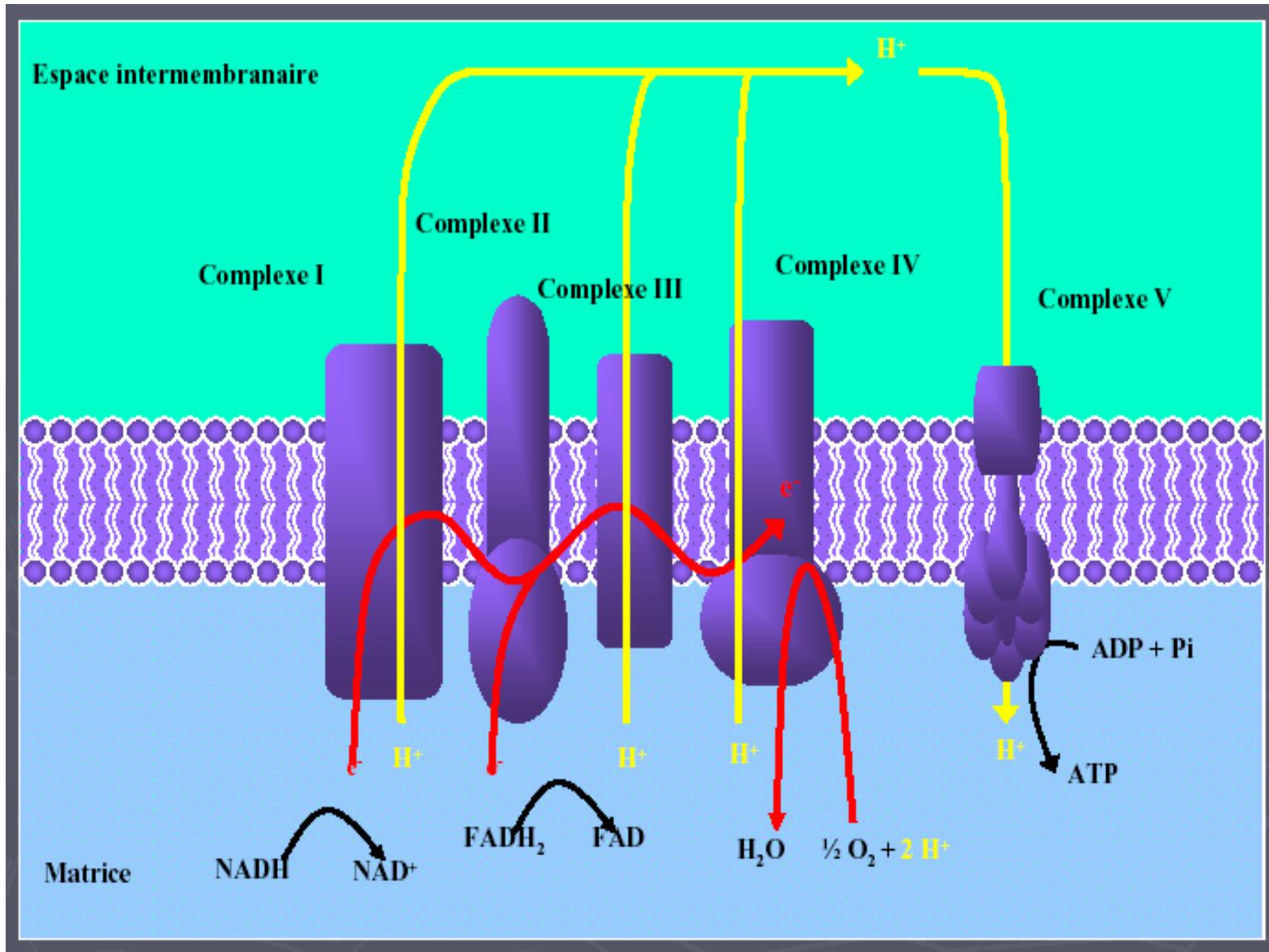


## La chaîne respiratoire

Elle est localisée dans la membrane interne des mitochondries.

Elle produit de l'ATP et de l'eau à partir de l'hydrogène des coenzymes réduits et à partir de l'oxygène.

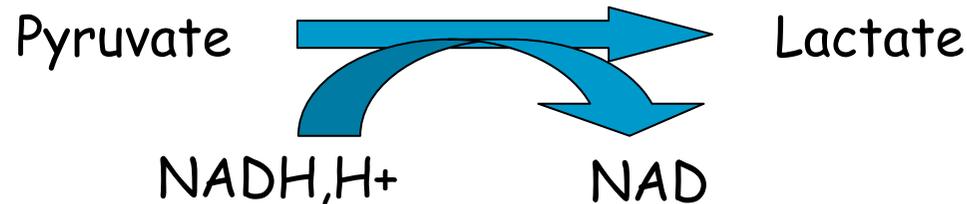
Cette chaîne d'oxydoréduction transfère les protons et électrons des CR. Il va se créer un gradient de électrochimique de protons, qui va être à l'origine de la formation d'ATP.



## B) Conditions de faible oxygénation

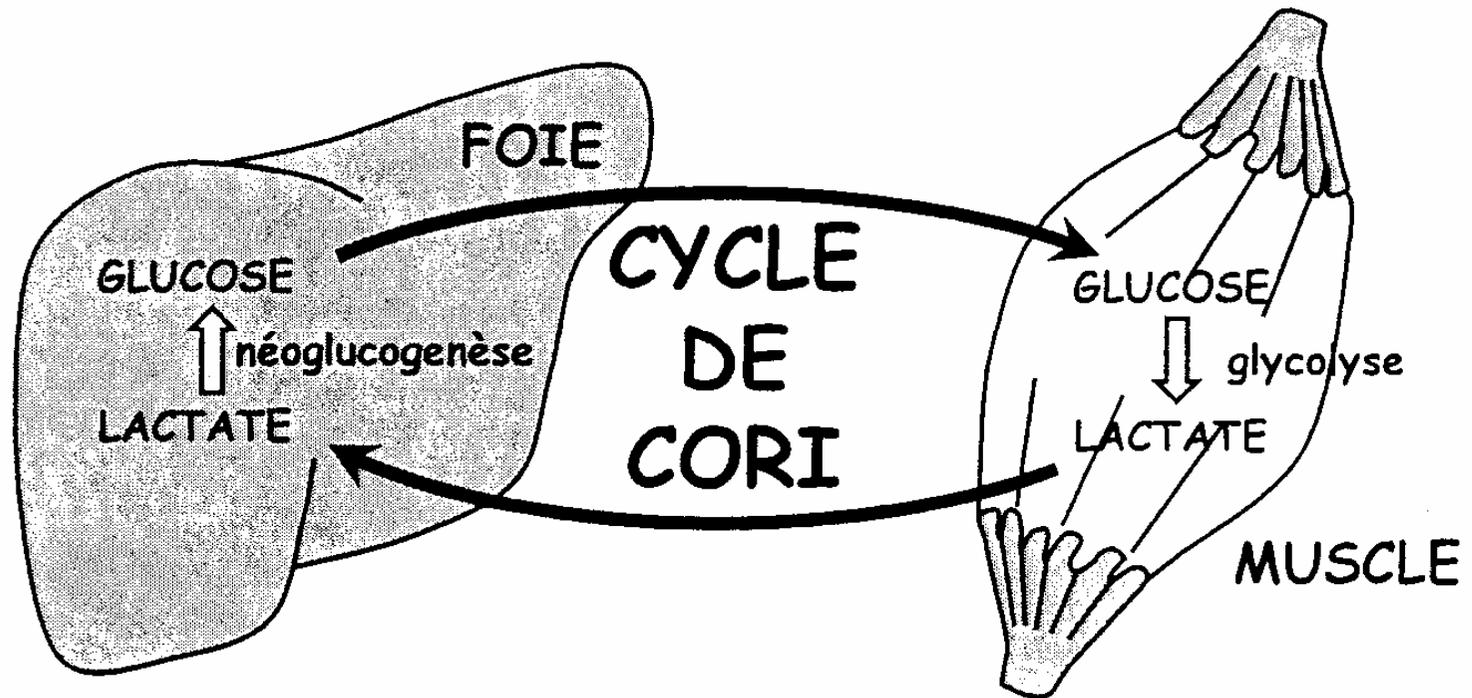
Lorsque les cellules ne possèdent pas de mitochondries (GR), dans les cellules peu vascularisées, dans le muscle squelettique, lors de l'effort intense.

Le pyruvate est réduit en lactate dans le cytosol (grâce à la lactate-déshydrogénase - LDH), qui va diffuser dans le sang.



- il sera transformé en pyruvate, puis acétyl-CoA dans la majorité des tissus.
- il sera transformé en glucose dans le foie : néoglucogénèse lactique, le cycle de Cori.

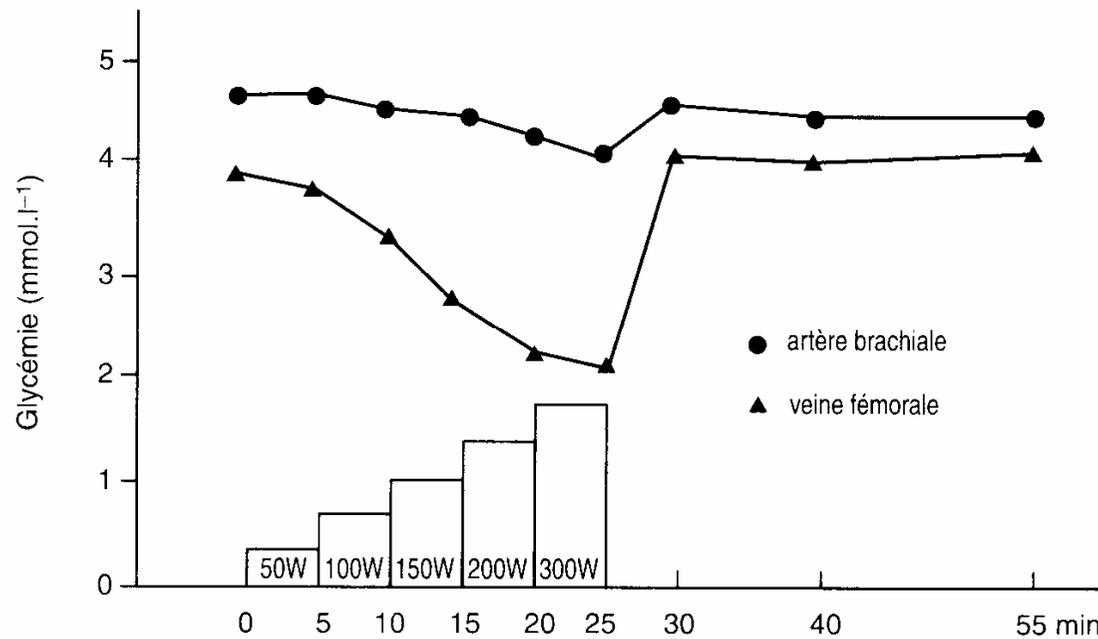
# FERMENTATION LACTIQUE



50-60% du lactate seulement

## 6) Utilisation du glucose

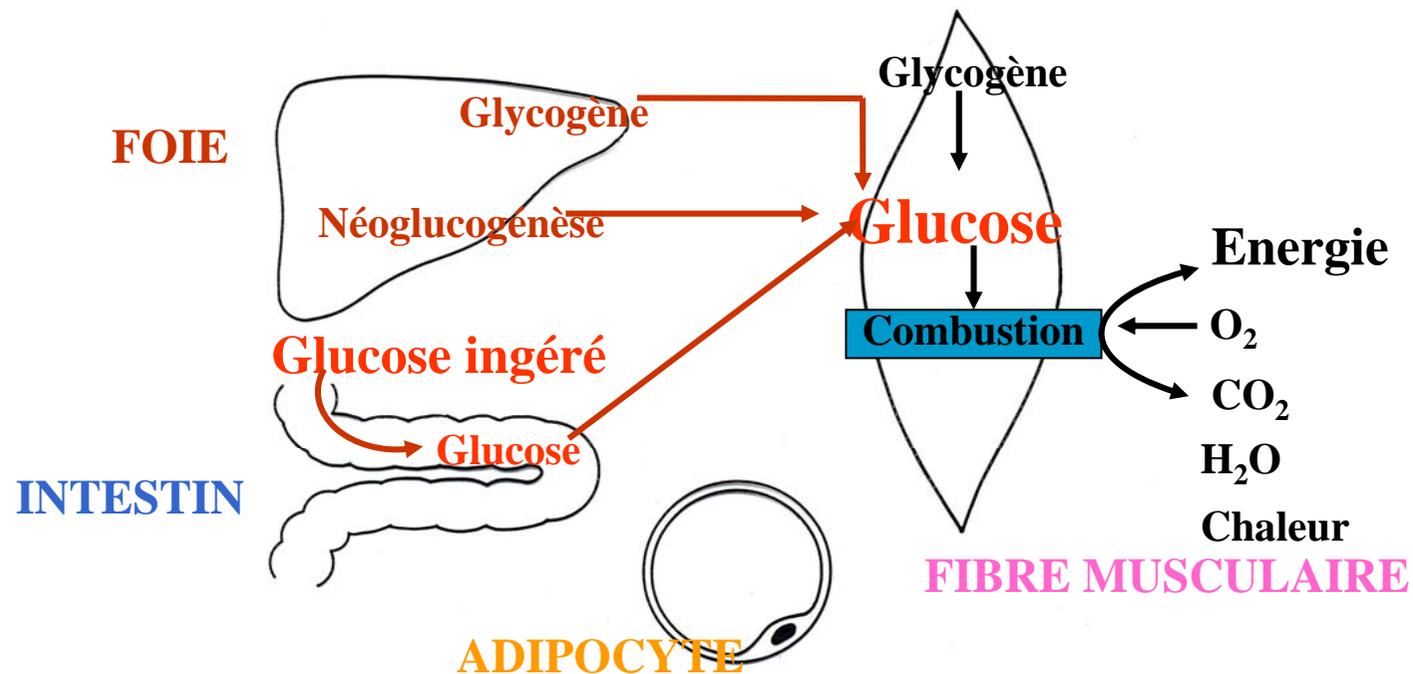
Plus l'intensité de l'exercice augmente, plus la captation en glucose par les fibres augmente. Elle peut atteindre 4 à 5 mmol/min. La réserve totale en glucose sanguin est d'environ 20 à 25 mmol : nécessité d'apport endogène (glycogène) ou exogène.

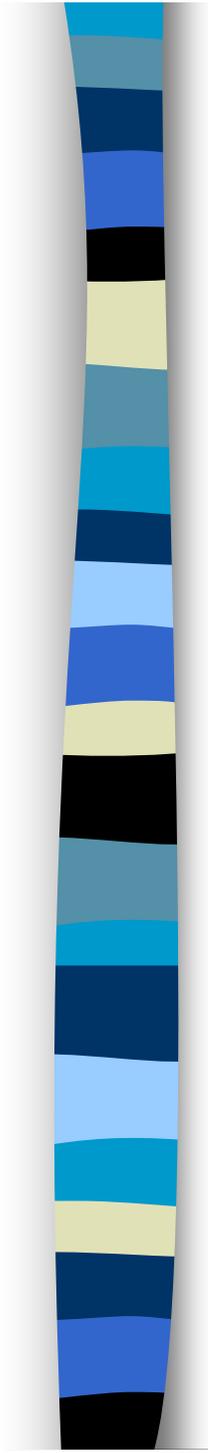


*Différence a.v. en glucose au niveau fémoral, lors d'un exercice croissant*

## 7) D'où provient le glucose circulant ?

La glycogénolyse va être augmentée à l'exercice, par l'augmentation des besoins énergétiques, et par l'augmentation de la sécrétion de catécholamines.





## 8) Réserves en glucides

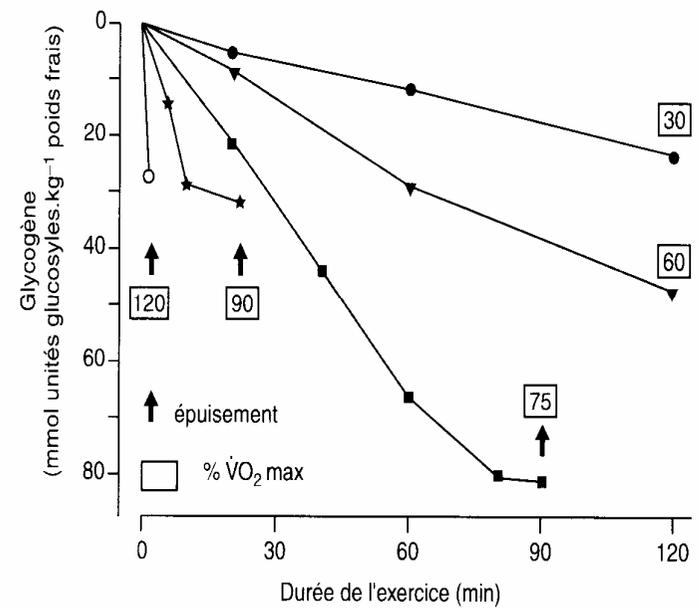
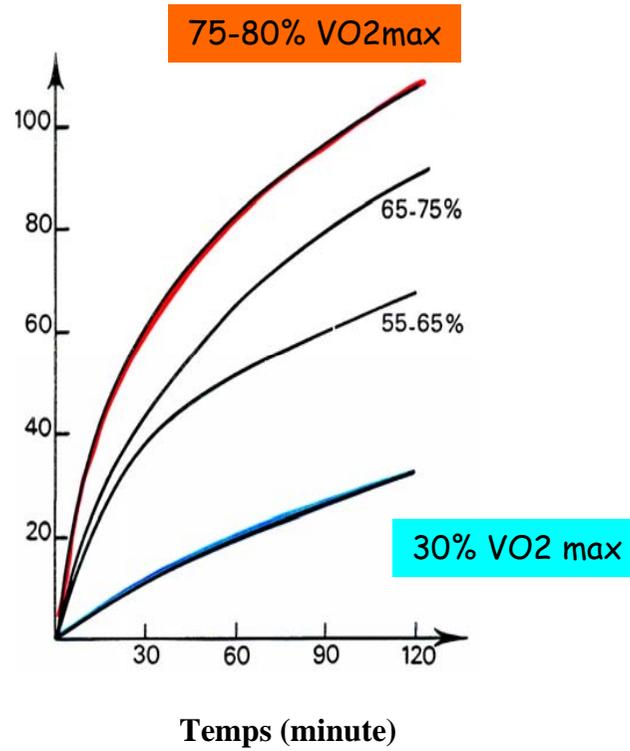
Glycogène hépatique : 60 g

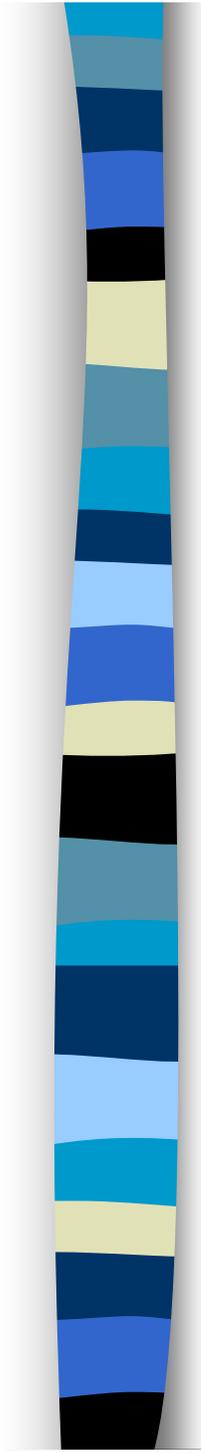
Glycogène musculaire : 400 g

Glucose : 16 g

## 9) Utilisation du glycogène à l'exercice

Utilisation du glycogène





## Effet de l'intensité sur la déplétion glycogénique

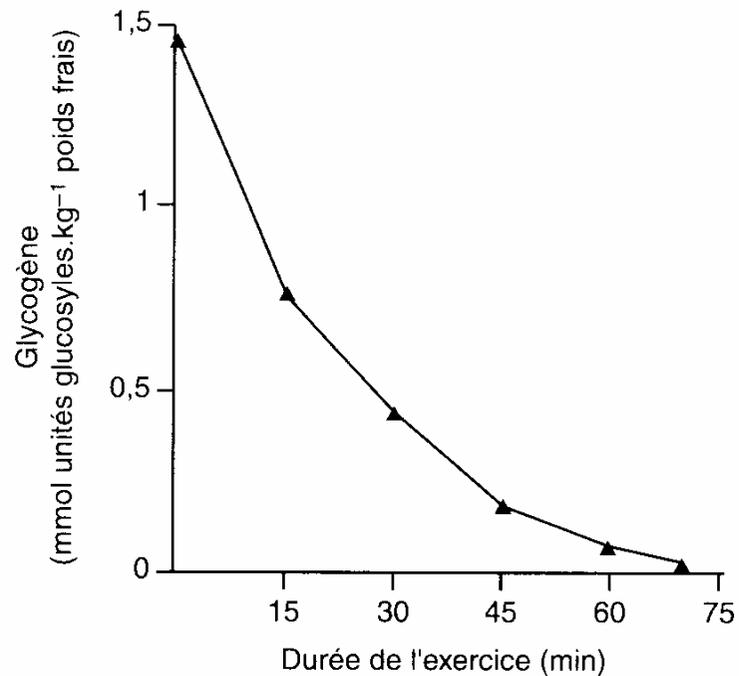
A faible intensité, la déplétion est limitée.

Par contre, lorsque l'intensité dépasse les 75% de  $VO_2\text{max}$ , l'utilisation du glycogène augmente de manière exponentielle.

Théoriquement, on pourrait tenir pendant 8 à 10 min un exercice à 150% de  $VO_2\text{max}$ .

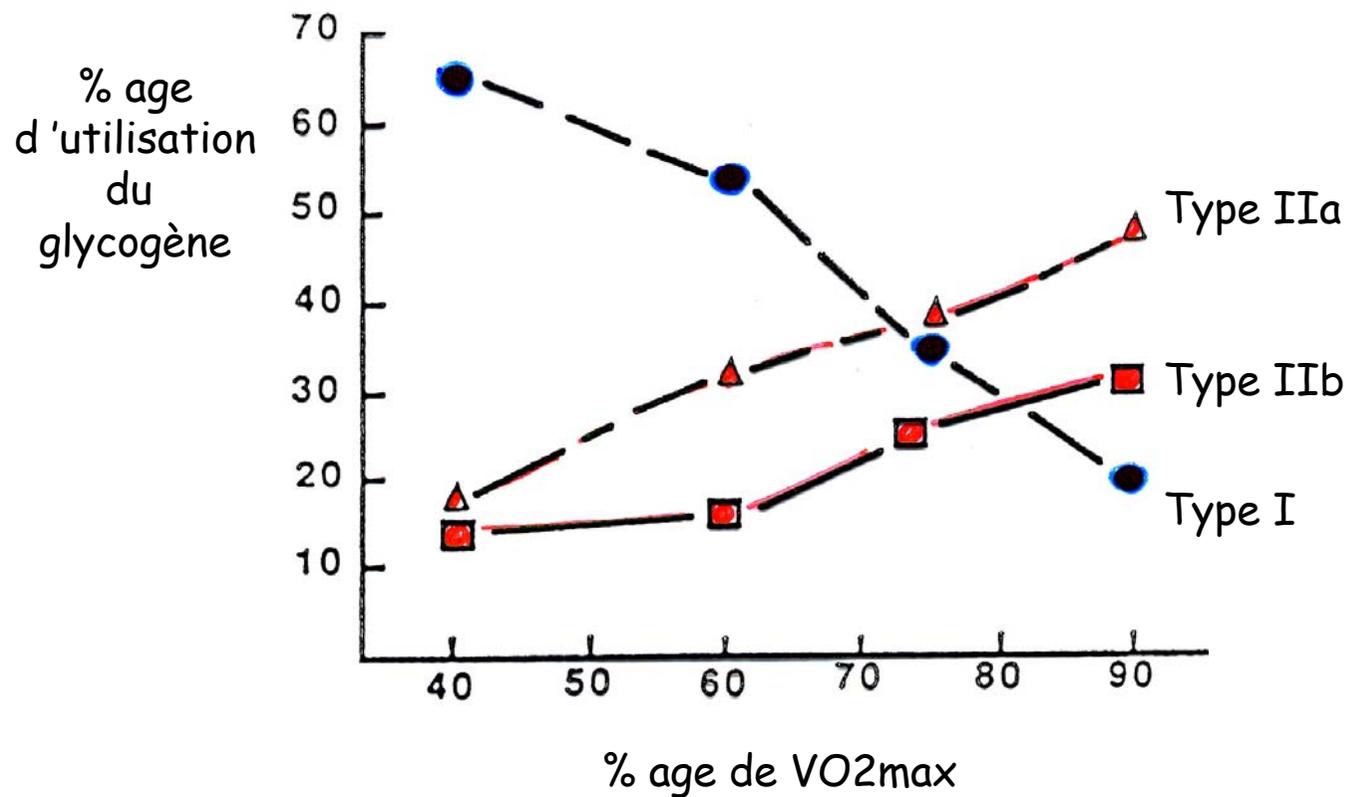
## Effets de la durée sur la déplétion glycogénique

Les exercices entre 60 et 80% de  $VO_{2max}$  engendrent une déplétion croissante dans le muscle en activité.



# Déplétion en fonction du type de fibres

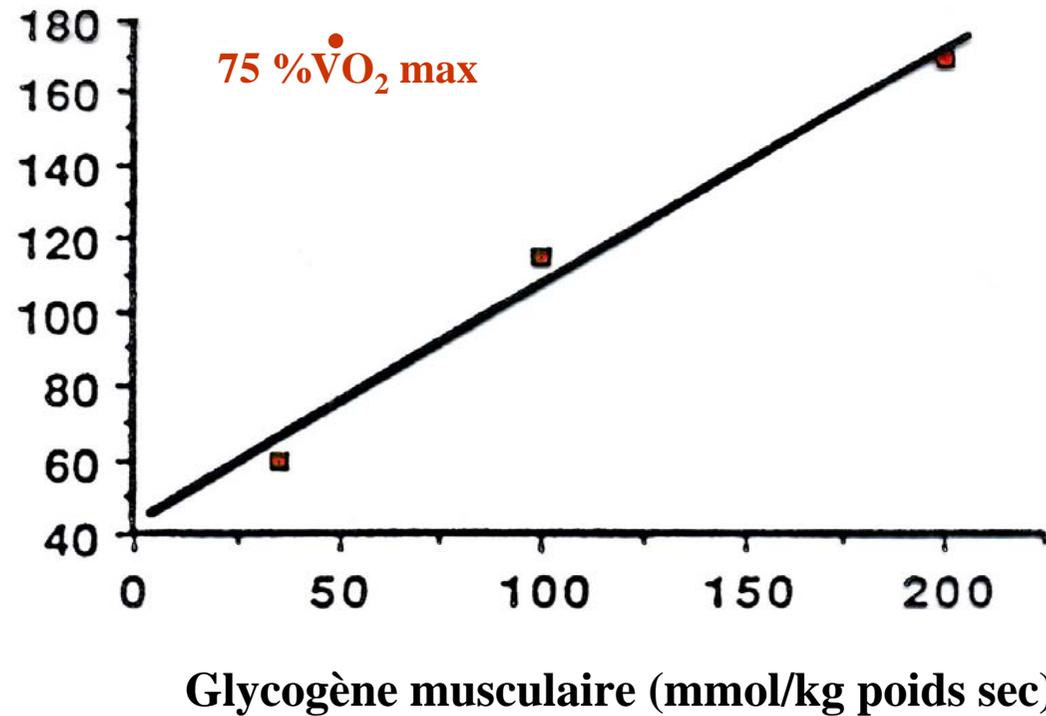
Plus le niveau de force augmente, plus la déplétion est importante dans les fibres de type II

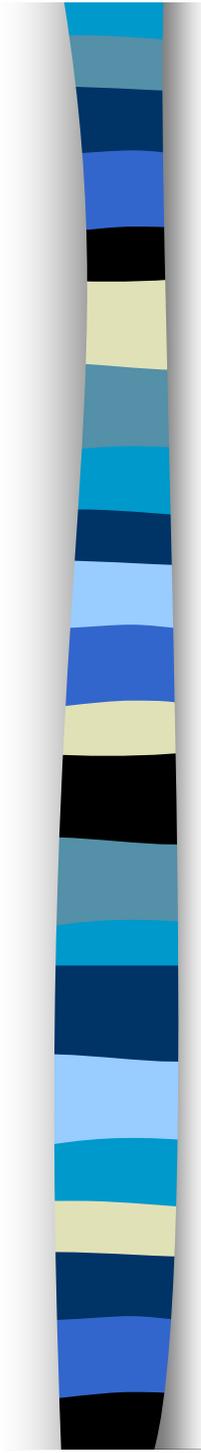


## Limitation des réserves

La durée de l'exercice est dépendante des réserves de glycogène.

Temps d'exercice en minutes





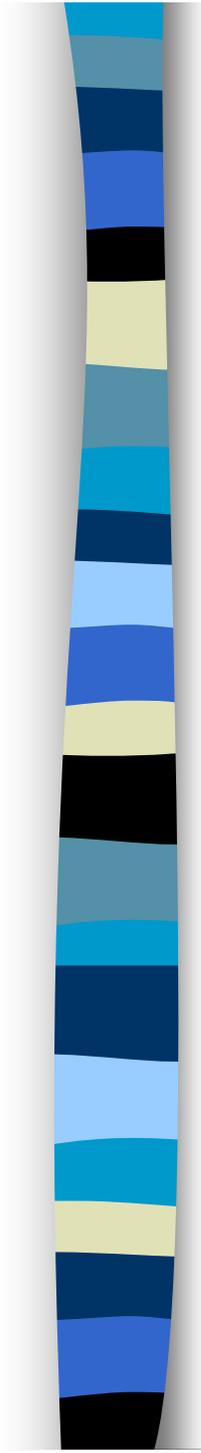
## 10) Effets de l'entraînement sur le métabolisme glucidique

### A) Entraînement en puissance

L'entraînement de la force ou de la vitesse → pas d'effet spécifique sur la répartition des réserves glucides chez l'homme.

Pour certains auteurs → amélioration de l'activité de certaines enzymes de la glycogénolyse (PFK ...)  
lors d'entraînement de 400 à 800 m.

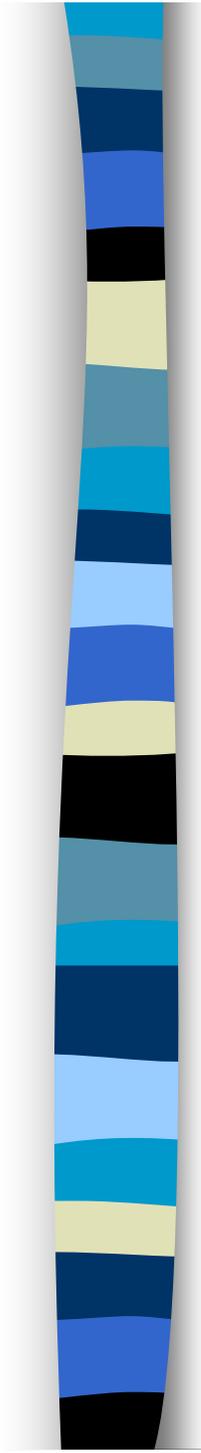
→ adaptations seraient le témoin d'un flux glycolitique plus important → capacité énergétique accrue.



## B) Entraînement en endurance

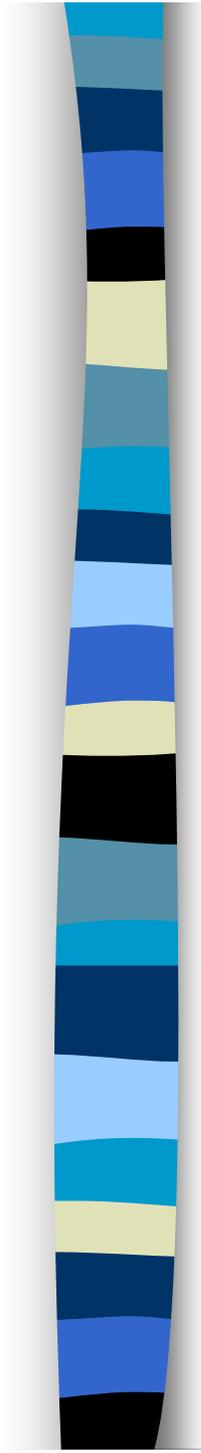
### *B1) Réserves en glycogène chez le sujet entraîné*

- glycémie identique à celle du sédentaire
- concentrations basales en glycogène musculaire accrues : le restockage se fait de façon plus importante après utilisation lors de l'exercice



## *B2) Utilisation des substrats chez le sujet entraîné*

- l'entraînement de type aérobie permet, chez un même sujet, une diminution moins importante du glycogène musculaire pendant un exercice réalisé à la même intensité absolue. Cette adaptation apparaît après seulement 10 j. d'entraînement.
- réduction de l'activité de la glycogénolyse
- diminution de l'utilisation du glucose plasmatique pendant l'exercice.
- pour une même intensité de travail, le sujet entraîné utilisera moins ses glucides et privilégiera les lipides.
- augmentation du nombre de GLUT-4



## 11) Effets du désentraînement

Les bénéfices acquis au cours d'un long processus régressent très rapidement en cas d'inactivité (3 s.)

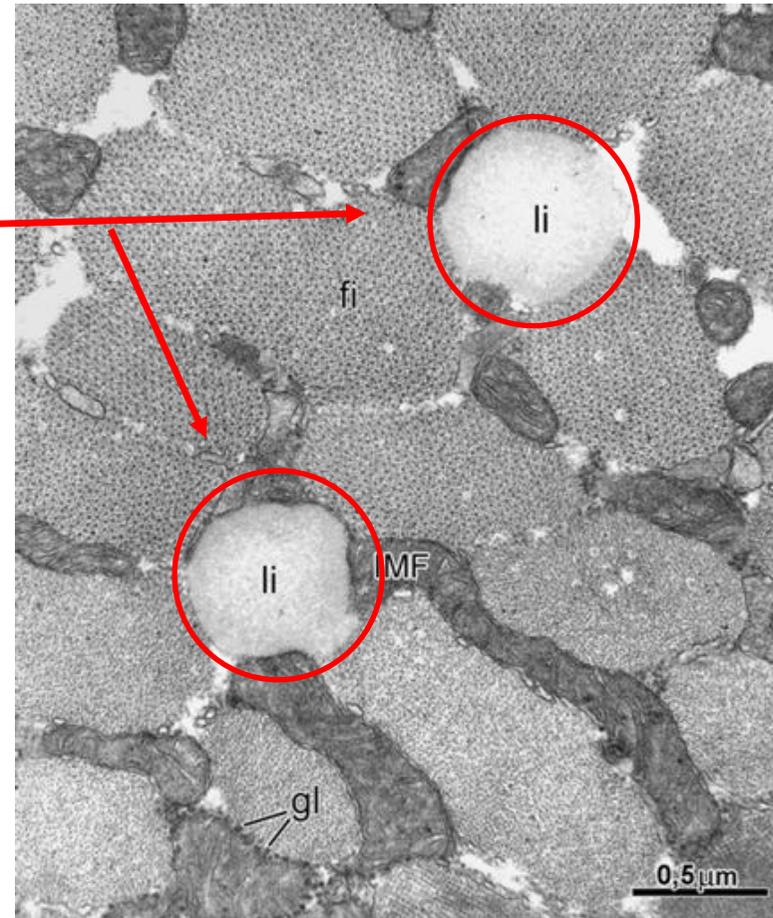
- Diminution de l'activité des enzymes oxydatives.
- Réduction de la capacité de synthèse mitochondriale de l'ATP
- Diminution très rapide du nombre des GLUT-4

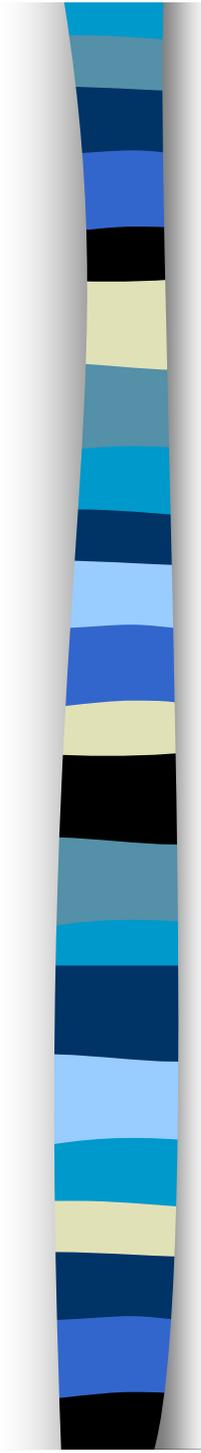
Problème de gestion des charges et de la fatigue, sans trop altérer les bénéfices de l'entraînement

## II) Métabolisme lipidique

Les lipides ont un triple rôle biologique :  
structurel, fonctionnel et énergétique

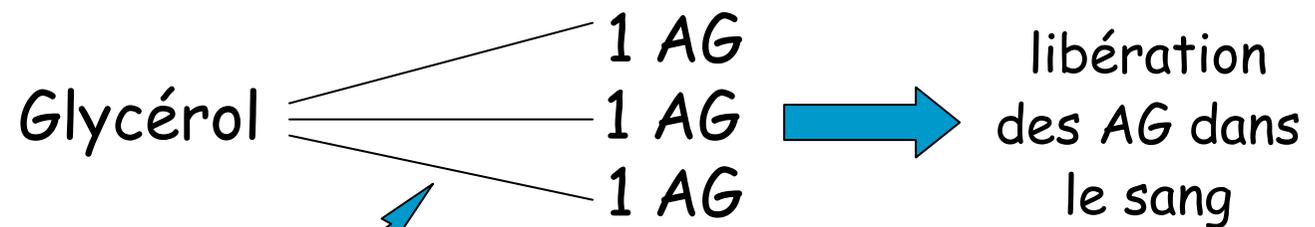
Ils sont stockés  
dans le muscle,  
le foie, mais  
surtout dans le  
tissu adipeux



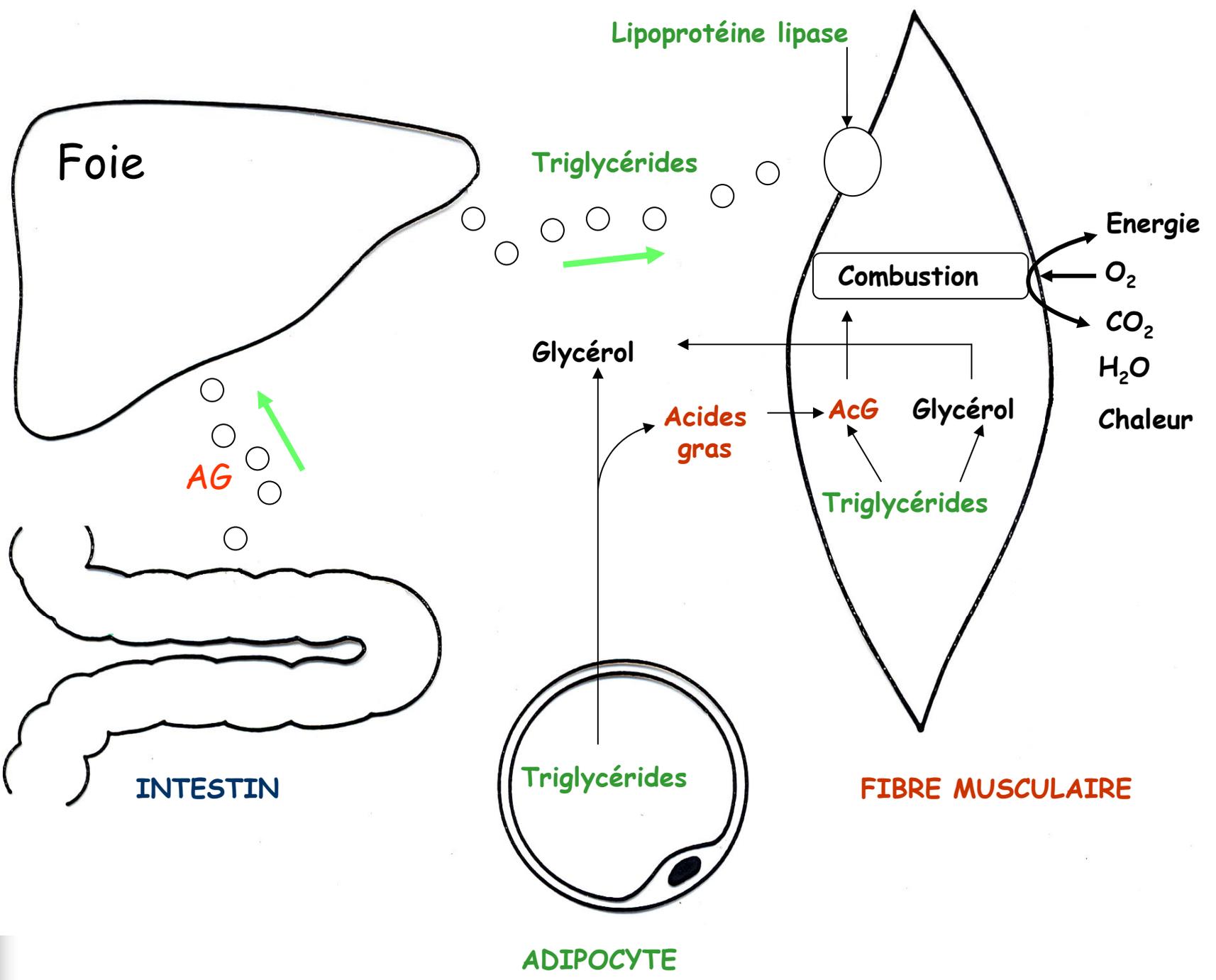
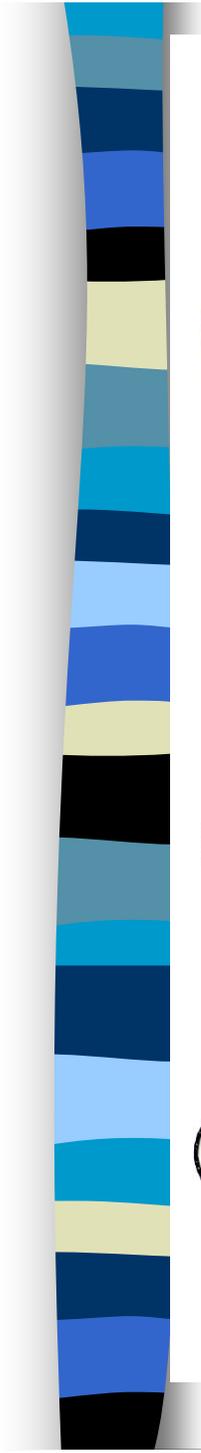


Les triglycérides représentent un réservoir lipidique.

TG = 1 glycérol + 3 acides gras

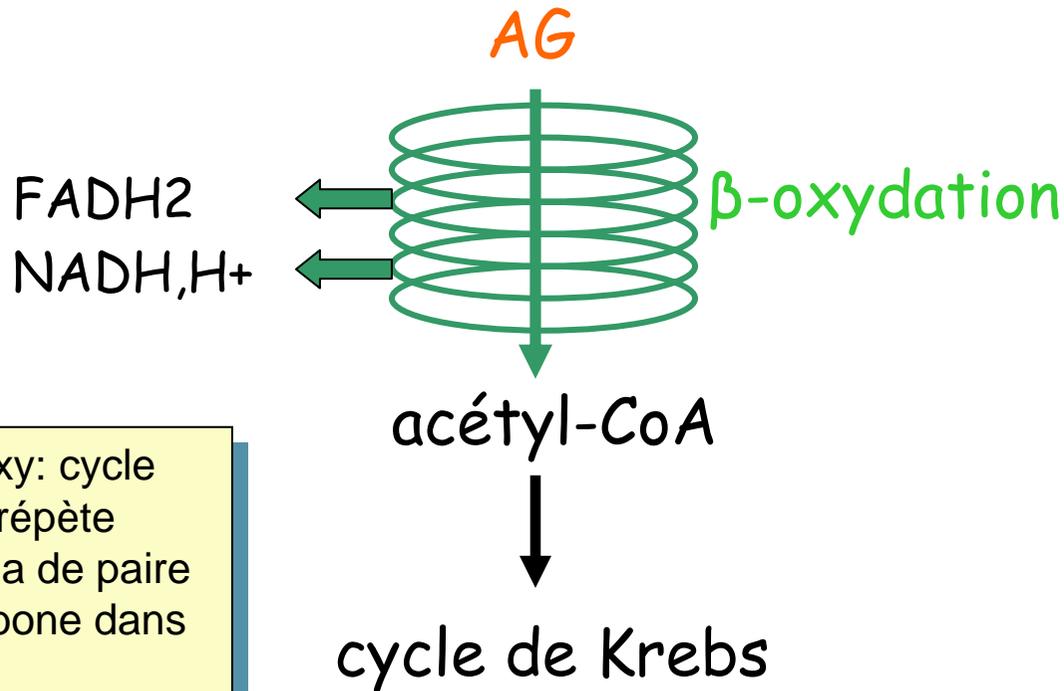


**lipoprotéine lipase**  
enzyme présente sur la paroi des capillaires



# 1) Le devenir des AG

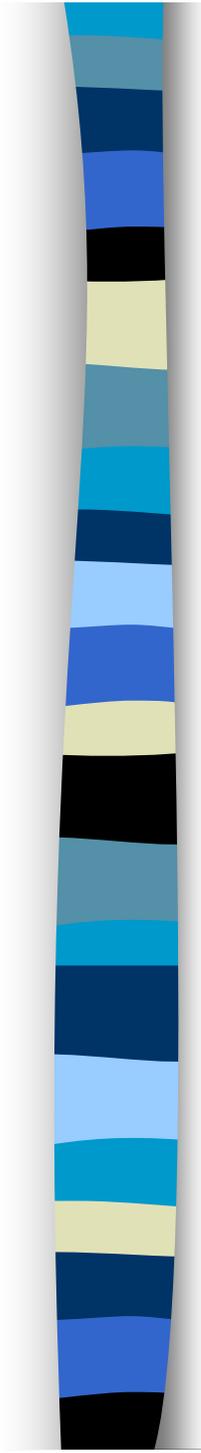
L'oxydation des AG ( $\beta$ -oxydation) est la voie la plus énergétique pour la plupart des cellules. Elle a lieu dans les mitochondries.



Beta oxy: cycle qui se répète qu'il y a de paire de carbone dans l'AG.

La  $\beta$ -oxydation est un cycle qui va se reproduire en fonction du nombre de C de l'AG.

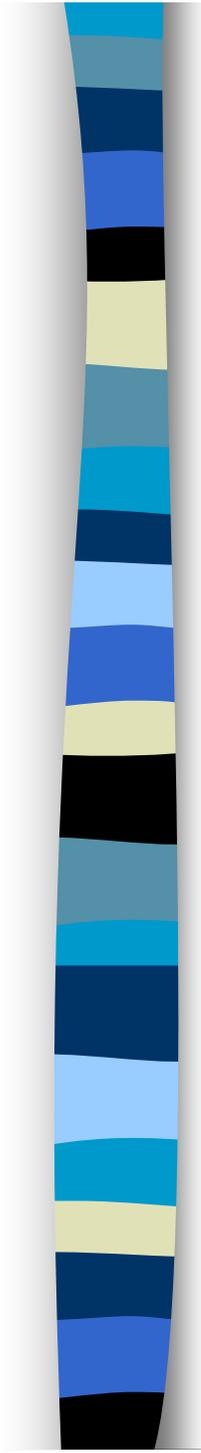
Pour un AG à 6C, le bilan NRJ est de 45 ATP.



## 2) Le devenir du glycérol

Le glycérol libéré est non utilisable comme carburant par le muscle, qui est dépourvu de glycérol-kinase.

Il va être capté par le foie et transformé en glucose par néoglucogénèse.

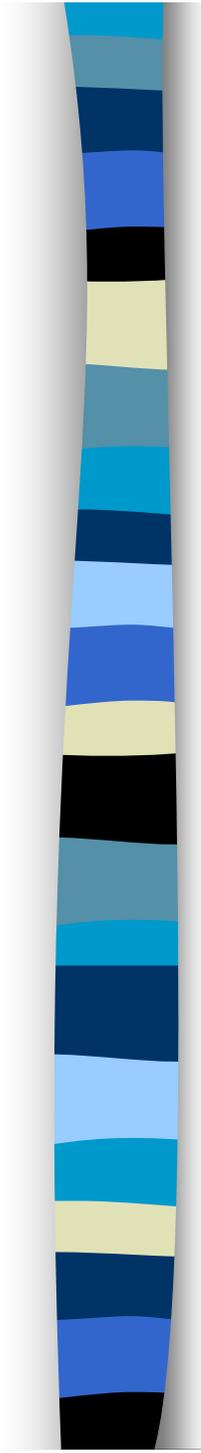


### 3) Les réserves lipidiques

Lipides sous cutanés : 8 kg, soit environ  
72000 Cal de réserve.

Lipides intra-musculaires : 160 g.

Ce n'est pas l'épuisement des réserves lipidiques  
qui peut provoquer l'arrêt de l'exercice.



## 4) Effets de l'entraînement

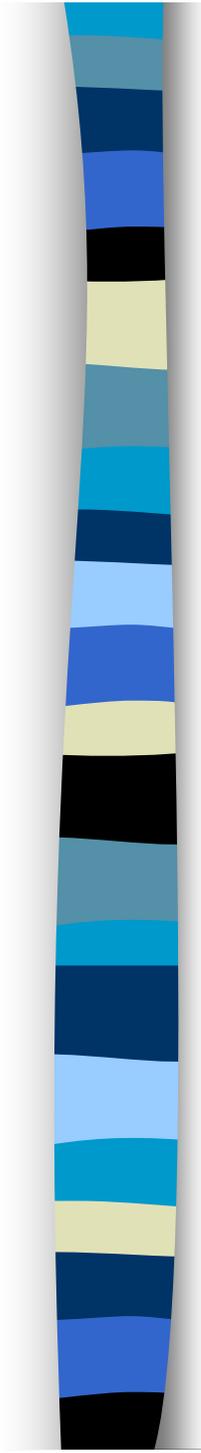
L'entraînement de type aérobie favorise l'épargne des réserves de glycogène, au bénéfice d'une plus grande utilisation des lipides. Comment ?

### A) Meilleure captation musculaire

Chez l'entraîné : diminution des AG plasmatiques  
→ meilleure captation par augmentation des transporteurs.

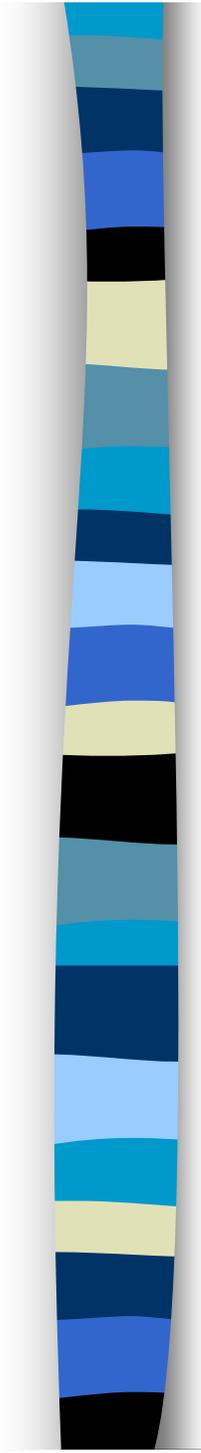
### B) Meilleure utilisation des TG musculaires

Admis mais pas vraiment démontré ...



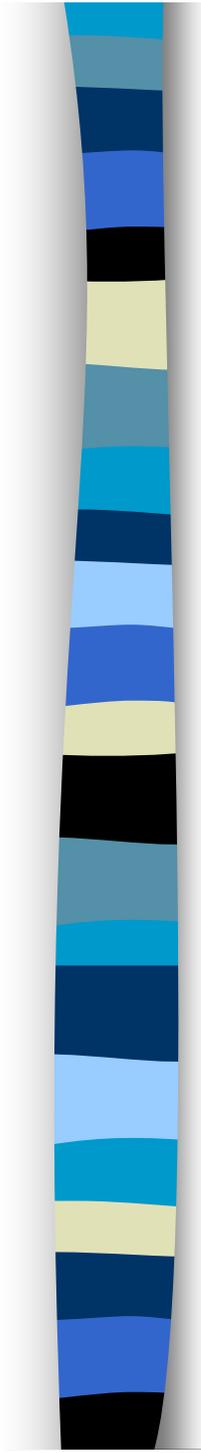
### C) Meilleure oxydation des AG

Les fibres musculaires augmentent leur potentiel oxydatif après un entraînement aérobie, par une élévation du nombre d'enzymes.



## 5) Les facteurs limitants de l'oxydation des lipides

- Transport vers les muscles actifs (albumine)
- Pénétration dans la fibre musculaire (limitation des transporteurs), puis dans les mitochondries
- Oxydation dans les mitochondries

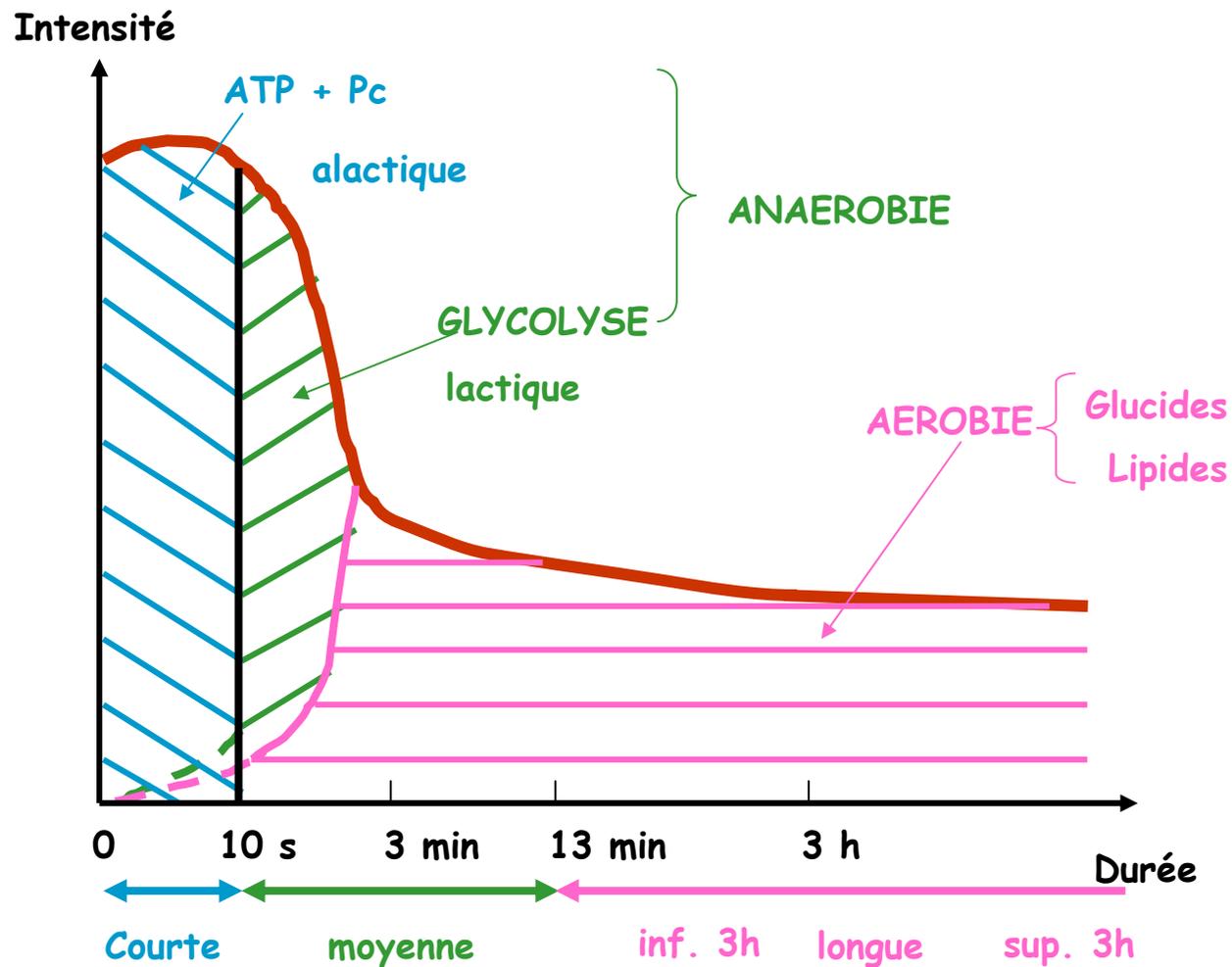


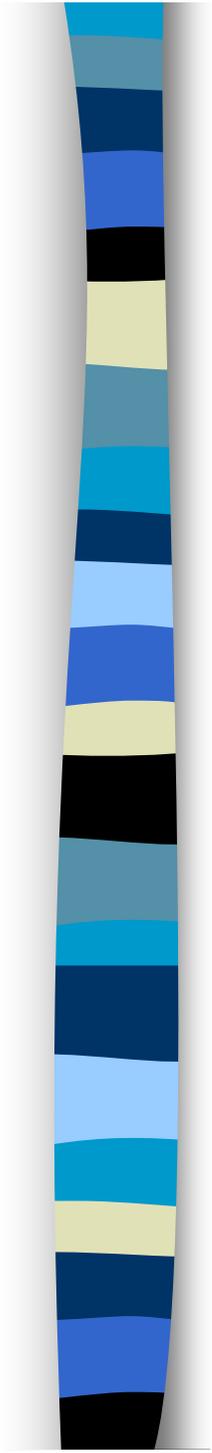
## 6) Comparaison du rdt énergétique mole de glucose / mole de palmitate (C16)

	Glucose	Palmitate
Energie produite	38 ATP	129 ATP
O <sub>2</sub> / ATP (mmol.mmol <sup>-1</sup> )	0,162	0,177

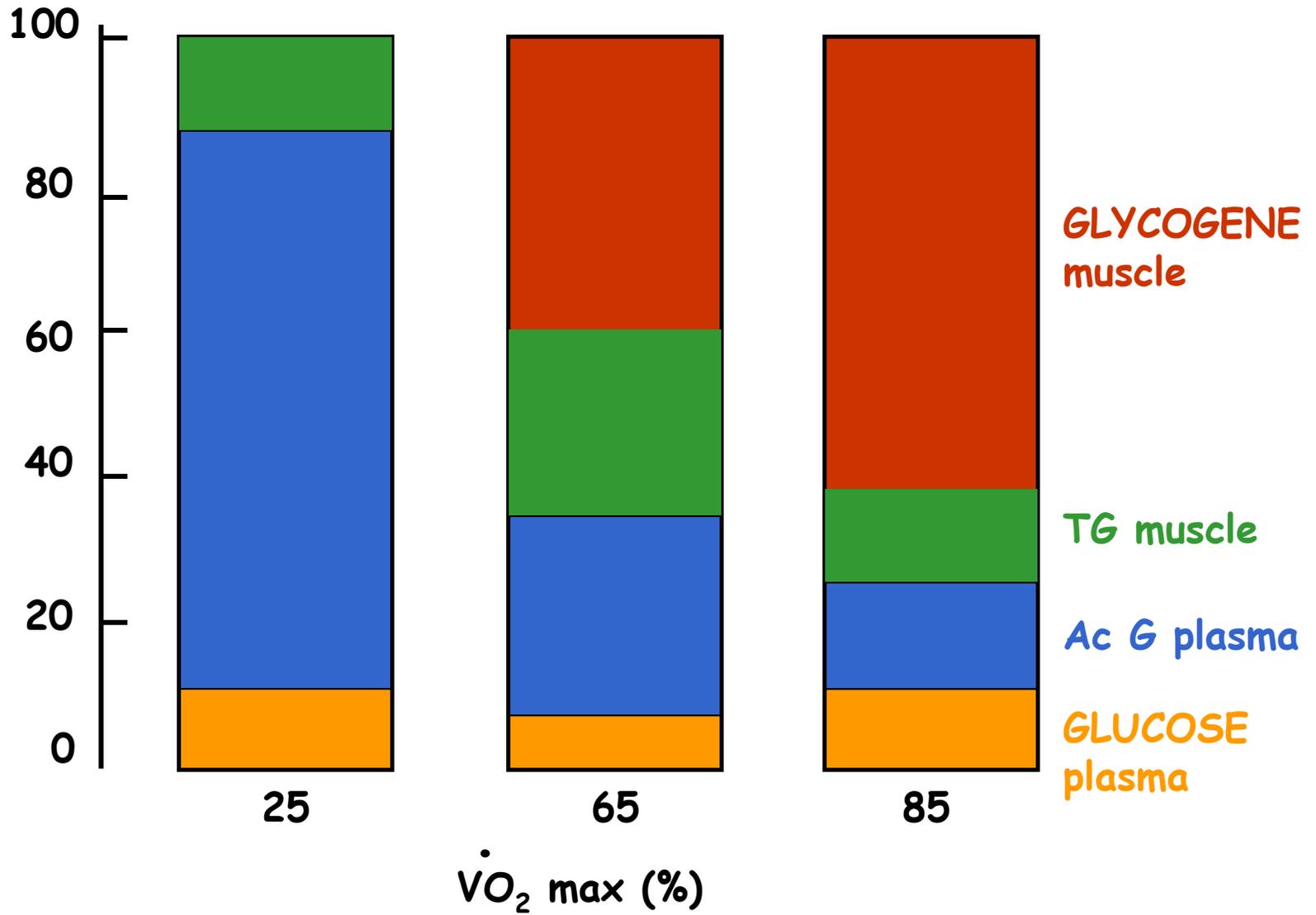
# III) Utilisation respectives des substrats à l'exercice

## A) En fonction de l'intensité de l'exercice



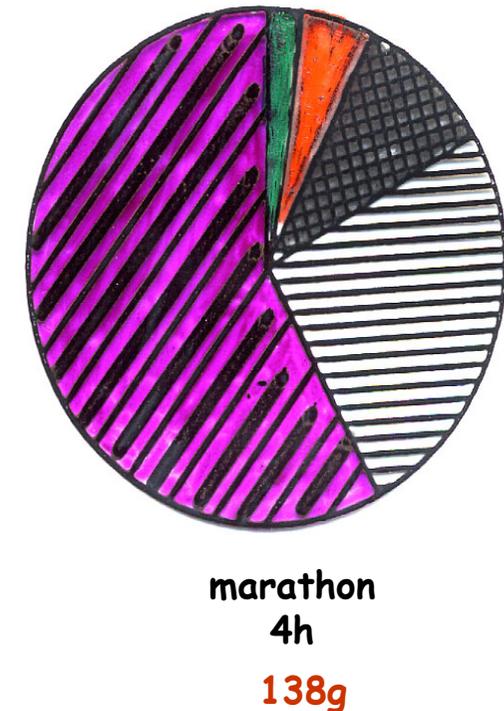
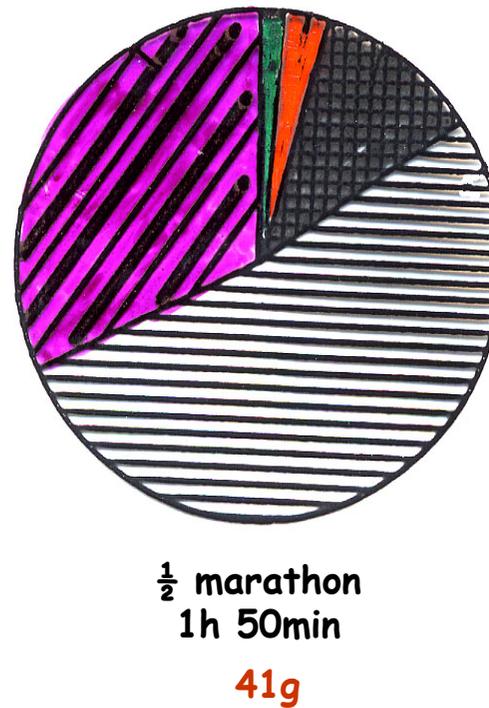
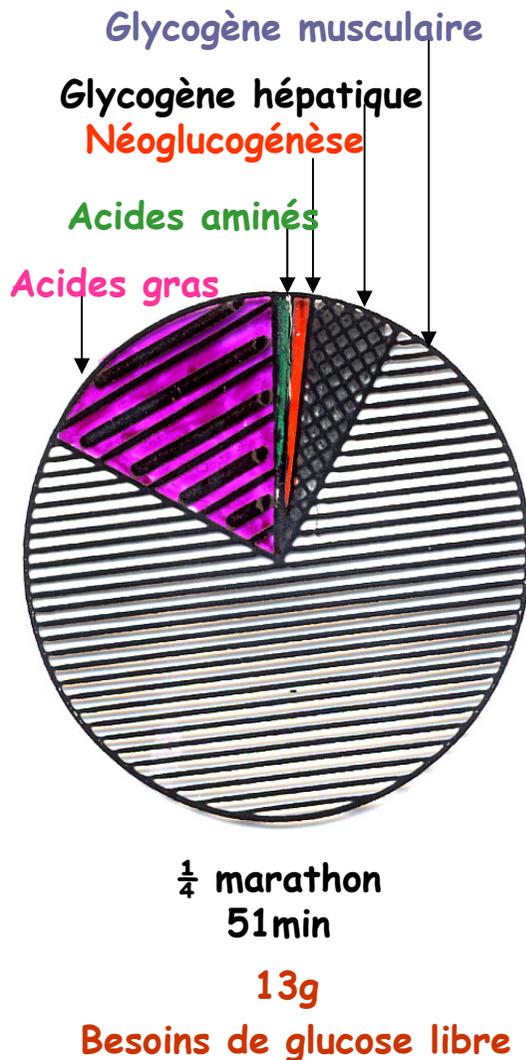


### Dépense énergétique (%)



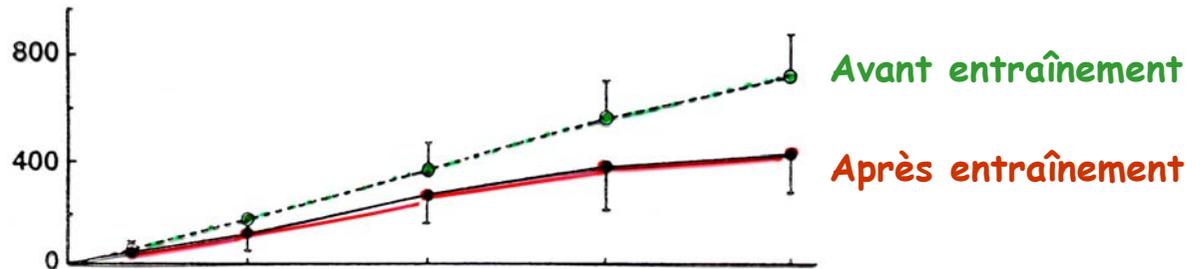
## B) En fonction de la durée de l'exercice

Utilisation des substrats chez un même coureur sur trois distances de course pour lesquelles les besoins de glucose libre sont différents.

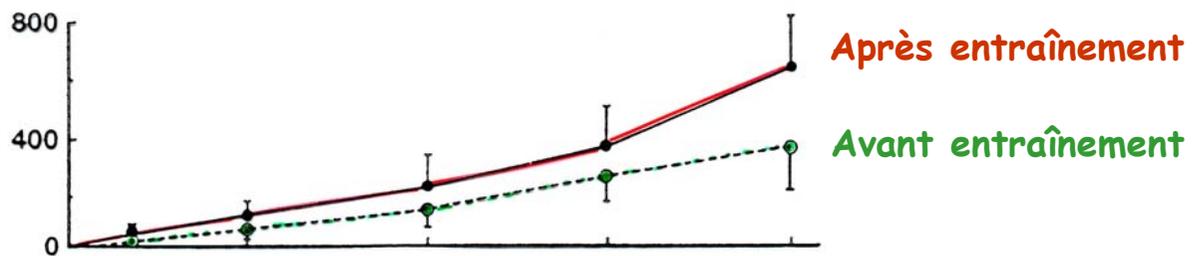


### C) En fonction du niveau d'entraînement

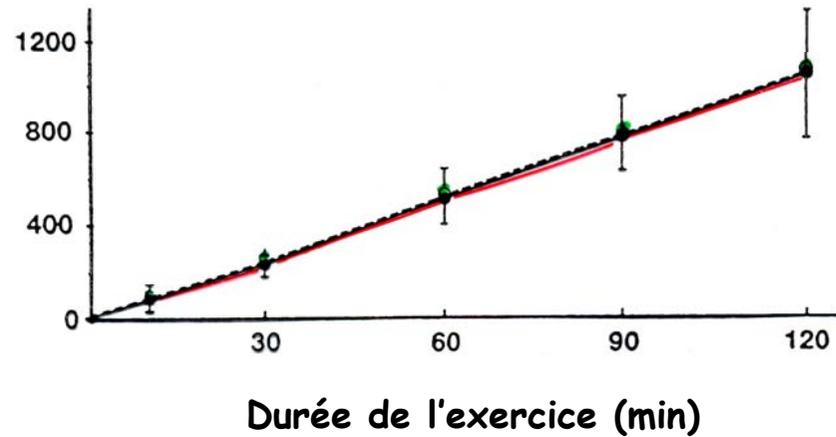
Energie glucides



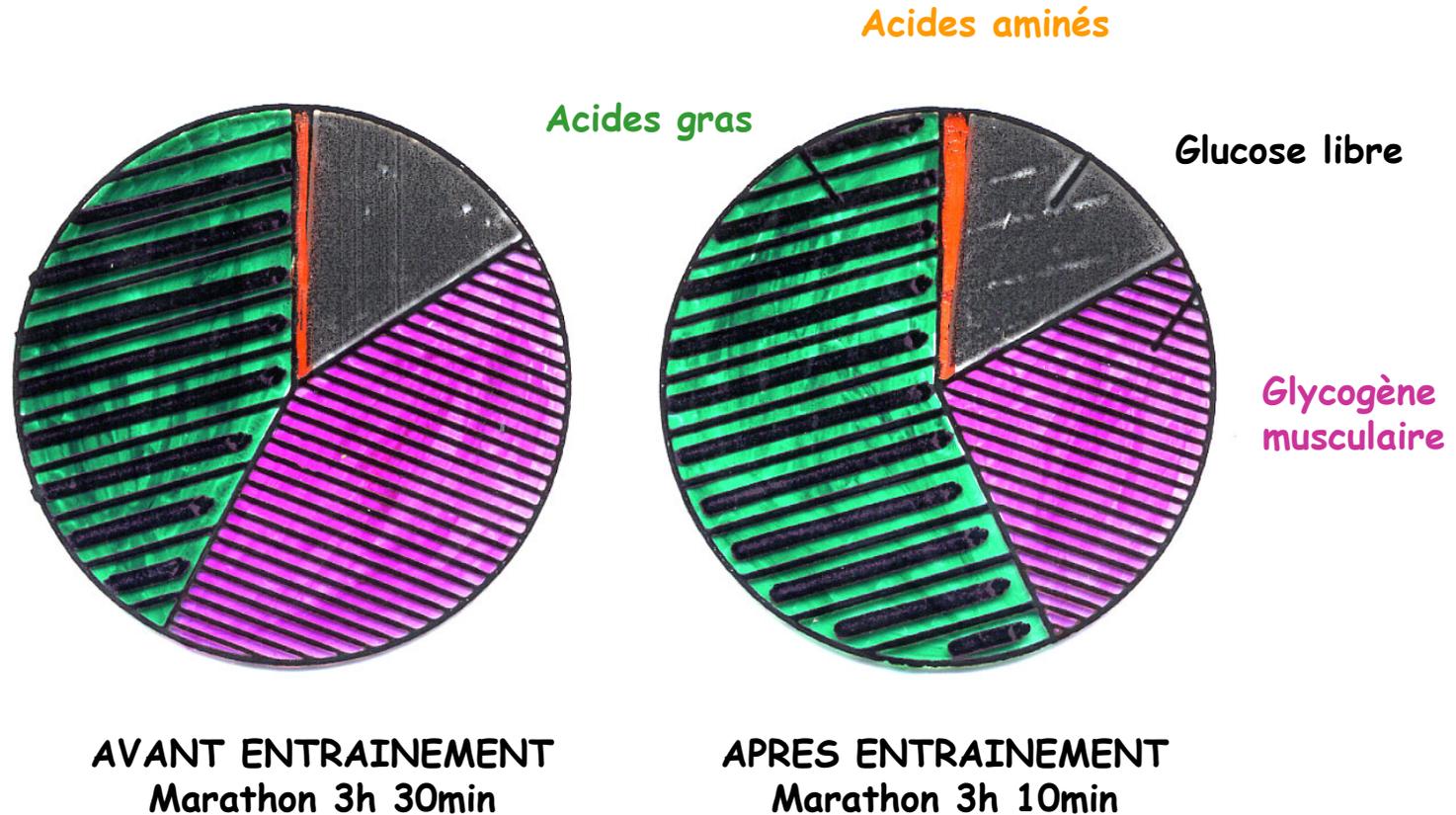
Energie lipides

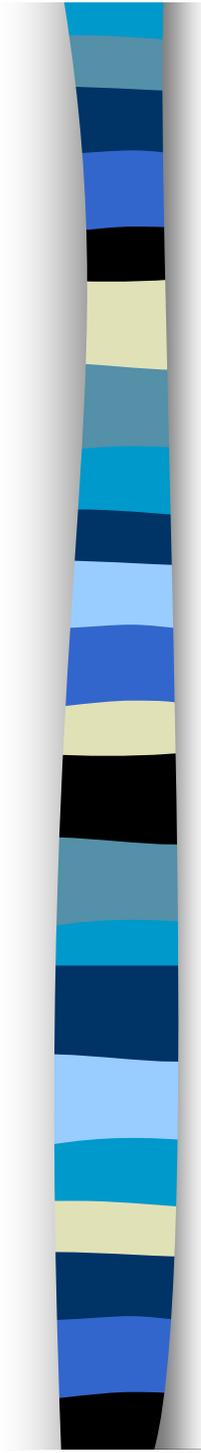


Energie totale



L'entraînement augmente le pourcentage de l'énergie nécessaire au coureur, fourni par les acides gras, et diminue en conséquence l'utilisation des réserves de glycogène.





## D) Crossover concept (point de croisement des substrats)

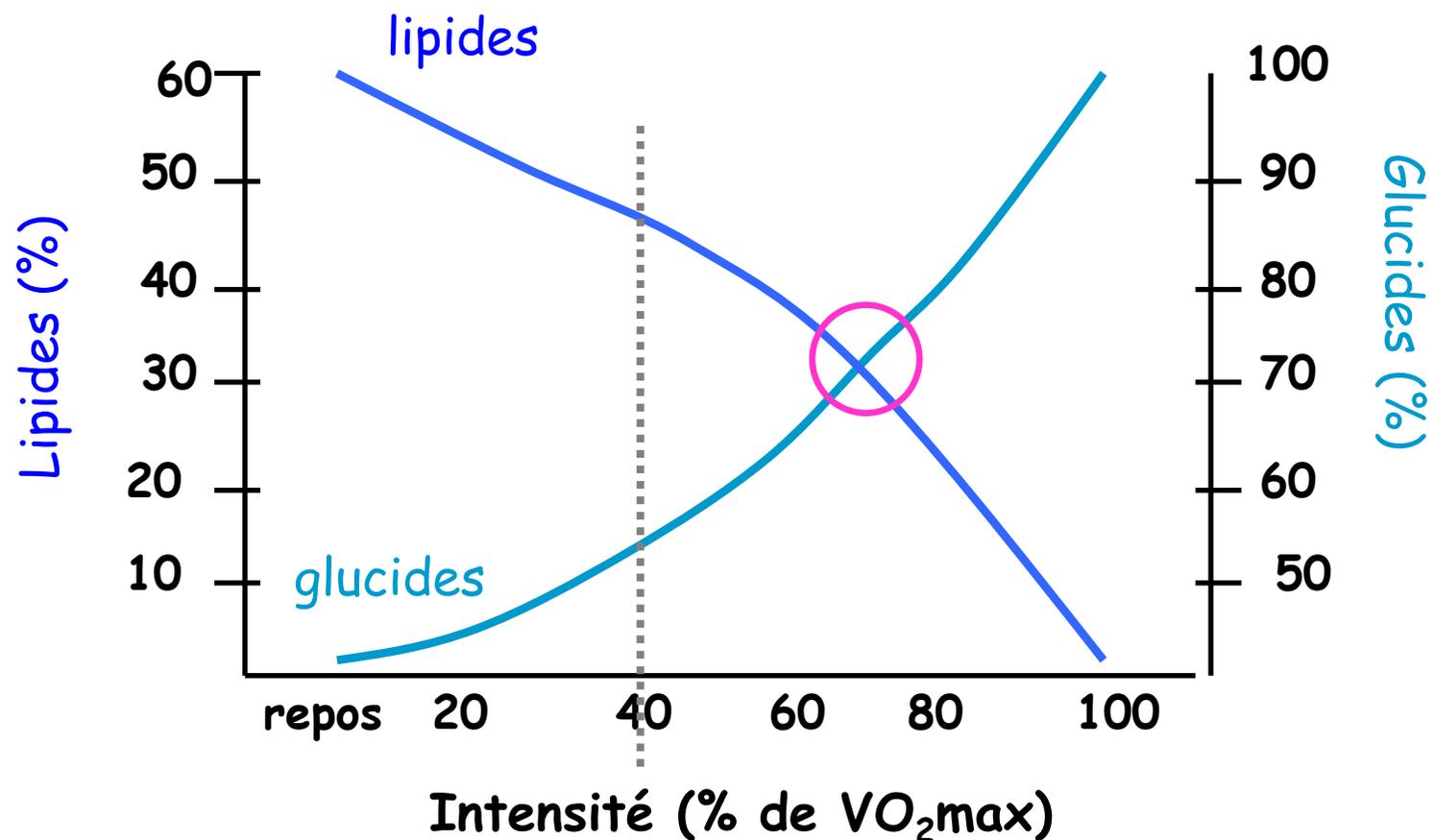
L'entraînement modifie la mobilisation des substrats, MAIS un facteur est primordial, c'est l'intensité de l'exercice.



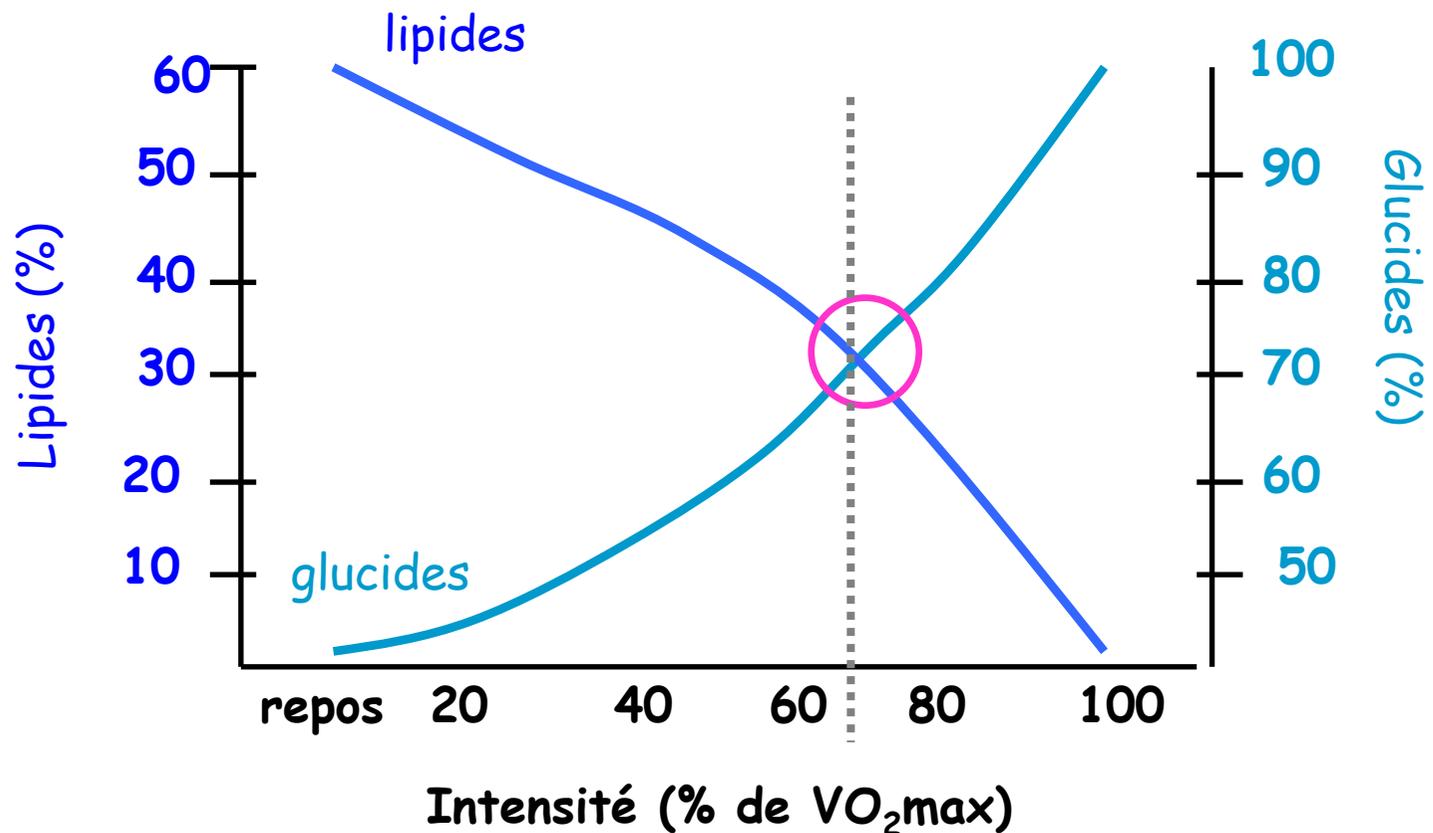
La mobilisation des substrats chez un individu donné à tout point de l'exercice dépend de l'interaction (cross-over) entre :

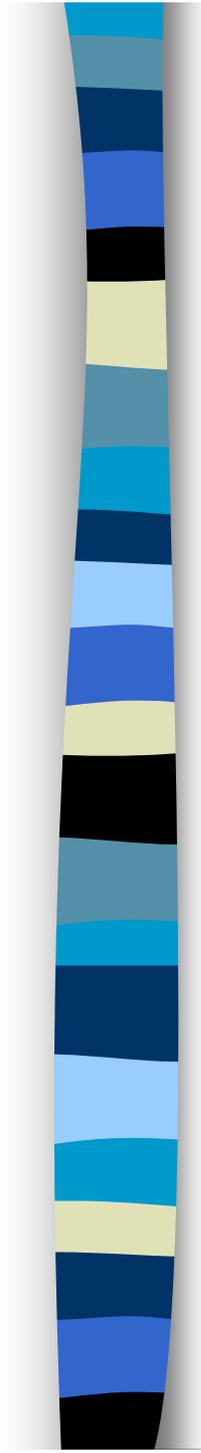
- ❑ les réponses métaboliques induites par l'intensité de l'exercice (sollicite l'utilisation des glucides)
- ❑ les réponses induites par l'entraînement qui favorisent l'utilisation des lipides

40 % de  $VO_2$ max : on utilise 50 % de lipide et 50% de glucide  
(70% des calories viennent des lipides et 30% des glucides)



60 % de  $VO_2$ max : on utilise 30 % de lipide et 70% de glucide  
(la moitié des calories viennent des lipides et l'autre moitié des glucides)





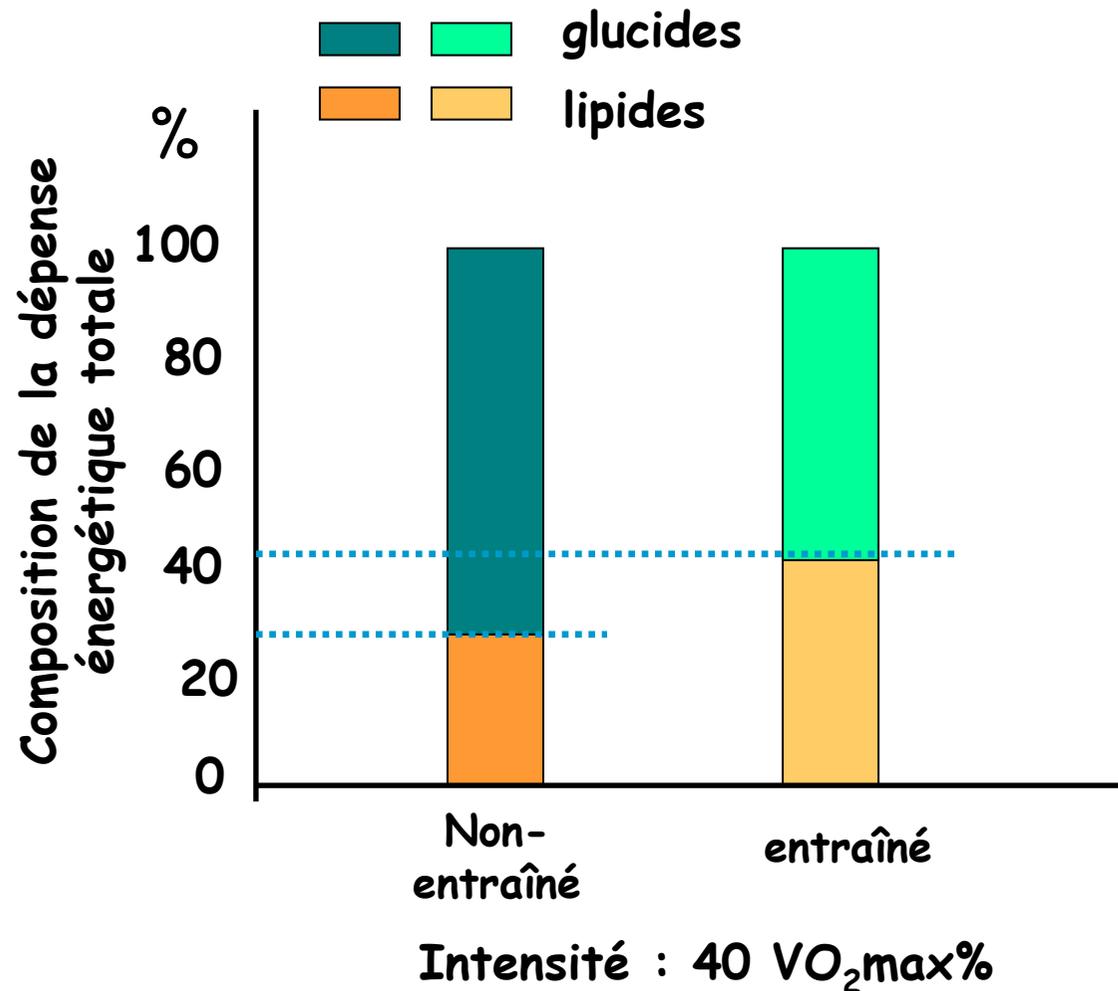
## Interprétation :

L'entraînement en endurance favorise l'utilisation des lipides mais seulement à intensité faible à modérée.

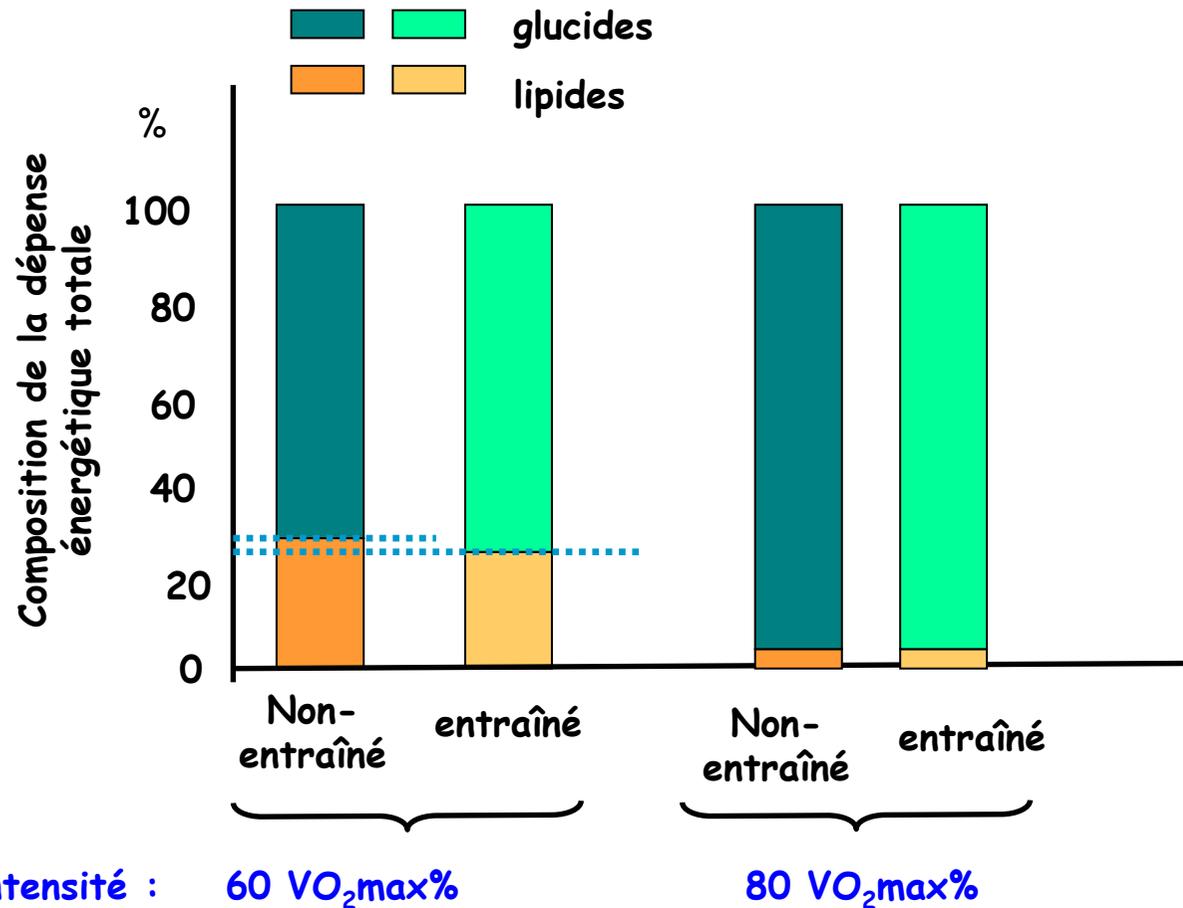
A haute intensité, les glucides restent le substrat majeur

L'exercice d'intensité faible à modérée  
35% < I > 55% de VO<sub>2</sub>max

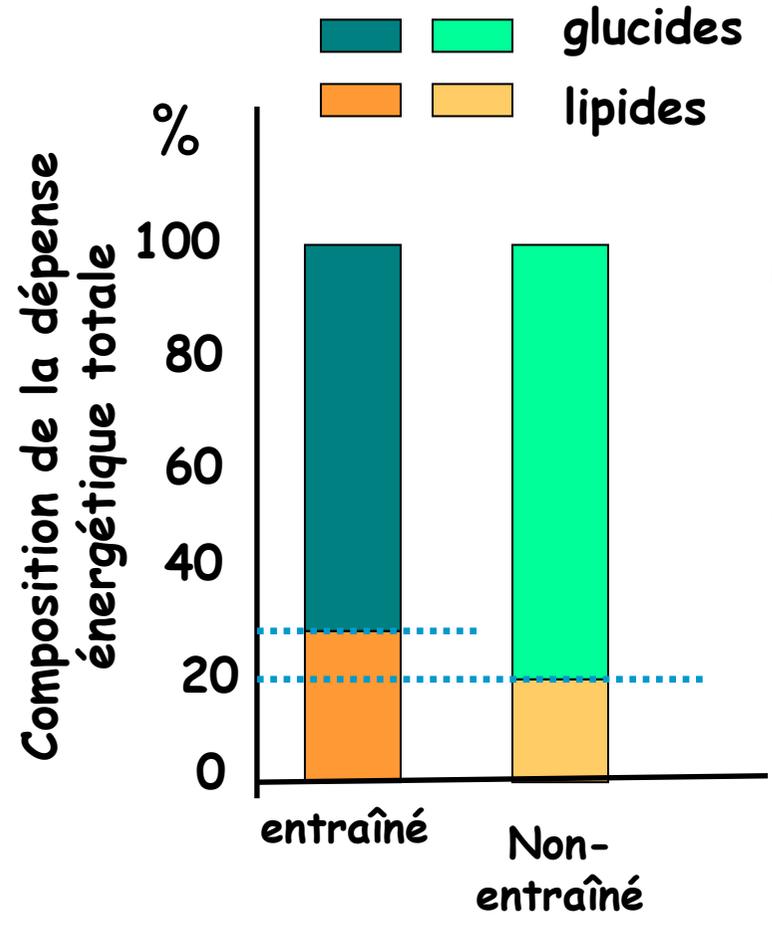
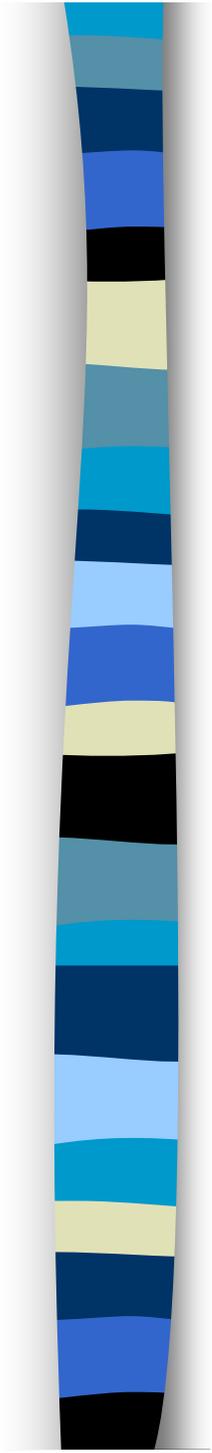
Modification importante de la mobilisation des substrats énergétiques, ↗ de la mobilisation et de l'oxydation des lipides.



## L'exercice d'intensité modérée à élevée $I > 60\%$ de $VO_2\text{max}$

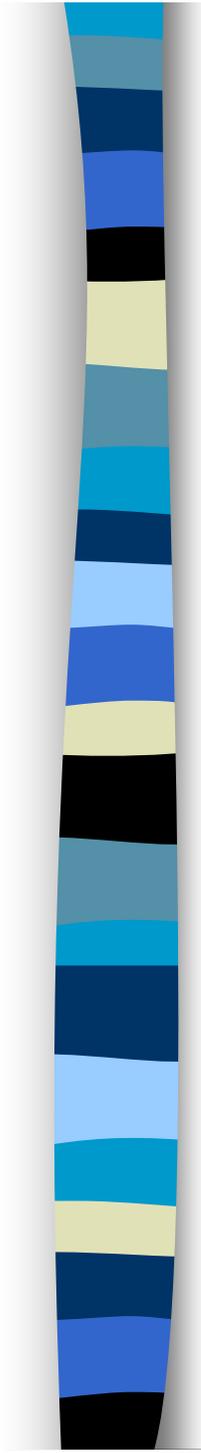


Pour une même intensité relative, on note peu de différence d'utilisation sur ce graphique. Cpdt, on considère que l'entraînement améliore l'utilisation à intensité absolue et relative des substrats.



Pour l'exercice d'intensité modérée, à même intensité absolue : ↗ de la mobilisation des lipides suite à l'entraînement

Même intensité absolue (240 watts)  
Représente ~50 à 65 % de  $VO_2max$



60%  $VO_2\text{max}$  > I < 70 % de  $VO_2\text{max}$



À même I absolue : ↗ mobilisation des lipides  
A même I relative : légère différence

I > 70 % de  $VO_2\text{max}$



Pas de modification, les glucides  
restent le substrat majeur

Article qu'il serait bien de lire ....



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

Science & Sports 19 (2004) 53–62

SCIENCE  
& SPORTS

[www.elsevier.com/locate/scispo](http://www.elsevier.com/locate/scispo)

Revue générale

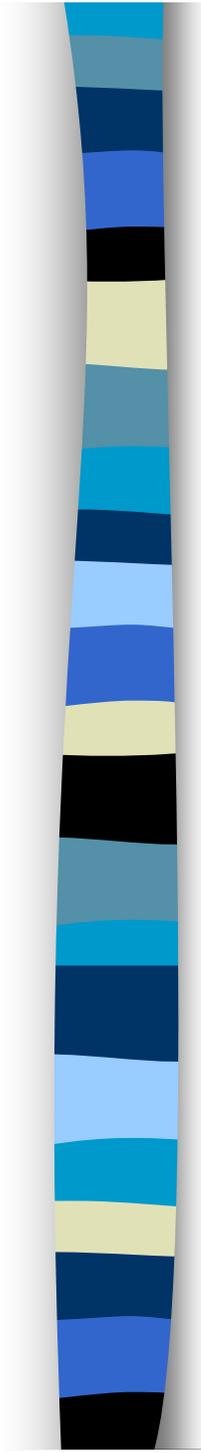
Place des lipides dans l'alimentation du sportif<sup>☆</sup>

Lipids in the athletes diet

A.X. Bigard \*, A. Letout, N. Simler, S. Banzet, N. Koulmann

*Département des facteurs humains, centre de recherches du service de santé des armées, BP 87, 38702 La Tronche cedex, France*

Sciences et sport 19 (2004) 53-62



## IV) La mobilisation des substrats : le Quotient Respiratoire

$$QR = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$$

La quantité d'O<sub>2</sub> nécessaire pour oxyder un substrat dépend du nombre d'atome de carbone

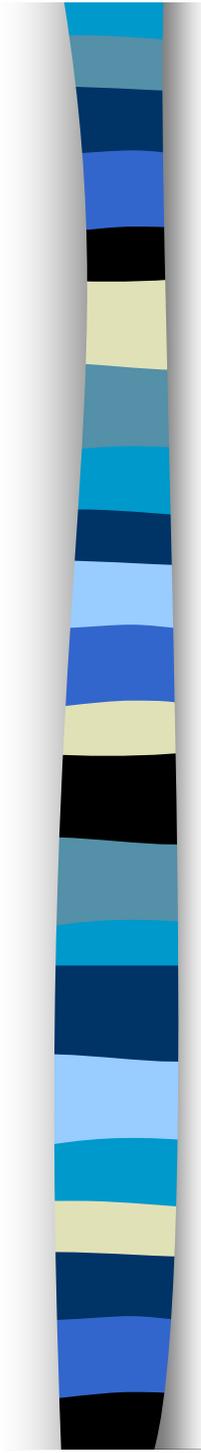
### Glucides



$$QR = VCO_2 / VO_2 = 6CO_2 / 6O_2 = 1$$

Si le métabolisme utilise uniquement des glucides

→ QR ~ 1



## Lipides

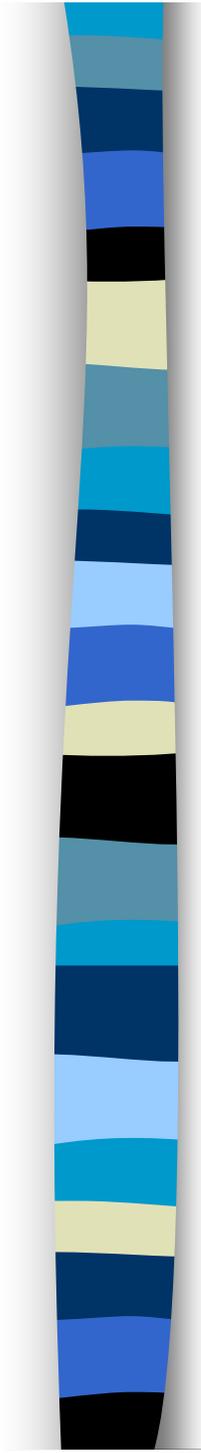
Exemple acide palmitique :  $C_{16}H_{32}O_2$



$$QR = VCO_2 / VO_2 = 16CO_2 / 23O_2 = 0.7$$

### QR au repos et à l'exercice

- le QR doit être mesuré en **état stable**, conditions standardisées
- QR au repos = 0.8
  - ↪ ce sont les lipides qui sont essentiellement oxydés
- QR à l'exercice (QR < 1) :
  - ↪ mesuré en état stable (entre 5 et 10 min d'exercice à intensité constante)



↪ permet théoriquement de déterminer quel est le substrat utilisé.

### Calcul du % de glucides et lipides utilisés :

$$\% \text{ de glucides dans } VO_2 = [(QR - 0.71)/0.29] \times 100$$

$$\% \text{ de lipides dans } VO_2 = 100 - \% \text{ de CHO dans } VO_2$$

$$\text{Débit d'oxydation glucidique (g/min)} = 4,585 VCO_2 - 3,2255 VO_2$$

$$\text{Débit d'oxydation lipidique (g/min)} = 1,6946 VO_2 - 1,7012 VCO_2$$

( $VO_2$  et  $VCO_2$  en l/min)

## calcul de la dépense totale d'énergie :

$$[(\% \text{glucides}/100) \times \text{VO}_2 \times 5,05 \text{kcal/l}] + [(\% \text{lipides}/100) \times \text{VO}_2 \times 4,7 \text{kcal/l}]$$

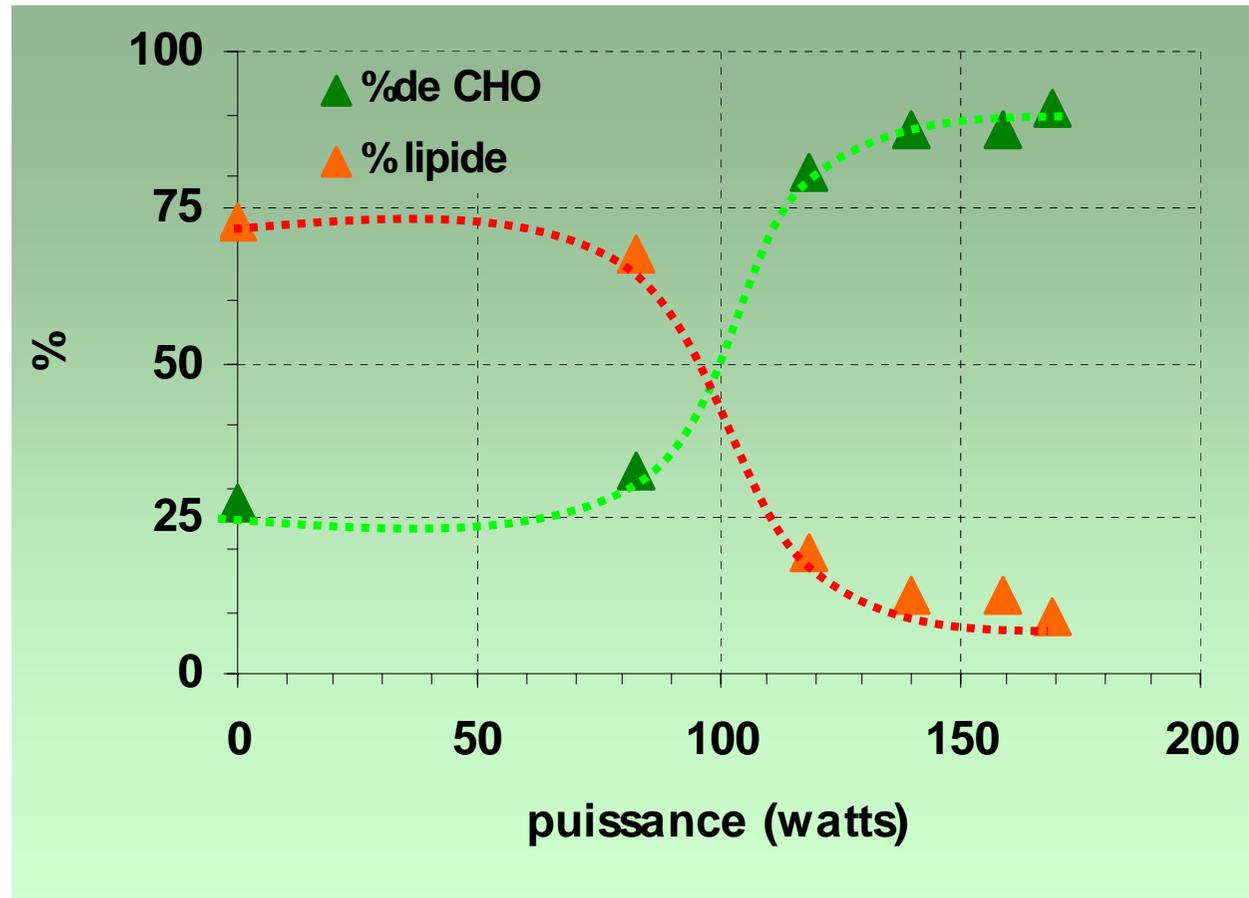
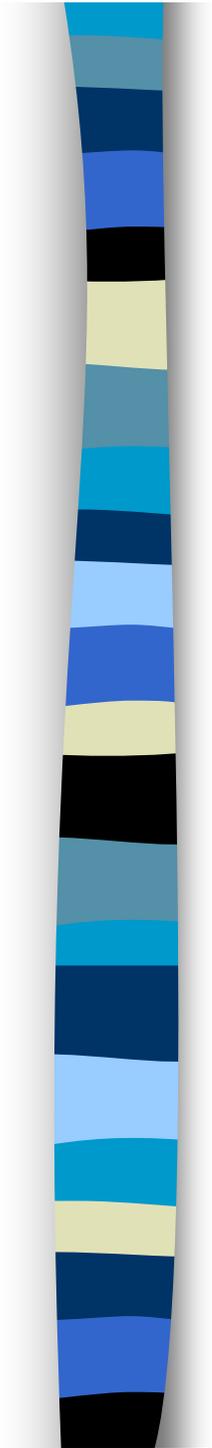
(5,05 kcal/l : quantité d'énergie libérée lors de l'utilisation d'un litre d'O<sub>2</sub> quand les glucides seulement sont utilisés)

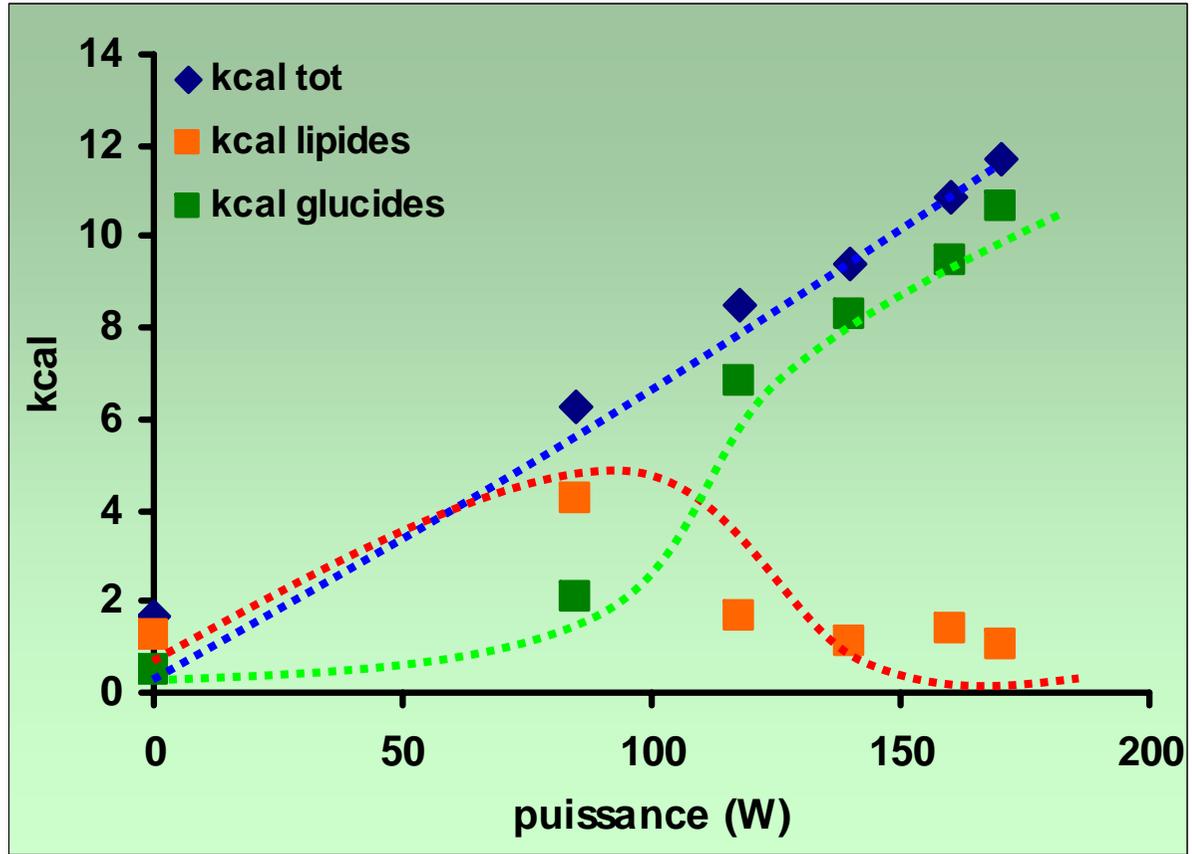
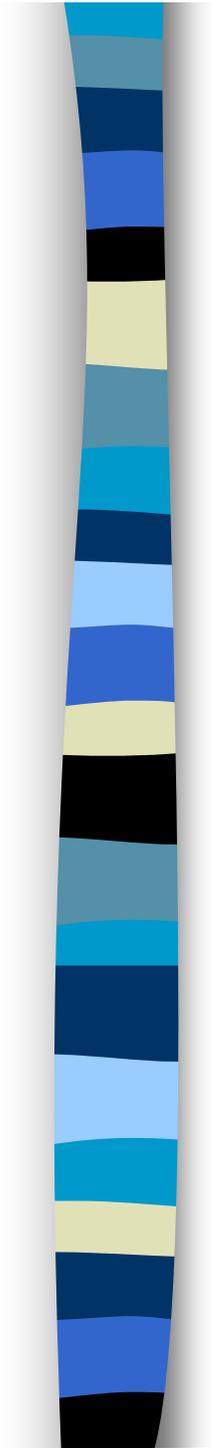
(4,7 kcal/l : quantité d'énergie libérée lors de l'utilisation d'un litre d'O<sub>2</sub> quand les lipides seulement sont utilisés)

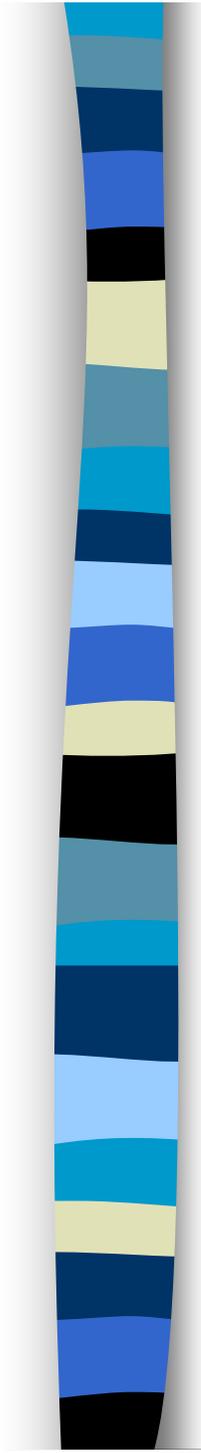
### Exemple :

Un athlète réalise un exercice continu avec des paliers de 10 min à différentes intensités.

Watts	QR	% glucide	% lipide	depense En
0	0,79	28	72	1,7
85	0,80	33	67	6,3
118	0,94	80	20	8,5
140	0,96	88	13	9,4
160	0,96	87	13	10,9
170	0,97	91	9	11,7







## IV) Métabolisme protéique

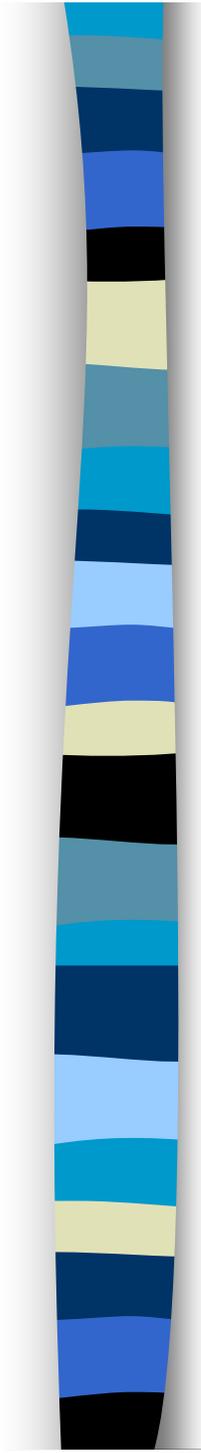
Homme actif de 70 kg : 6 kg de protéines (poids sec)

↪ muscles et foie.

400 g sont catabolisées par jour :

→ 300 g sont captés et resynthétisés en protéines.

→ 100 g sont oxydés en  $CO_2$ ,  $H_2O$  et déchets azotés.



Protéines (foie, muscle)

↓ Protéolyse

Acides aminés

Exercice

Récupération

Désamination  
perte  $\text{NH}_3$

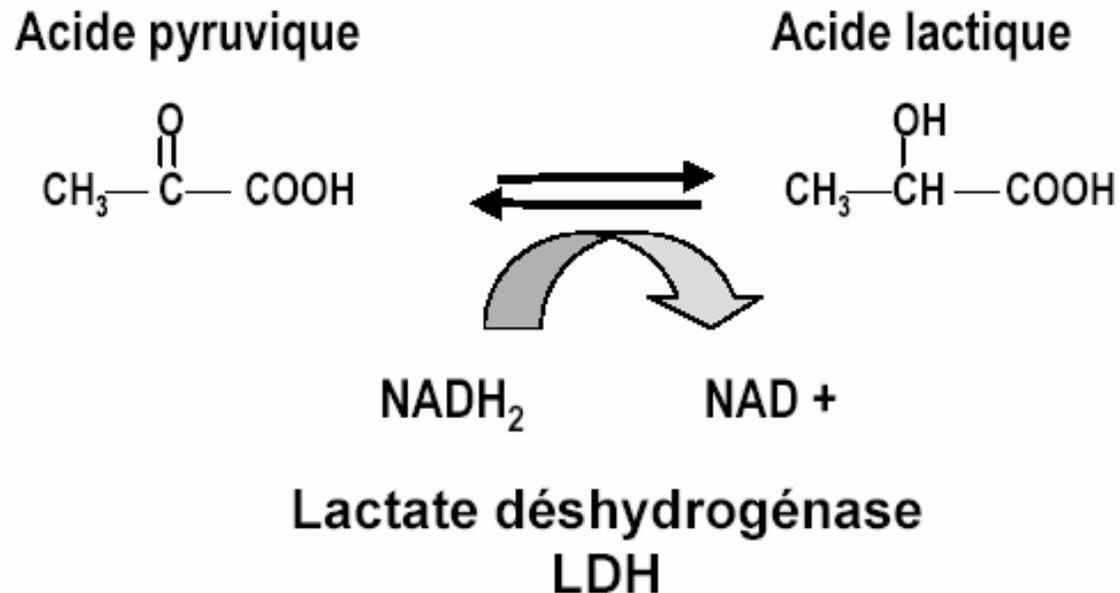
Resynthèse de protéines

- Source d'énergie directe (substrats du cycle de Krebs)

- Source d'énergie indirecte (néoglucogénèse)

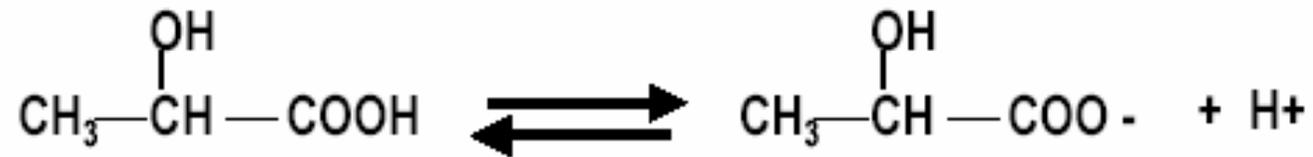
## Le lactate

A l'effort, on a une production d'acide pyruvique, qui va être réduit en acide lactique par la LDH



On possède 5 types de LDH, qui vont agir au sein des différents tissus (muscle, foie, cœur)

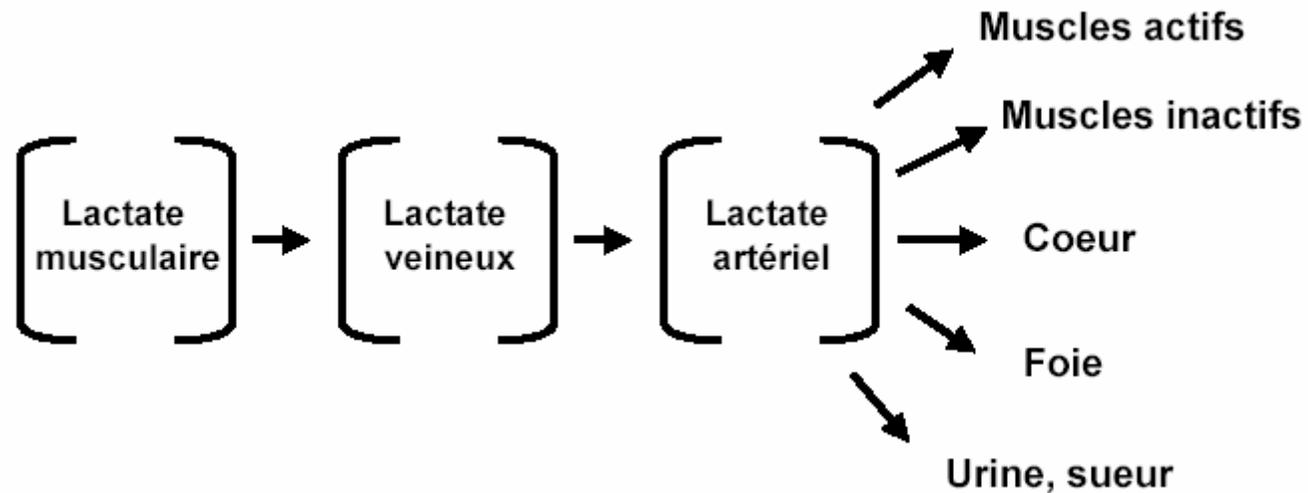
L'acide lactique est aussitôt dissocié :

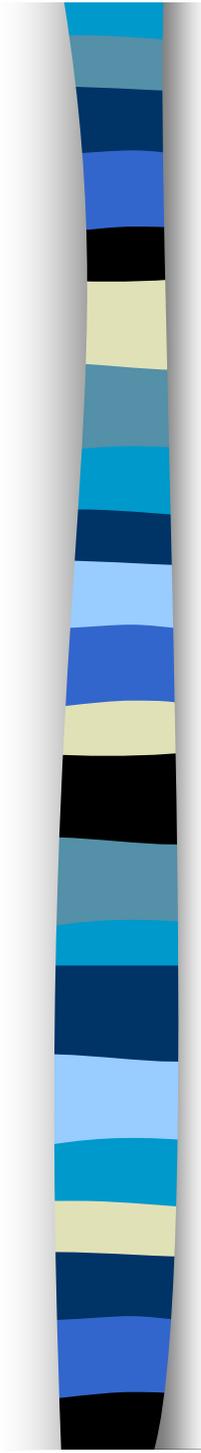


Acide lactique

Lactate + H<sup>+</sup>

Chemin du lactate pendant l'effort :





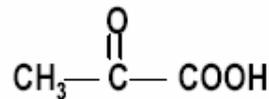
## Devenir du lactate

- Dans les muscles actifs : réoxydation en pyruvate, puis cycle de Krebs (pour 80%)
- Dans les muscles inactifs : idem, mais de façon moins importante (moindre irrigation sanguine)
- Dans le cœur : réoxydation en pyruvate, puis cycle de Krebs (jusqu'à 60% de l'énergie du provient du lactate)
- Dans le foie : capture puis cycle de Cori
- Dans la sueur et l'urine : une partie minime du lactate, au cours d'effort long

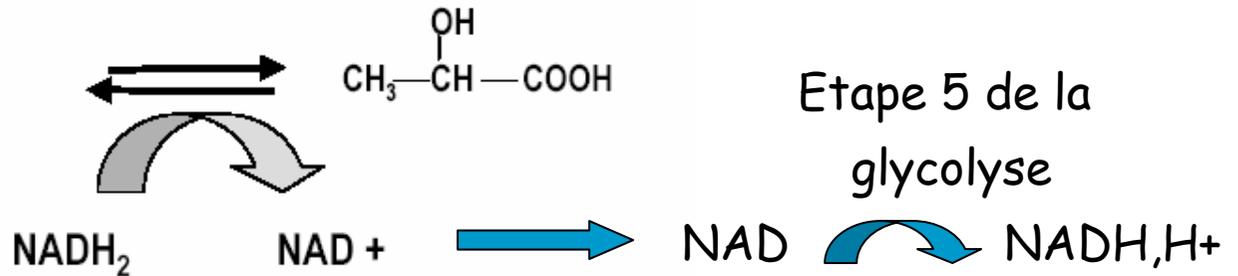
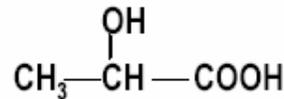
## Rôle du lactate

La production de lactate a pour but de régénérer les équivalents réduits afin de réalimenter la glycolyse (étape 5).

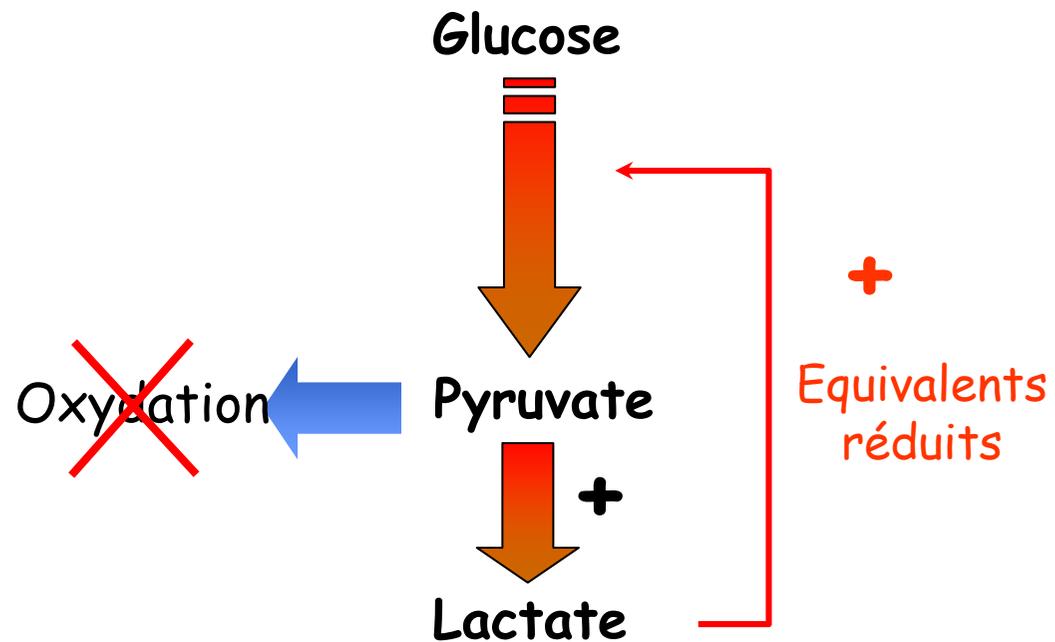
Acide pyruvique



Acide lactique



En cas de baisse temporaire en O<sub>2</sub>



Ralentissement de la glycolyse mais maintien d'un minimum énergétique acceptable

## En cas de baisse prolongée d'O<sub>2</sub>

