

## 23. Énergie Métabolique

### 23.2 – Métabolisme aérobie

François Péronnet, Ph.D, Université de Montréal

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Bastien Thomasset, M.Sc.A.

Coralie Banon, M.Ing.

Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Plan de la présentation

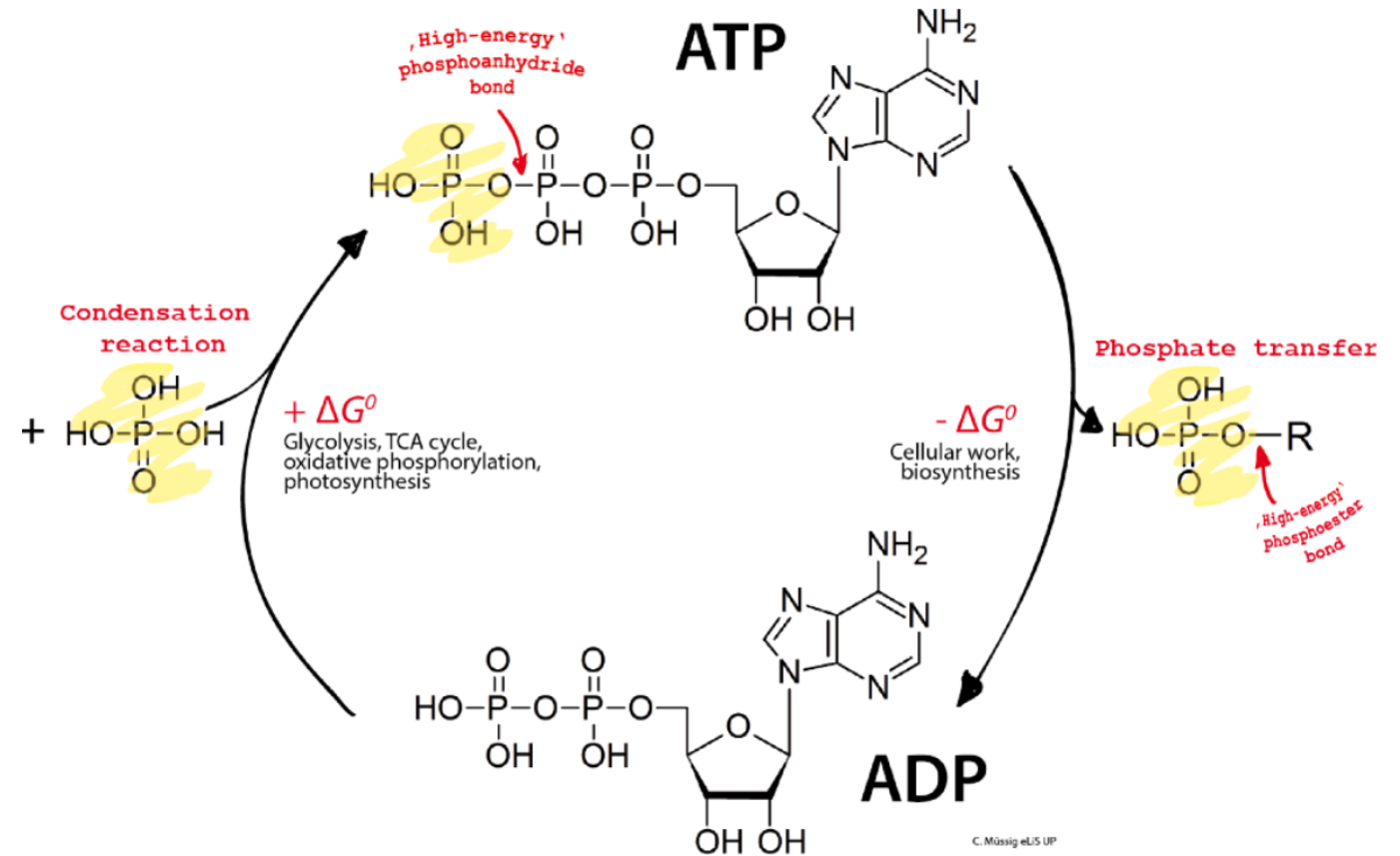
- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

# Introduction et objectifs de la capsule

- Dans l'organisme l'énergie finale nécessaire aux fonctions énergie-dépendantes est fournie par l'hydrolyse de l'ATP (adénosine triphosphate)
- L'ATP est constamment resynthétisé à partir de l'oxydation des nutriments qui sont des donneurs d'électrons (réducteur), en présence d'un accepteur d'électrons



Lien avec 23.1

# Introduction et objectifs de la capsule

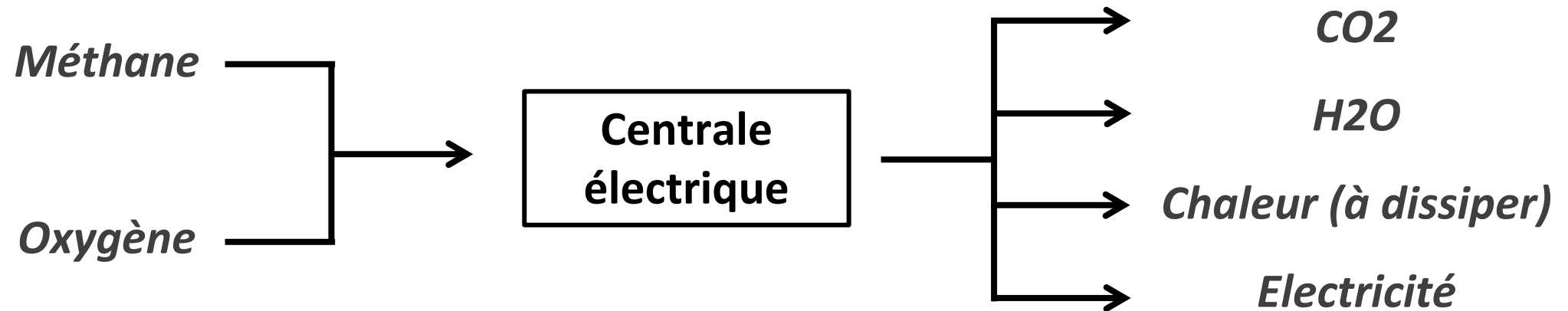
- Deux principaux métabolismes permettent de transformer l'énergie chimique contenue dans les nutriments (**glucides, lipides, protéines**) en énergie utile (**ATP**) : aérobie et anaérobie
- Cette capsule présente le **métabolisme aérobie** avec pour objectifs :
  - Comprendre le fonctionnement du métabolisme aérobie et identifier ses différents acteurs ainsi que leurs contributions ;
  - Connaître l'étendue du métabolisme aérobie, les puissances mises en jeu, et la manière de les mesurer ;
  - Analyser quelques situations simples pour quantifier les puissances aérobies et chimiques, et le rendement de quelques activités.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Analogie simple***
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

# Analogie simple

- Fonctionnement d'une **centrale électrique**

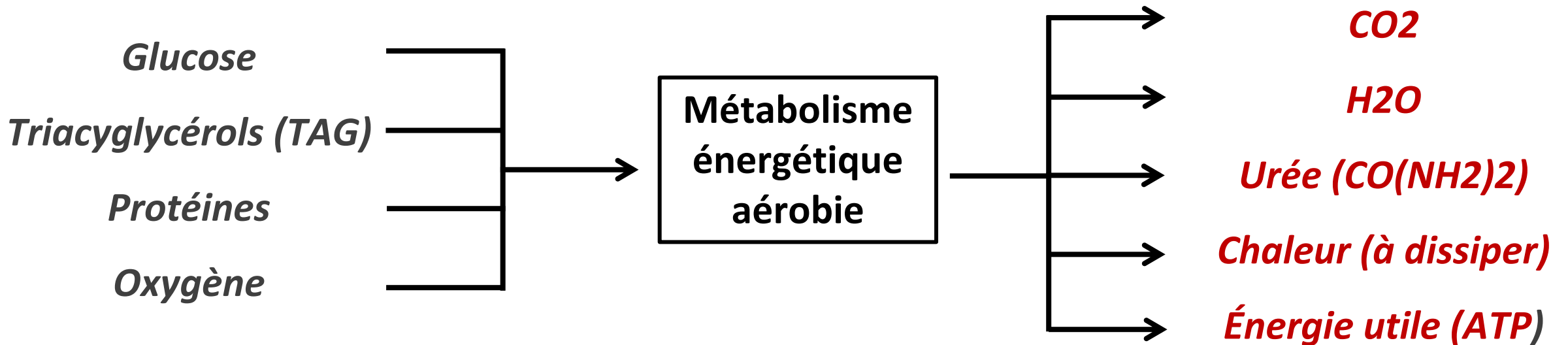


- Réaction de combustion :



# Simple analogie

- Fonctionnement du **métabolisme énergétique aérobie**



- Le glucose et les TAG sont responsables de la production de **CO2** et **H2O**
- L'urée est un déchet azoté obtenu par oxydation des protéines (opérée par le foie)

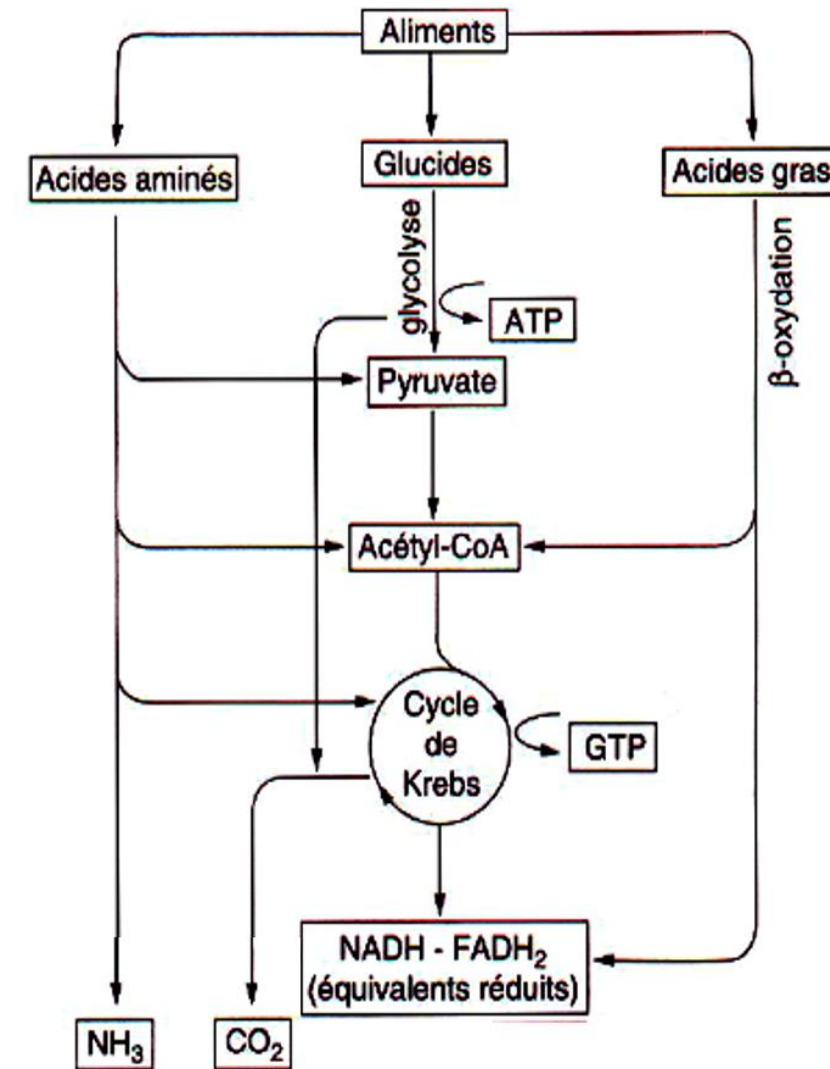


# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- ***Fonctionnement du métabolisme aérobie***
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

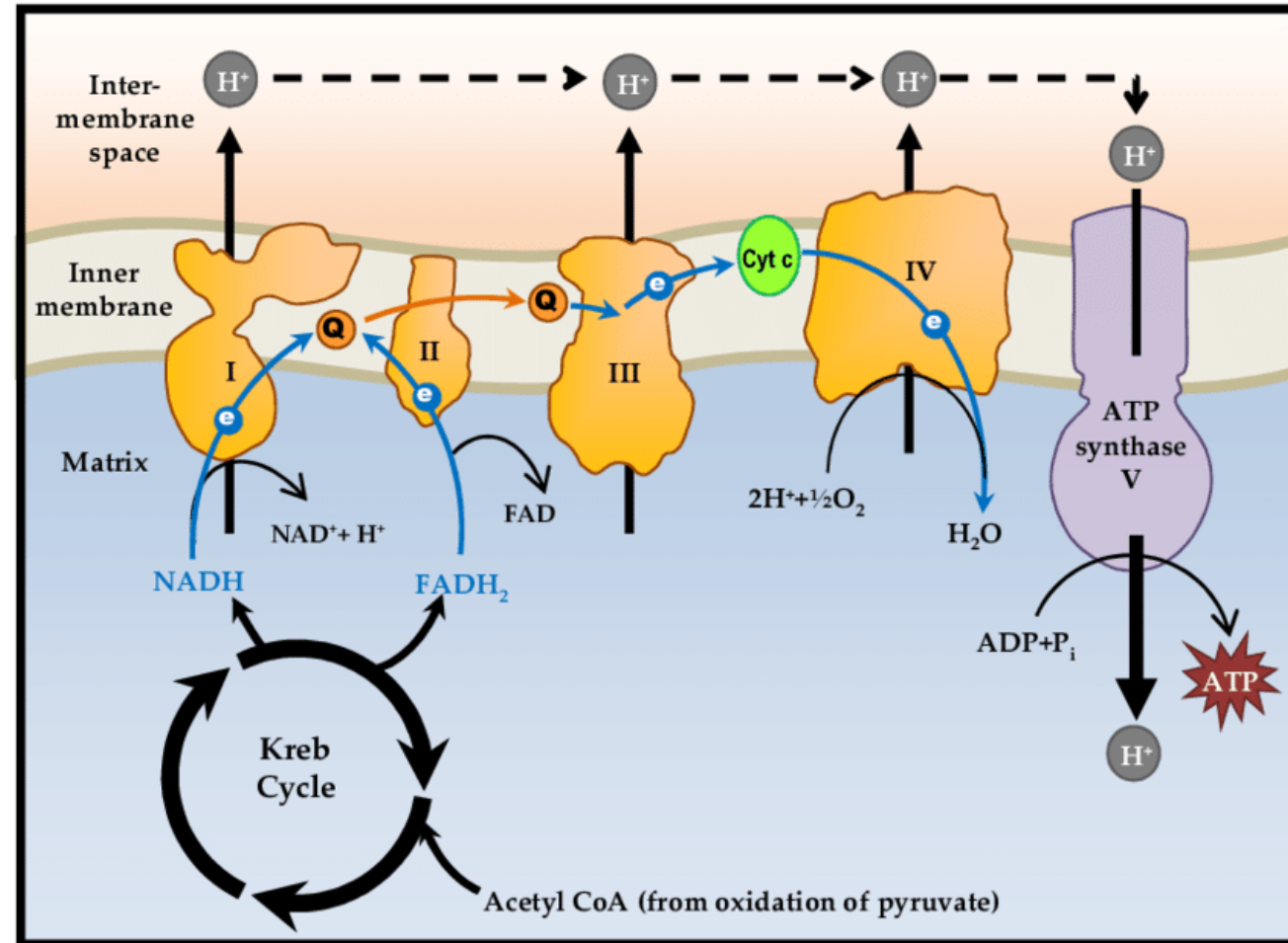
# Fonctionnement du métabolisme aérobie

- **Trois voies métaboliques** différentes produisant de l'**acétyl-CoA** ou acétate (base acide acétique) consommé par le **cycle de Krebs**
  - Béta oxydation : Dégradation des acides gras
  - Glycolyse: **Dégradation du glucose et du glycogène**
  - Dégradation des acides aminés
- **Cycle de Krebs** : produit du **CO<sub>2</sub>** (sans utilisation d'**O<sub>2</sub>**) et du **NADH<sub>2</sub>** et du **FADH<sub>2</sub>** (équivalents réduits ou réducteurs) qui sont **porteurs d'électrons** → potentiel rédox (oxydoréduction) qui vont alimenter l'oxydation phosphorylante



# Fonctionnement du métabolisme aérobie

- **Oxydation phosphorylante :**  
phosphorylation de l'ADP en ATP grâce à l'énergie libérée par l'**oxydation des électrons** par la chaîne respiratoire avec formation d'eau (**O<sub>2</sub> est l'accepteur final des électrons: il est consommé ici**)
- **Chaîne respiratoire :**  
potentiel redox  
→ force proton-motrice
- **ATP synthase mitochondriale :**  
force proton-motrice  
→ potentiel phosphate (ATP)

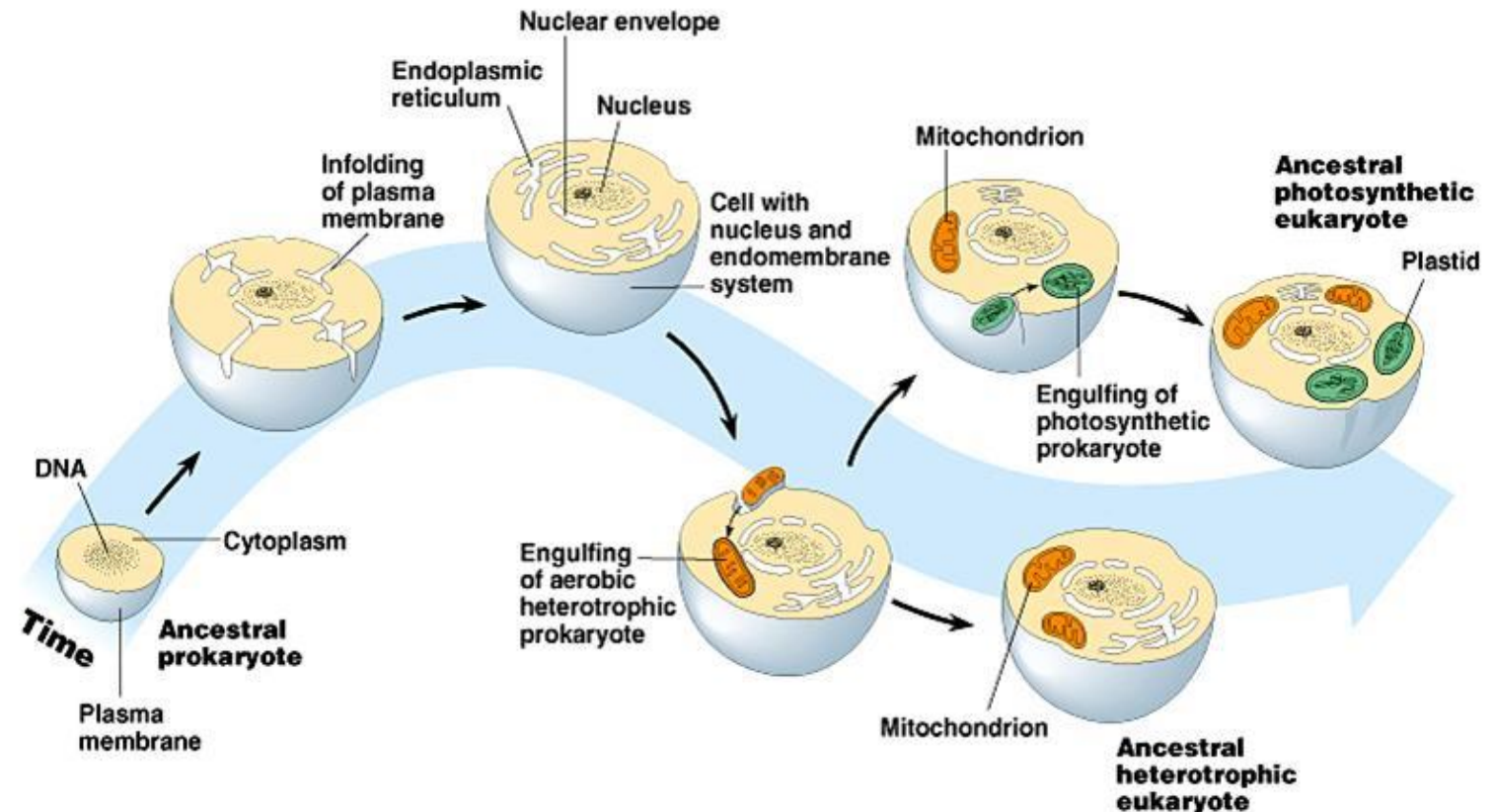


# Fonctionnement du métabolisme aérobie : Mitochondrie

- **Mitochondrie** : Résidu d'une bactérie aérobie qui a été phagocyté par une cellule anaérobie (théorie endosymbiotique). Théorie centrale dans la biologie cellulaire expliquant également la photosynthèse chez les végétaux
- Découvert dans les années 1960 par Lynn Margulis



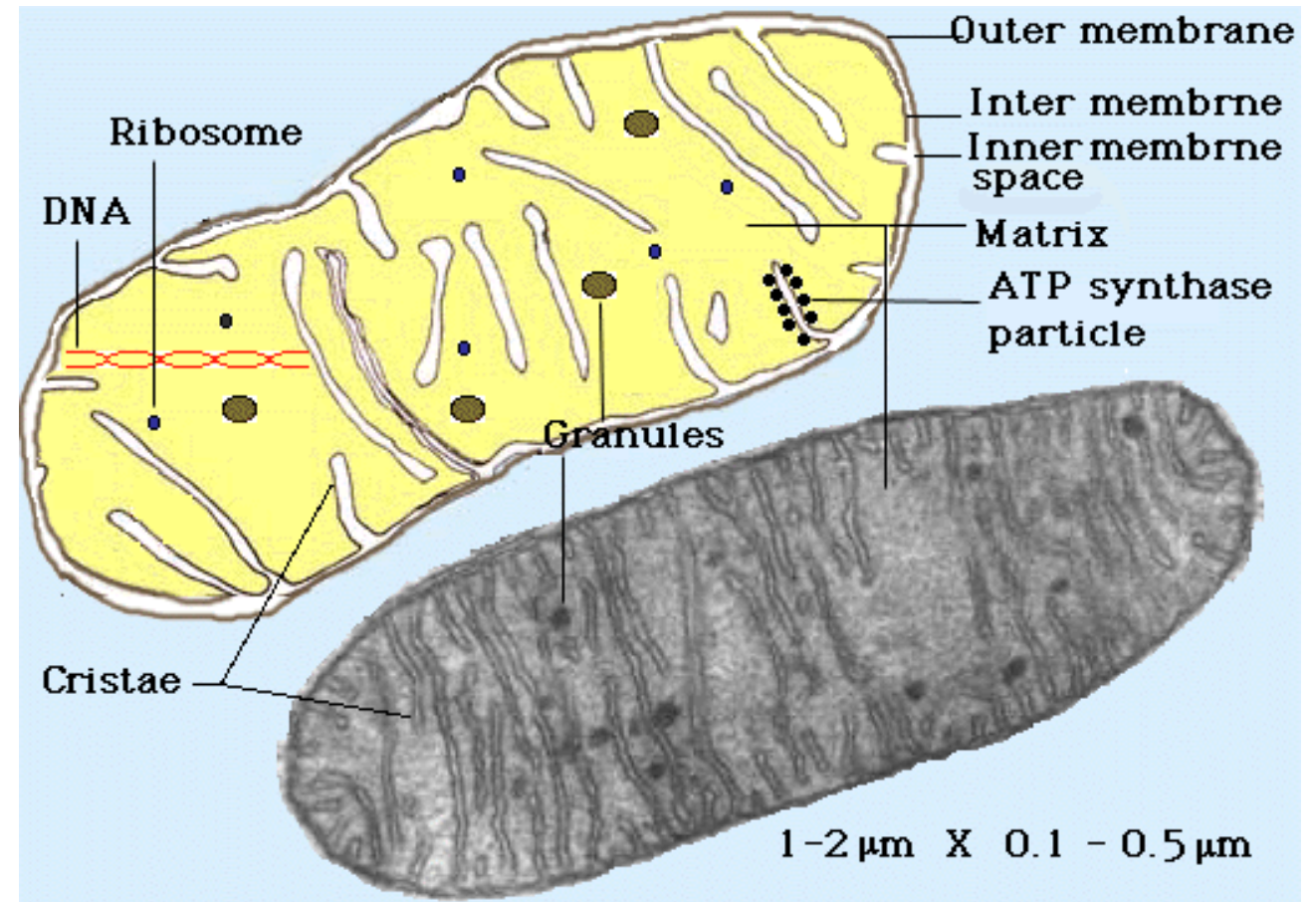
Lynn Margulis



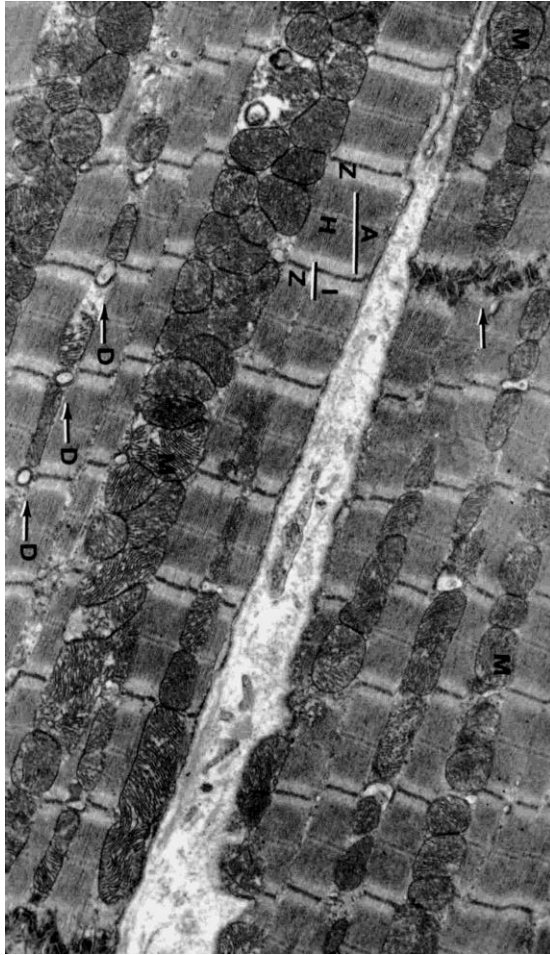
Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

# Fonctionnement du métabolisme aérobie : Mitochondrie

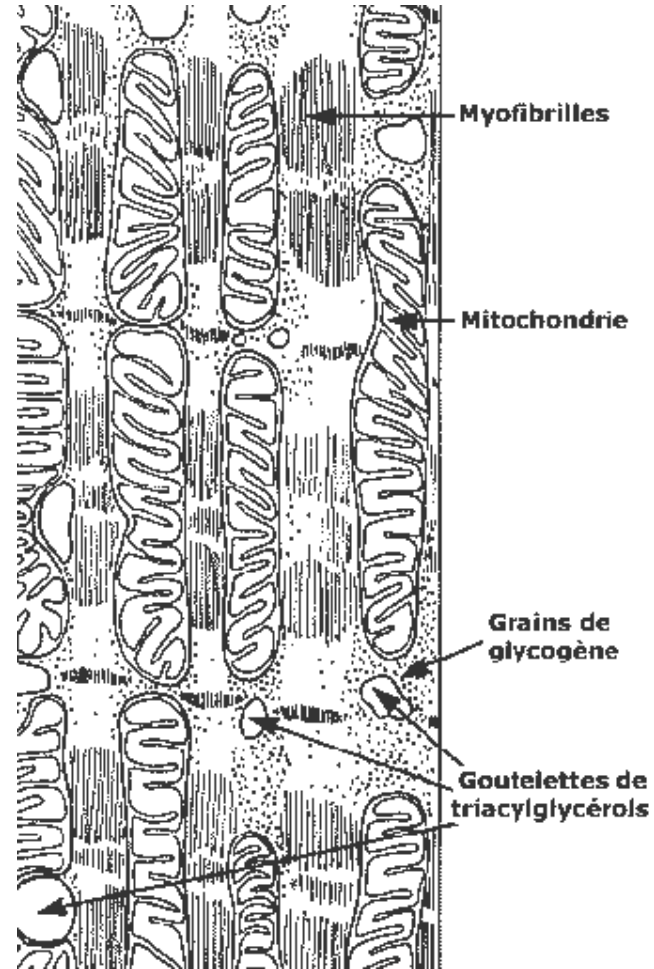
- La production d'ATP et les processus de la chaîne respiratoire, et de l'ATP synthase, ont lieu dans la mitochondrie
- La mitochondrie est un organite (présent à l'intérieur de la cellule) composée d'une membrane externe et d'une membrane interne repliée sur elle-même



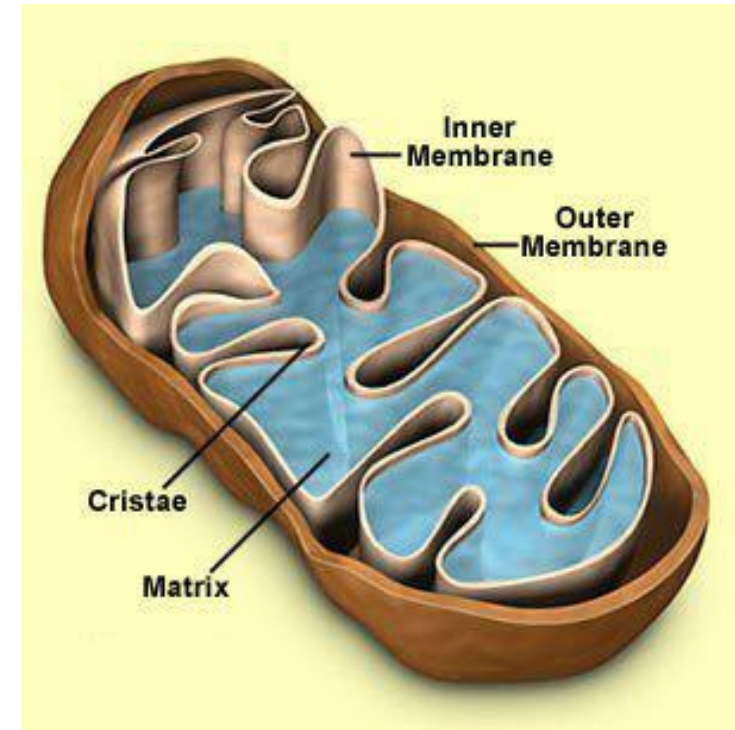
# Fonctionnement du métabolisme aérobie : Mitochondrie



Microscopie  
électronique



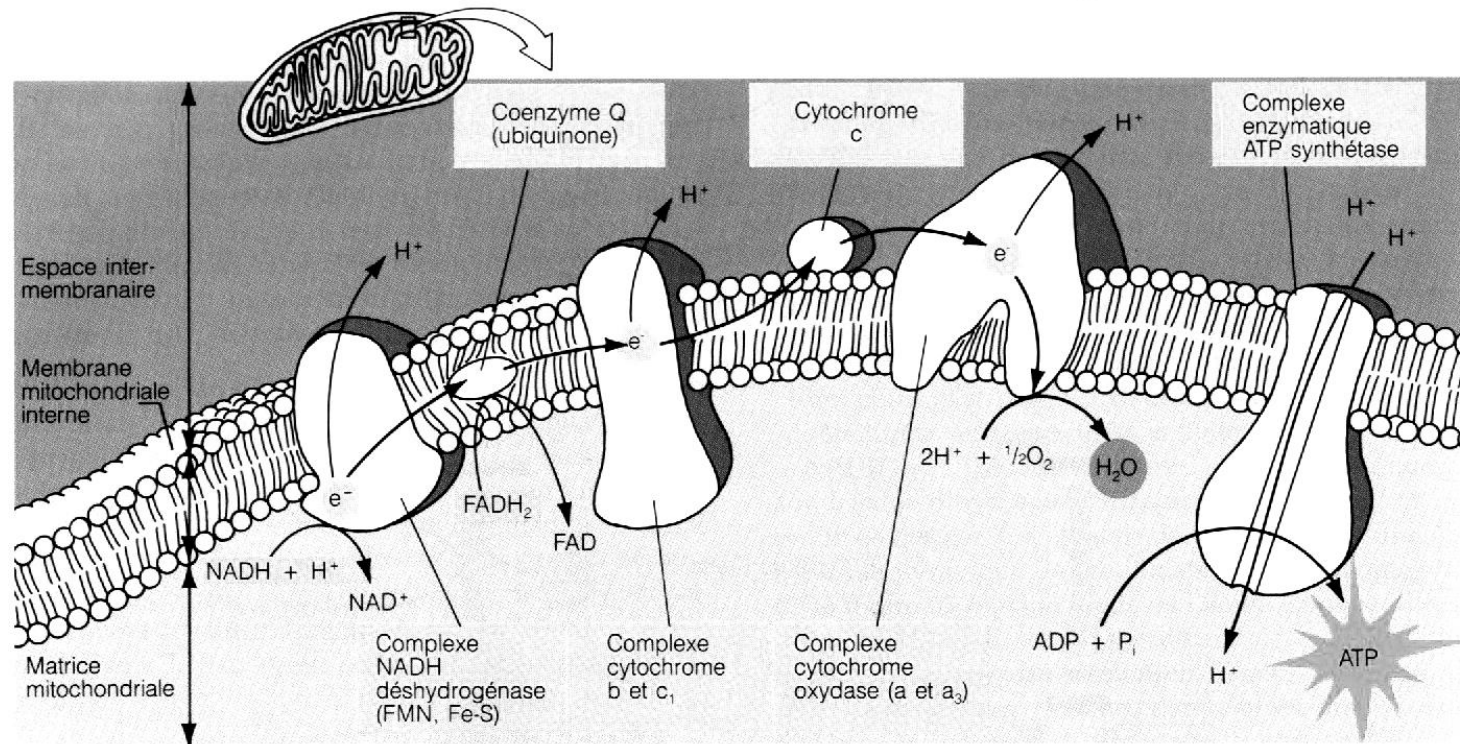
Myofibrilles: protéines responsables de la contraction



# Fonctionnement du métabolisme aérobie

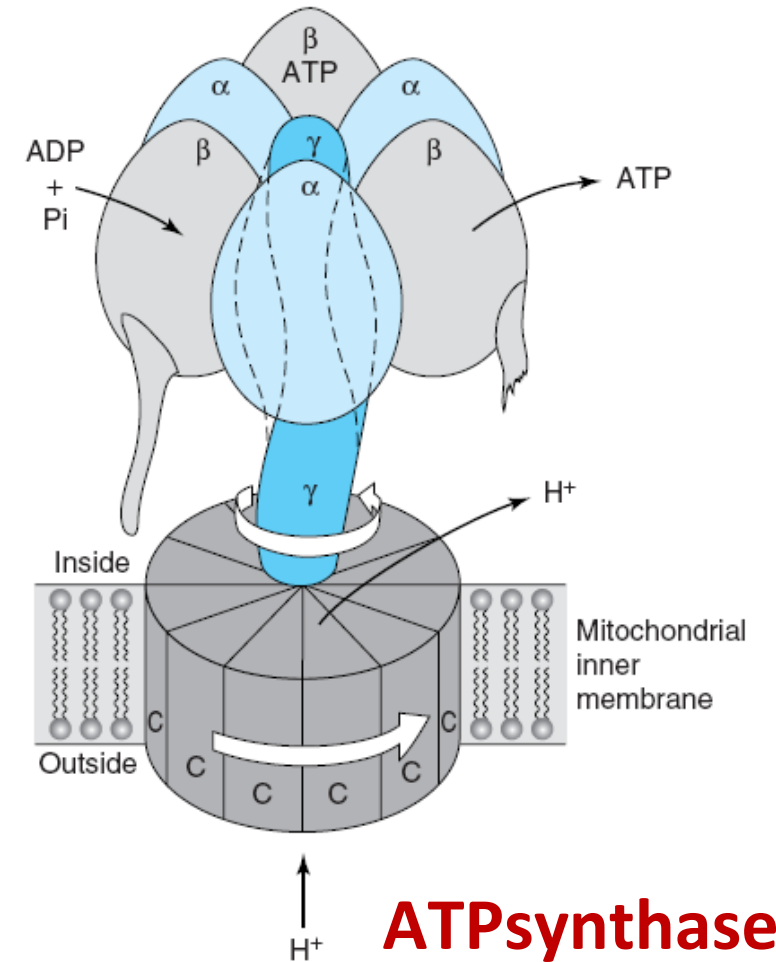
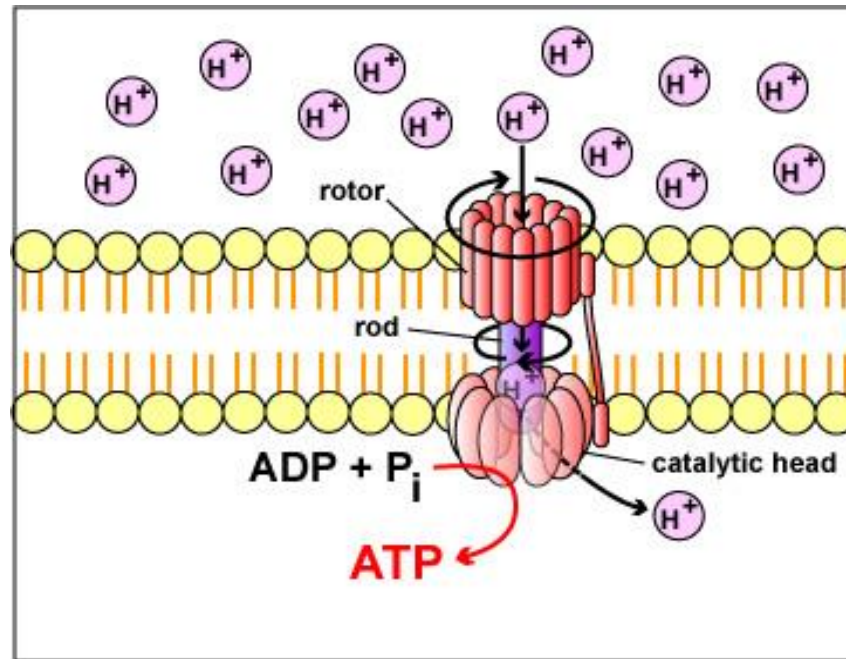
- **Chaîne respiratoire et ATPsynthase** : stoéchiométrie variable
  - Fuites (leaking) : force dépendantes
  - Patinage (slipping) : flux dépendant
  - Variation de stoéchiométrie de l'ATPsynthase/ase
  - **Rendement variable**

Lien avec 23.1



# Fonctionnement du métabolisme aérobie

- **Force proton-motrice :**
  - Gradient électrochimique de part et d'autre d'une membrane **généralisé par la différence de concentration** de protons
  - Utilisée pour régénérer l'ATP grâce à l'ATP synthase
  - « **moteur énergétique** » de nombreux transporteurs membranaires



**ATP synthase**

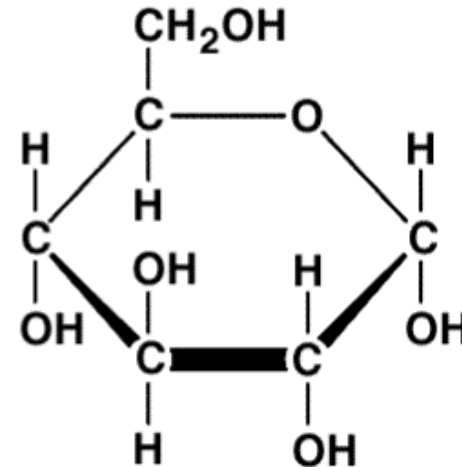
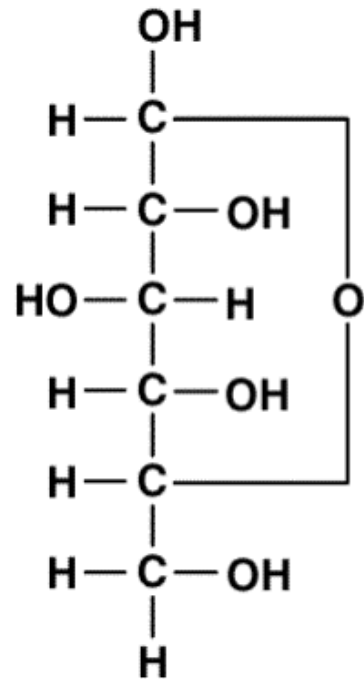


# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- ***Oxydation des nutriments***
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

# Oxydation des nutriments : Glucose

- Oxydation du **glucose** (masse molaire de 180 g/mol) :



Glucose

# Oxydation des nutriments : Glucose

- **Potentiel énergétique du glucose** : 3,72 kcal / g ou 669 kcal / mol

$$VCO_2 = VO_2 = 6 * 22,4 = 134,4 \text{ L/mol}$$

- Quotient respiratoire (QR) :  $\frac{VCO_2}{VO_2} = 1$
- **Equivalent énergétique de l'O<sub>2</sub> (oxydant du glucose)** :  $\frac{669,6}{134,4} = 4,98 \text{ kcal / L}$
- **Equivalent énergétique du CO<sub>2</sub> (produit par l'oxydation du glucose)** :  $\frac{669,6}{134,4} = 4,98 \text{ kcal / L}$

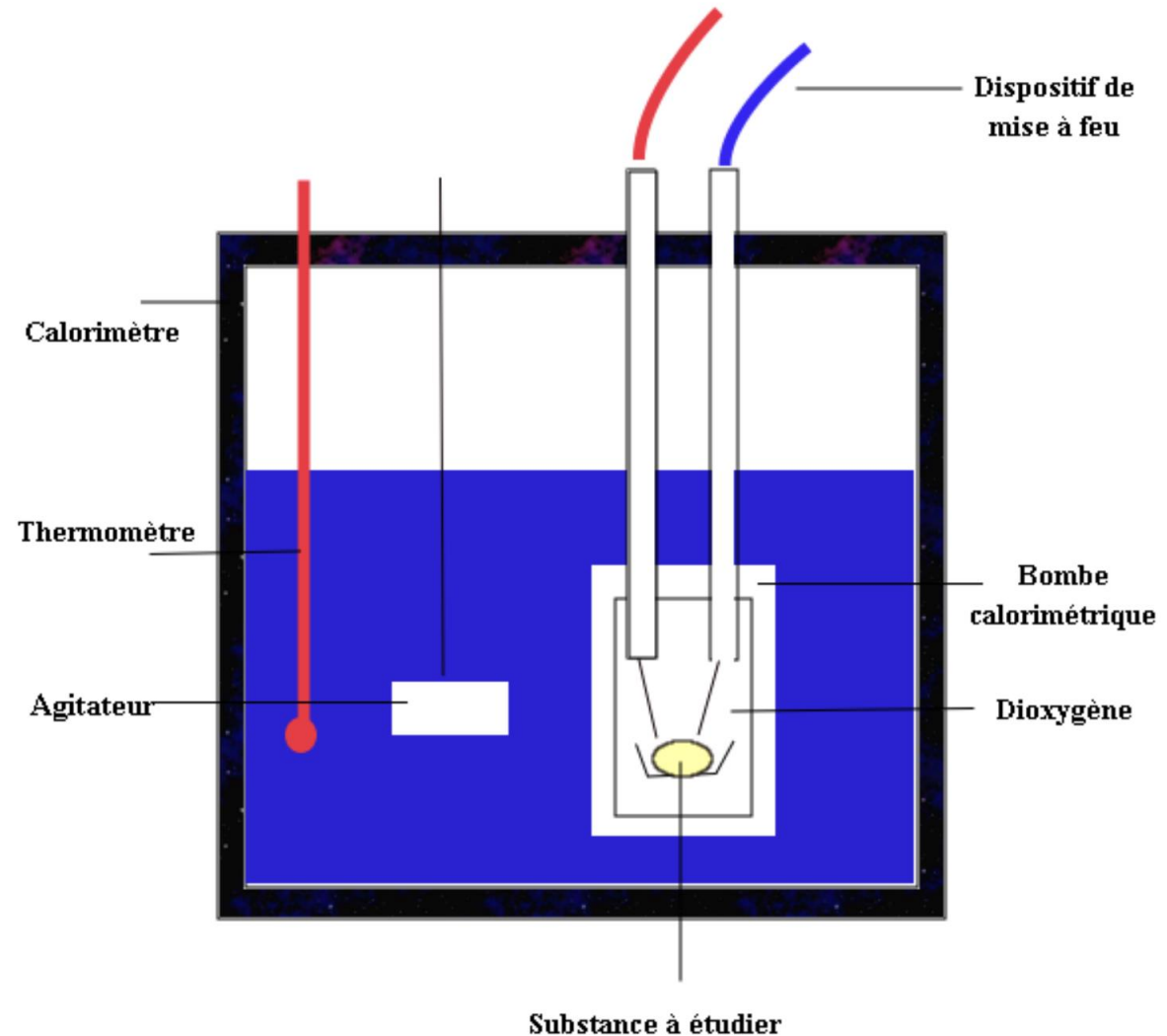
Lien avec 23.1

# Oxydation des nutriments : Mesure de l'énergie

- La quantité d'énergie stockée dans les aliments, appelée **potentiel énergétique**, est mesurée à l'aide d'un appareil appelé bombe calorimétrique.
- La bombe calorimétrique est capable de supporter la combustion et de mesurer le dégagement de chaleur.
- La chaleur dégagée par la réaction est directement proportionnel à la quantité d'énergie contenue dans l'aliment.

# Oxydation des nutriments : Mesure de l'énergie

- Les aliments sont placés à l'intérieur du calorimètre et brûlent de façon « explosive » dans de l'O<sub>2</sub> pur
- La chaleur dégagée lors de la combustion est simplement égale à la variation de l'énergie interne du système :  $Q = \Delta U$
- Le pouvoir calorifique (J/g) est déterminé grâce à la proportionnalité entre la quantité d'énergie contenue dans l'aliment et la chaleur mesurée

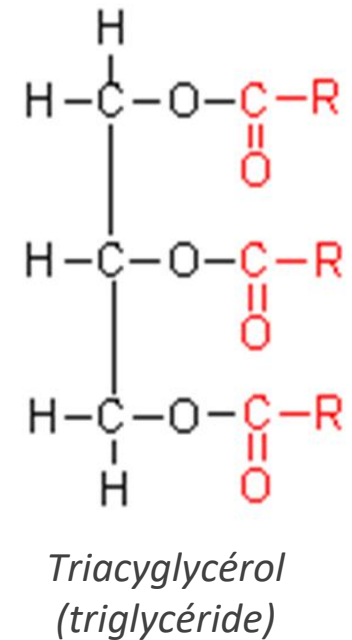
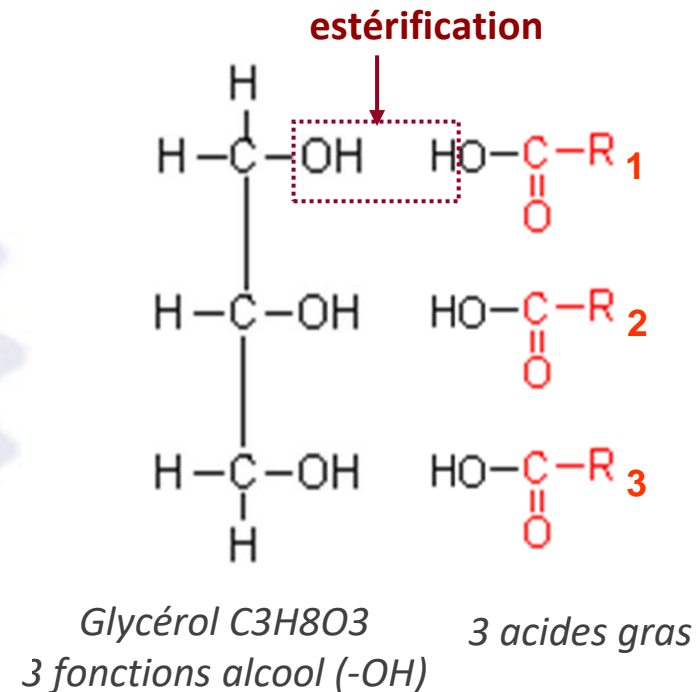
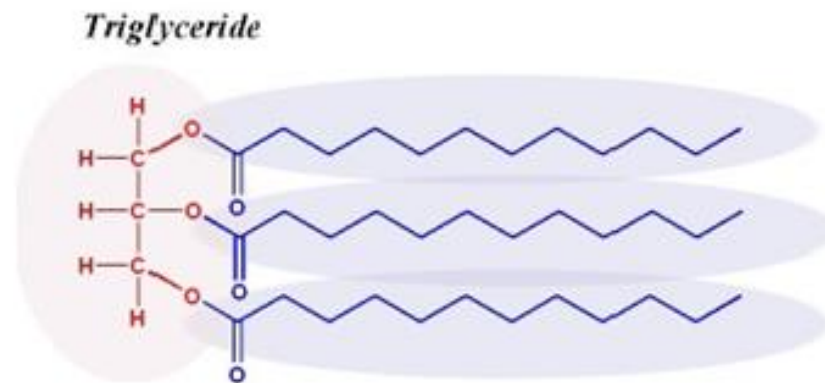
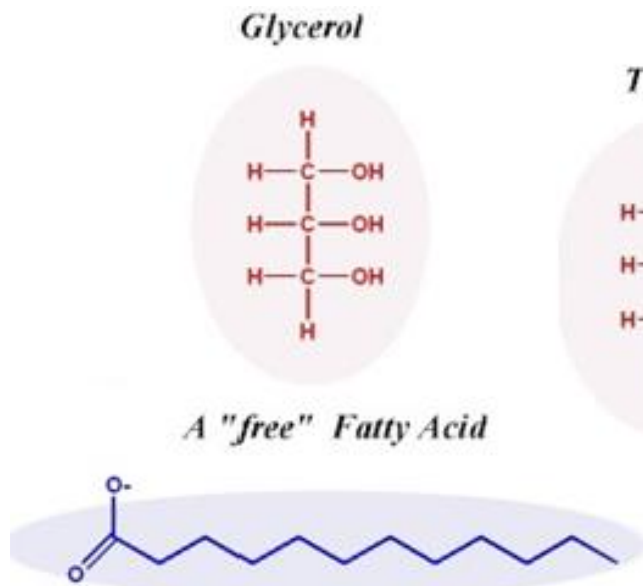


# Oxydation des nutriments : Acides gras

- Sur le plan bioénergétique il existe 7 principaux **acides gras** à longue chaîne > 12 (LCT) :
  - C14:0 Myristique (~ 2,5 % des réserves)
  - C16:0 Palmitique (~ 20 % des réserves)
  - C16:1 Palmitoléique (~ 6,5 % des réserves / oméga 7)
  - C18:0 Stéarique (~ 4 % des réserves)
  - C18:1 Oléique (~ 46 % des réserves / oméga 9)
  - C18:2 Linoléique (~ 16 % des réserves / oméga 6)
  - C18:3 Linoléinique (~ 2 % des réserves / oméga 3)

# Oxydation des nutriments : Acides gras

- Oxydation des **acides gras** (TAG = triacylgcérols ou triglycérides ), exemple du **di-oléo-palmitate** (masse molaire = 859 g/mol) :



# Oxydation des nutriments : Acides gras

- Potentiel énergétique du **di-oléo palmitate** : 9,44 kcal / g ou 8099,5 kJ / mol

$$VCO_2 = 55 * 22,4 = 1232 \text{ L/mol} = 1,436 \text{ LO}_2/\text{g}$$

$$VO_2 = 77,5 * 22,4 = 1736 \text{ L/mol} = 2,023 \text{ LO}_2/\text{g}$$

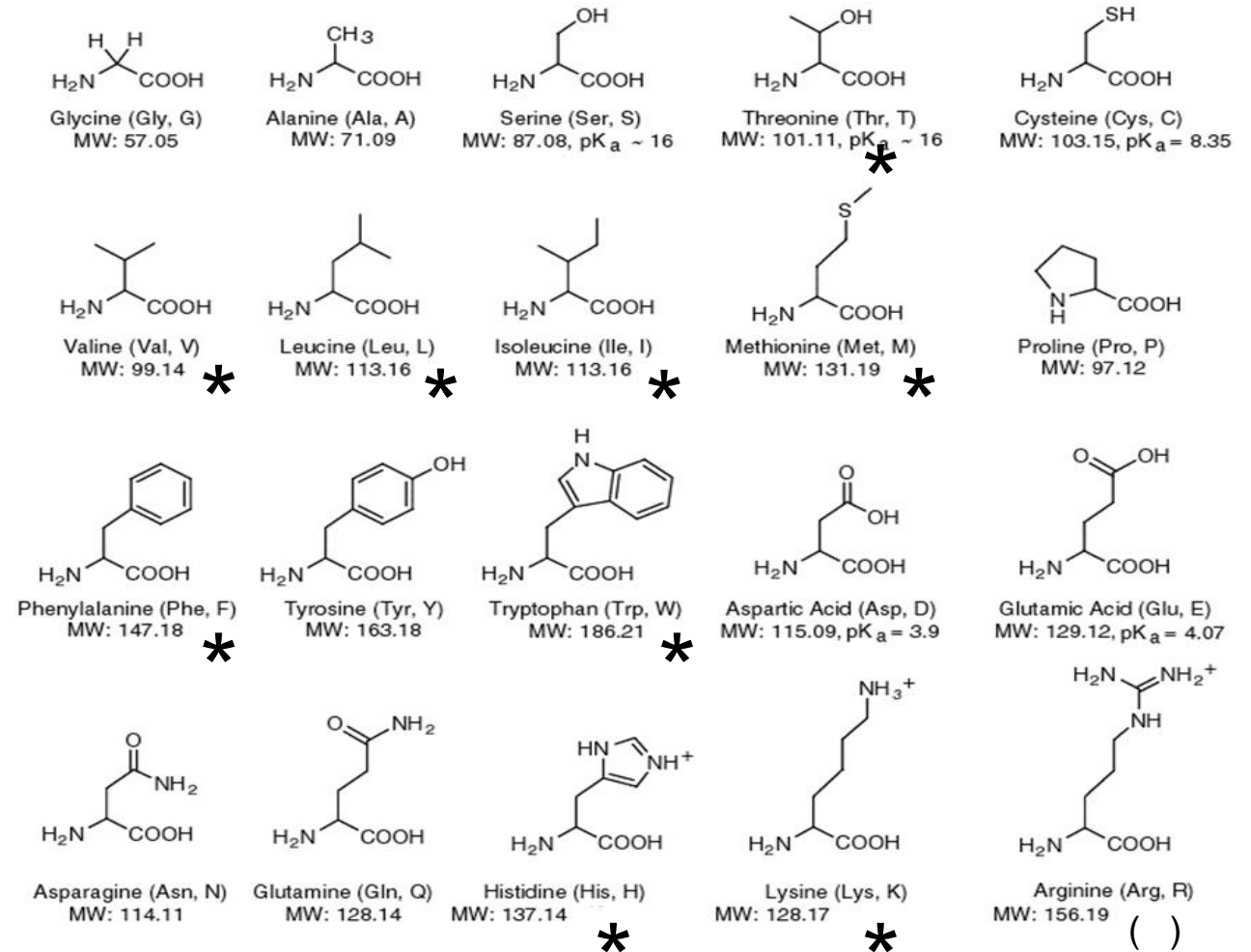
- Quotient respiratoire (QR) :  $\frac{VCO_2}{VO_2} = \frac{1232}{1736} = 0,71$
- Equivalent énergétique de l' $O_2$  (oxydant du **di-oléo palmitate**) :  $\frac{8099,5}{1736} = 4,67 \text{ kcal / L}$
- Equivalent énergétique du  $CO_2$  (produit par l'oxydation du **di-oléo palmitate**) :

$$\frac{8099,5}{1232} = 6,57 \text{ kcal / L}$$



# Oxydation des nutriments : Acides aminés

- Sur le plan bioénergétique il existe 20 **acides aminés** dont 9 essentiels (\*)
- Important de noter qu'une protéine est une chaîne d'acides aminés



# Oxydation des nutriments : Acides aminés

- Oxydation des **acides aminés**, exemple de la protéine standard de Kleiber (masse molaire = 2237,5 g) :



- Potentiel énergétique de la protéine de **Kleiber** : 4,7 kcal/g ou 10 504 kcal/mol :

$$VCO_2 = 348 * 22,4 = 7795,2 L/mol$$

$$VO_2 = 417 * 22,4 = 9340,8 L/mol$$

- Quotient respiratoire (QR) :  $\frac{VCO_2}{VO_2} = \frac{7795,2}{9340,8} = 0,835$

- **Equivalent énergétique de l'O<sub>2</sub>** (oxydant) :  $\frac{4 * 10\ 504}{9340,8} = 4,5 \text{ kcal / L}$

- **Equivalent énergétique du CO<sub>2</sub>** (produit de l'oxydation) :  $\frac{4 * 10\ 504}{7795,2} = 5,4 \text{ kcal / L}$

# Oxydation des nutriments : Table énergétique

ENERGY

109

- Chaleur de combustion de divers macronutriments :
  - *Potentiel énergétique*
  - *Equivalent énergétique*
  - *QR*
  - *Facteurs d'Atwater (valeurs approximatives pour calcul rapide)*

**TABLE 5-1** Heat of Combustion of Various Macronutrients

Macronutrient	Heat of Combustion <sup>a</sup> (kcal/g)	kcal <sup>b</sup> /L O <sub>2</sub>	RQ <sup>c</sup> (CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> )	Atwater Factor <sup>d</sup> (kcal/g)
Starch	4.18	5.05	1.0	4.0
Sucrose	3.94	5.01	1.0	4.0
Glucose	3.72	4.98	1.0	4.0
Fat	9.44	4.69	0.71	9.0
Protein by combustion <sup>a</sup>	5.6			
Protein through metabolism <sup>a</sup>	4.70	4.66	0.835	4.0
Alcohol <sup>e</sup>	7.09	4.86	0.67	—

*Tiré de : Merrill et al.*

Lien avec 23.1

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- ***Calorimétrie indirecte respiratoire approximative***
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

# Calorimétrie indirecte respiratoire

- **Calorimétrie indirecte respiratoire**: échanges gazeux respiratoires (embout ou masque)
- Les quantités d'O<sub>2</sub> consommé et de CO<sub>2</sub> produit à la bouche, et d'urée excrétée dans l'urine (et la sueur) permettent de connaître les quantités de substrats oxydés
- **Tous les nutriments consommés doivent être oxydés**, si on ne mange que des lipides on oxydera que des lipides



# Calorimétrie indirecte respiratoire approximative

- **Calorimétrie indirecte respiratoire approximative** : Mesure de  $VO_2$  à la bouche au repos (pendant 5 à 10 min) et pendant 2 ou 3 après 4 ou 5 minutes d'exercice (état stable):

$$VO_2 = V_{insp} * Frac_{inspO_2} - V_{exp} * Frac_{expO_2}$$

- Rapporté à 1 atm, 0°C, gaz sec (STPD)
  - $V_{insp} \approx V_{exp}$  car  $VO_2 \neq VCO_2$
  - $Frac_{inspO_2} = 0,2093$  dans l'air (constant)
  - $Frac_{expO_2} \approx 0,15$  à  $0,17$  dans l'air (variable)
- Énergie aérobie au repos et à l'exercice :  $kcal$  pendant 1 minute =  $VO_2 \times 5 kcal/L$
  - Puissance aérobie au repos et à l'exercice :  $watt = kcal$  pendant 1 minute  $\times 4200 / 60$

# Calorimétrie indirecte respiratoire approximative

- Exemple d'un sujet pédalant à 225 W

- *Au repos :*

$$VO_2 = 7,34 * 0,2093 - 7,06 * 0,1634 = 0,383 \text{ L/min}$$

$$E_{aérobie} = 0,383 * 5 = 1,91 \text{ kcal/min}$$

$$P_{aérobie} = 1,92 * 4200/60 = 134 \text{ W}$$

- *En exercice :*

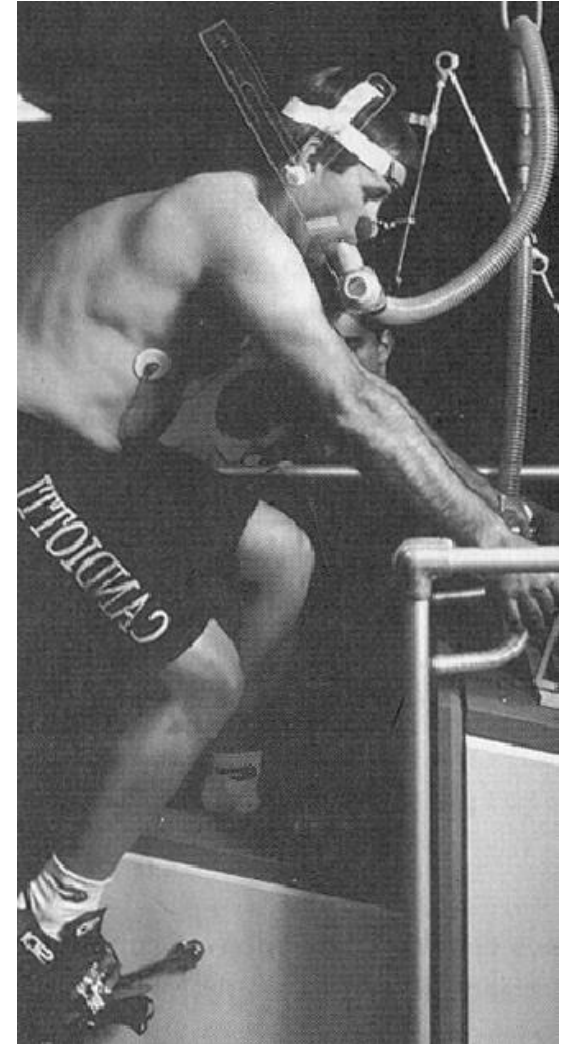
$$VO_2 = 62,35 * 0,2093 - 62,18 * 0,1634 = 2,89 \text{ L/min}$$

$$E_{aérobie} = 2,89 * 5 = 14,45 \text{ kcal/min}$$

$$P_{aérobie} = 14,45 * 4200/60 = 1011 \text{ W}$$

- *Rendement brut :*  $225/1011 * 100 = 22,2 \%$

- *Rendement net :*  $225/(1011 - 134) * 100 = 25,7 \%$



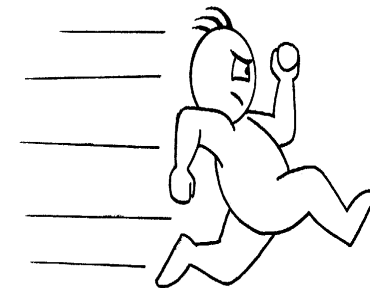
# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- ***Etendue (scope) métabolique aérobie***
- Applications
- Conclusion



# Etendue métabolique aérobie

- Le métabolisme aérobie intervient principalement lors *d'efforts prolongés* et ce à des **intensités** pouvant être **variables**
- 3 puissances aérobiques possibles :
  - *Puissance aérobie de repos (PR)*
  - *Puissance aérobie sous maximale (PA)* : Puissance relative (en %max, multiple de la PR)
  - *Puissance aérobie maximale (PAM)* : Multiple de la PR ; Peut-être soutenue environ 6 à 10 min



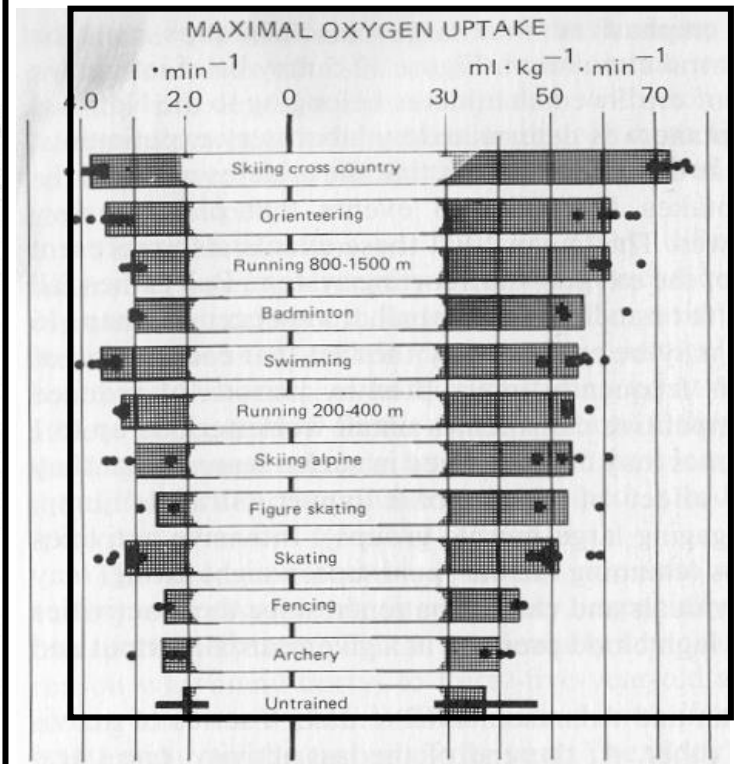
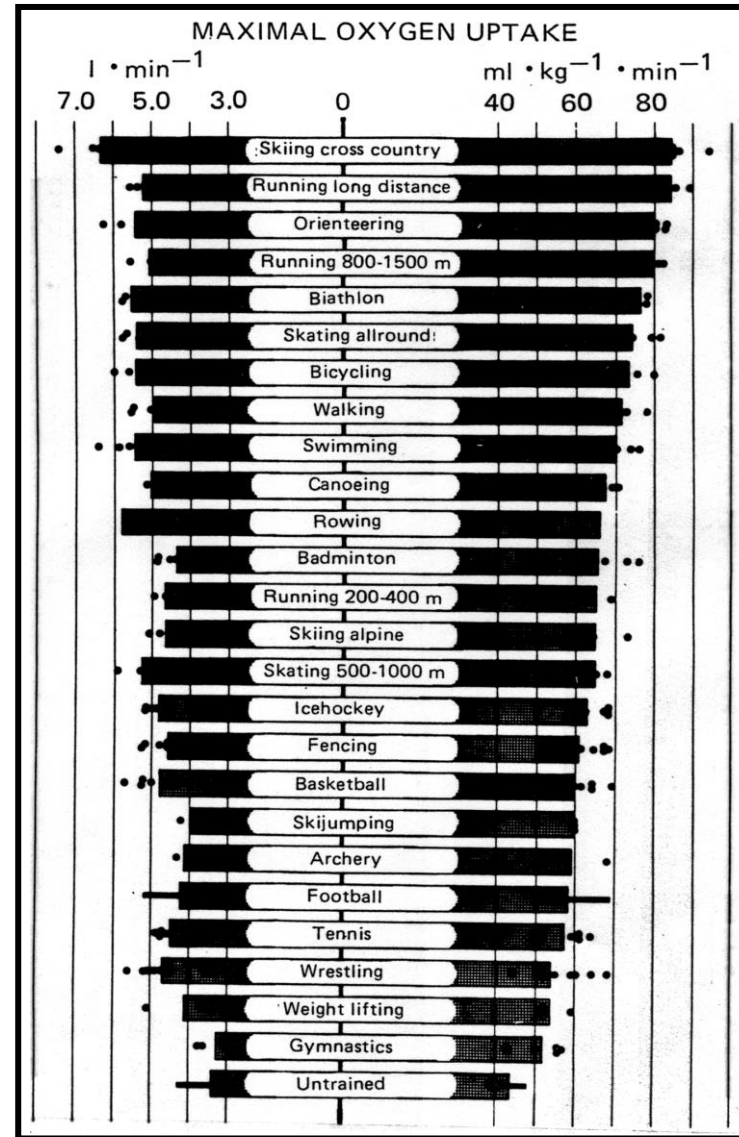
**Étendue métabolique aérobie (aerobic metabolic scope)**

# Etendue métabolique aérobie

- La puissance aérobie est quantifiable selon 3 unités :
  - (watt : Puissance mécanique)
  - **VO<sub>2</sub>max** : Volume maximale d'oxygène qu'un organisme aérobie peut consommer par unité de temps lors d'un exercice dynamique aérobie. Le VO<sub>2</sub> est soit absolue (L/min) ou spécifique (mL/kg.min)
  - **METs** : Un MET équivaut à l'intensité « minimale » soit : être assis, au repos. Des multiples (2 METs, 3 METs, etc.) de la valeur minimale (1 MET) permettent de mesurer l'intensité d'un effort physique et la **puissance du métabolisme aérobie (PAM et PA sous maximale)**

# Etendue métabolique aérobie maximale (VO2max)

- **VO2max** pour les hommes (à gauche) et les femmes (à droite) chez des athlètes de très haut niveau de diverses disciplines, en valeur absolue et spécifique.
- Le VO2 est un **facteur de performance** pour les activités physiques et non, ou peu, techniques.
- VO2max absolu est plus important que le spécifique dans les activités où la masse est portée par un engin (bike, aviron) ou dans lequel la masse ne doit pas être décélérée à chaque foulée ou pas : course vs cross country ski ou patinage.



Femmes

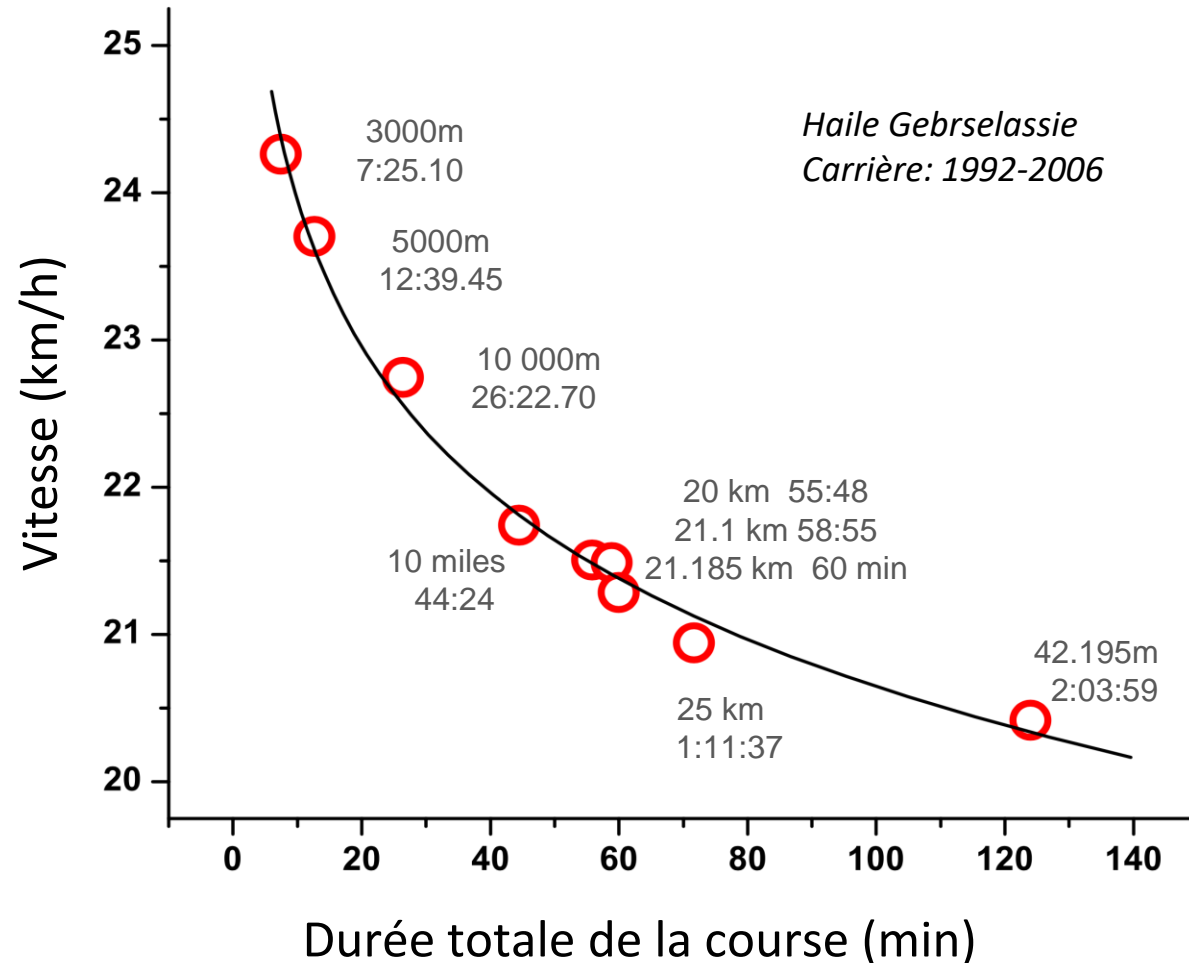
Astrand et al.

Textbook of work physiology  
Human Kinetics, 2003, p 314

Hommes

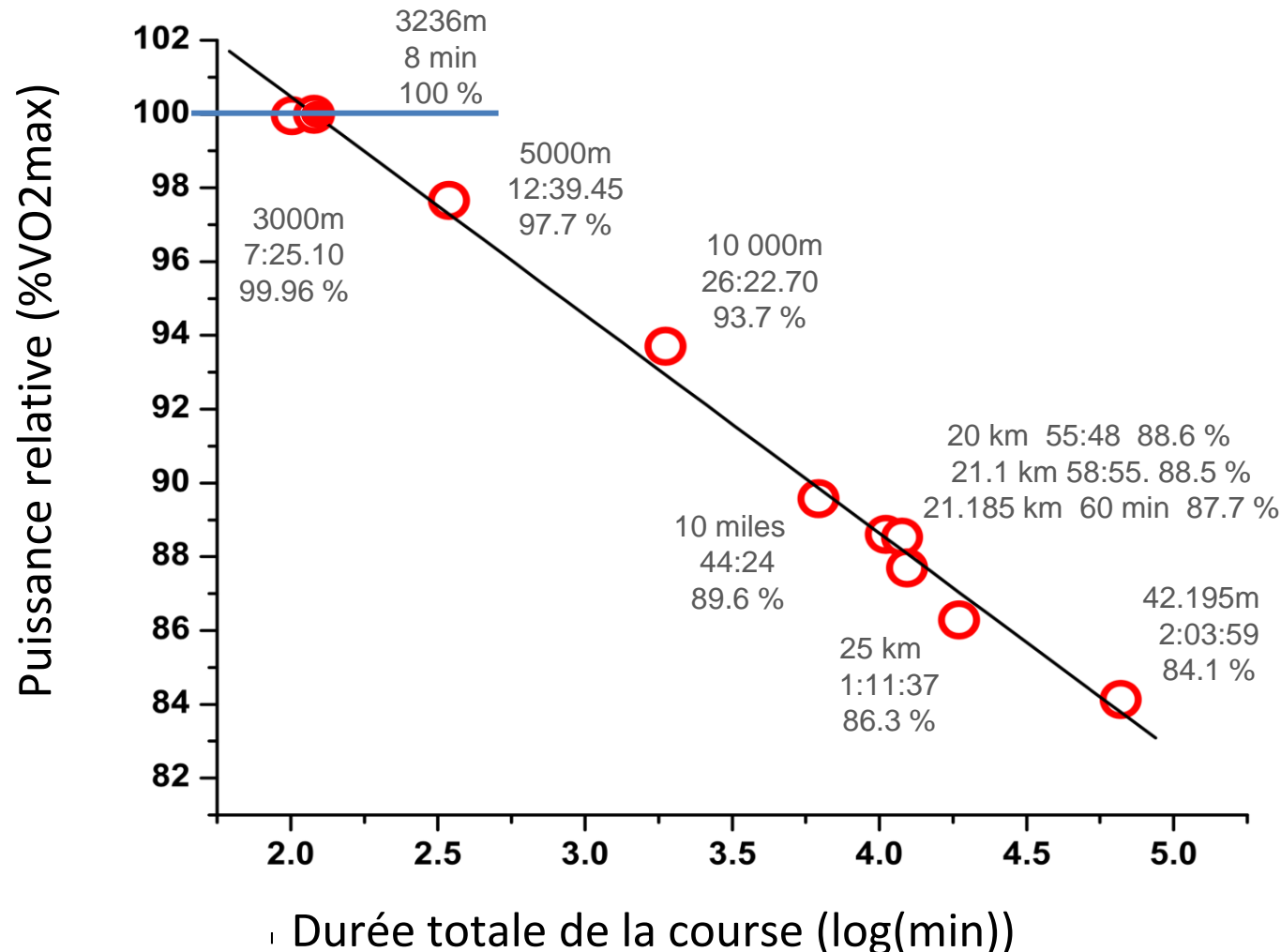
# Etendue métabolique aérobie sous maximale :

## Endurance : capacité de soutenir longtemps un %VO<sub>2</sub>max élevé



# Etendue métabolique aérobie sous maximale :

Endurance: capacité de soutenir longtemps un %VO2max élevé



- Conversion vitesse en VO2 (échelle logarithmique en X) :

- $VO_2 = -5,026 \log(T) + 95,408$

- $r = -0,9956$

- $R^2 = 99,1 \%$  de la variance

- Erreur moyenne : 0,47 %

- $VO_{2max} = -5,026 \ln(8) + 95,408 = 84,96$   
*ml x kg /min*

- Conversion VO2 en %VO2max

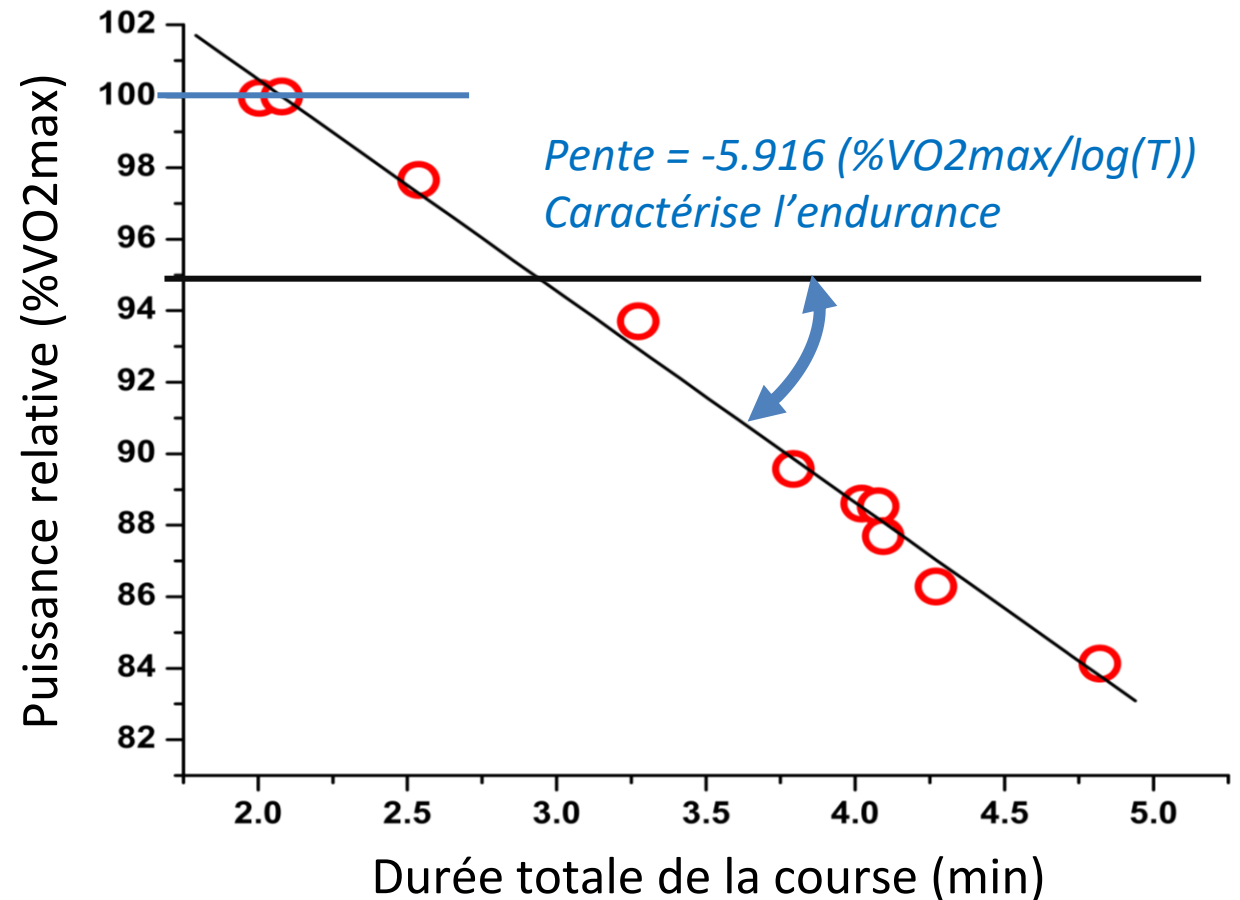
- $\%VO_{2max} = -5,916 \ln(T) + 112,3$

- $R = -0,9956$

# Etendue métabolique aérobie sous maximale :

Endurance : capacité de soutenir longtemps un %VO<sub>2</sub>max élevé

- **Caractère linéaire**
- **Concept de l'endurance** : La machine est capable de fournir une puissance maximale constante à très long terme, mais l'être humain, lui, fatigue



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- ***Applications***
- Conclusion

# Applications

## Application n°1 : Le randonneur

- Un randonneur d'une masse de 75 kg, portant un sac de 6 kg, gravit une montagne d'un dénivelé positif de 855 m en 154 min. Son  $\text{VO}_2$  relatif est mesuré à 1,438 L/min. Pour rappel l'utilisation d'un litre d' $\text{O}_2$  pour oxyder un mélange de substrats correspond à une dépense énergétique de 5 kcal.
- Déterminer la puissance mécanique et chimique développée lors de l'activité. Conclure sur le rendement mécanique du corps humain dans ce contexte.



# Applications

## Application n°2 : La cycliste

- Une cycliste d'une masse de 54 kg roule pendant 86 min pour un dénivelé positif total de 1350 m. Elle porte un sac de 3 kg et son vélo pèse 15 kg. Son  $VO_2$  absolu est mesuré à 2,334 L/min.
- Déterminer la puissance mécanique et chimique développée lors de l'activité. Conclure sur le rendement mécanique du corps humain dans ce contexte.

# Applications

## Application n°1 et 2 : Puissance et énergie mécanique

$$E_{mec} = m_{total} * g * h$$

$$P_{mec} = \frac{E_{mec}}{t} = \frac{m_{total} * g * h}{t}$$

# Applications

## Application n°1 et 2 : Puissance et énergie chimique

$$P_{chm} \left[ \frac{kcal}{min} \right] = V_{O_2} \left[ \frac{L}{min} \right] * E_{q_{enr_{O_2}}} \left[ \frac{kcal}{L} \right]$$

$$P_{chm} [W] = P_{chm} \left[ \frac{kcal}{min} \right] * \frac{1}{60} * C_{p_{eau}} \left[ \frac{J}{kg.K} \right]$$

$$E_{chm} [kcal] = P_{chm} \left[ \frac{kcal}{min} \right] * t [min]$$

# Applications

## Application n°1 et 2 : Rendement

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{chm}}$$

# Applications

## Application n°1 et 2 : Résultats

	<b>Randonnée</b>	<b>Vélo</b>
<i>Hauteur (m)</i>	855	1350
<i>Durée (min)</i>	154	86
<i>Masse (kg)</i>	81	72
<i>VO2 relatif (L/min)</i>	1,438	2,334
<i>Emec (J)</i>	679 392	953 532
<i>Echm (kcal)</i>	1107	1004
<i>Pmec (W)</i>	74	185
<i>Pchm (W)</i>	503	817
<i>Rendement (%)</i>	14,6	22,6

# Applications

## Application n°3 : Le travailleur

- Une personne de 61 kg pompe de l'eau d'un puit de 25 m pendant 210 min. Cette activité requiert 35 % de son  $VO_2$ max qui est de 54 ml/kg.min. Le rendement mécanique brut du système est de 8 %.
- Déterminer le  $VO_2$  absolu ainsi que les puissances et énergies mécanique et chimiques mise en jeu. Conclure sur la quantité d'eau pompé (en L) à la fin de l'activité. Comment l'augmenter ?

# Applications

## Application n°3 :

$$V_{O2} \left[ \frac{L}{min} \right] = V_{O2max} \left[ \frac{mL}{kg \cdot min} \right] * \frac{1}{1000} * masse [kg] * \eta_{V_{O2max}}$$

$$P_{chm} \left[ \frac{kcal}{min} \right] = V_{O2} \left[ \frac{L}{min} \right] * Eq_{enr_{O2}} \left[ \frac{kcal}{L} \right]$$

$$P_{chm} [W] = P_{chm} \left[ \frac{kcal}{min} \right] * \frac{1}{60} * C_{p_{eau}} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

# Applications

## Application n°3 :

$$P_{mec}[W] = P_{chm}[W] * \eta_{mec\ brut}$$

$$E_{mec}[J] = P_{mec}[W] * t[min] * 60$$

$$E_{mec} = m * g * h \rightarrow m[kg] = \frac{E_{mec}}{gh} \sim m[L]$$



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Le métabolisme aérobie repose sur l'oxydation (et donc de la présence d'oxygène) de 3 nutriments : glucoses, acides gras (lipides) et acides aminés (protéines) ;
- Le potentiel redox, la force proton-motrice et le potentiel phosphate sont les trois mécanismes qui permettent la régénération des molécules d'ATP ;
- Des mesures respiratoires des échanges d'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub> permettent à déterminer la puissance développée et l'énergie consommée lors d'une activité ;
- Notre aptitude à performer lors d'une activité dépend de notre VO<sub>2</sub>max, mais également de notre endurance qui tous les deux, sont différent d'un individu à l'autre.



**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

