

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

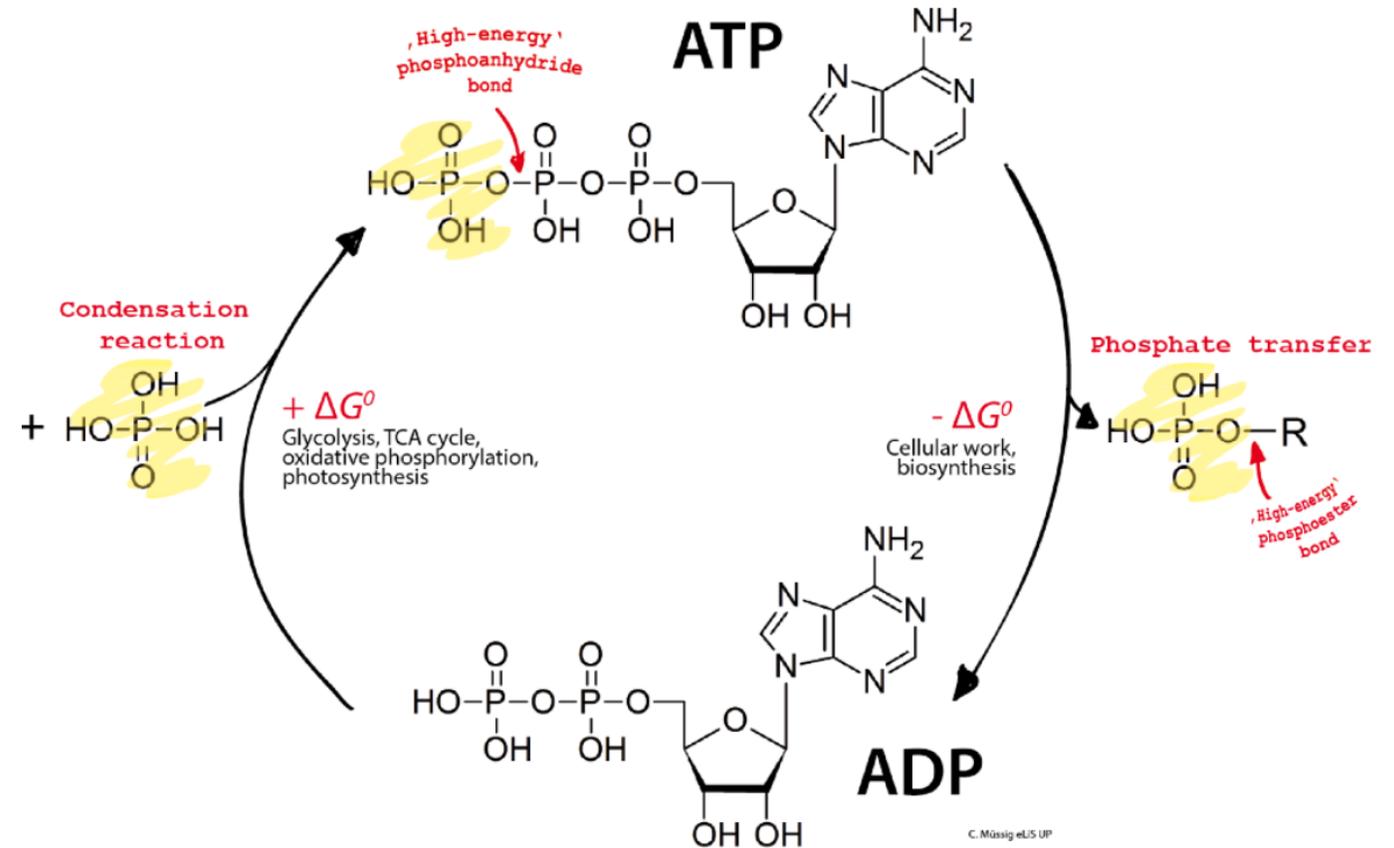
- Introduction et objectifs de la capsule
- Analogie simple
- Fonctionnement du métabolisme aérobie
- Oxydation des nutriments
- Calorimétrie indirecte respiratoire approximative
- Etendue (scope) métabolique aérobie
- Applications
- Conclusion

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

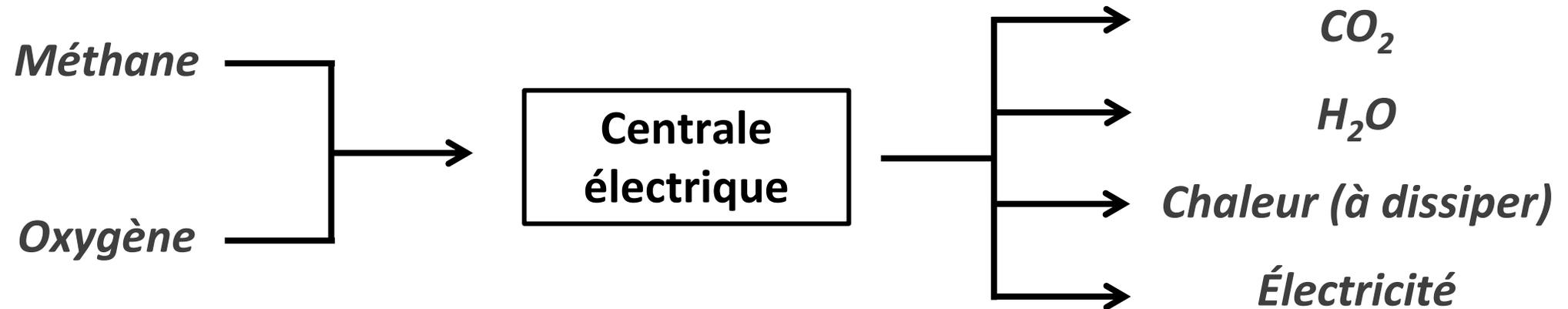
- Deux principaux métabolismes permettent de transformer l'énergie chimique contenue dans les nutriments (**glucides, lipides, protéines**) en énergie utile (**ATP**) : aérobie et anaérobie
- Cette capsule présente le **métabolisme aérobie** avec pour objectifs :
 - Comprendre le fonctionnement du métabolisme 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**

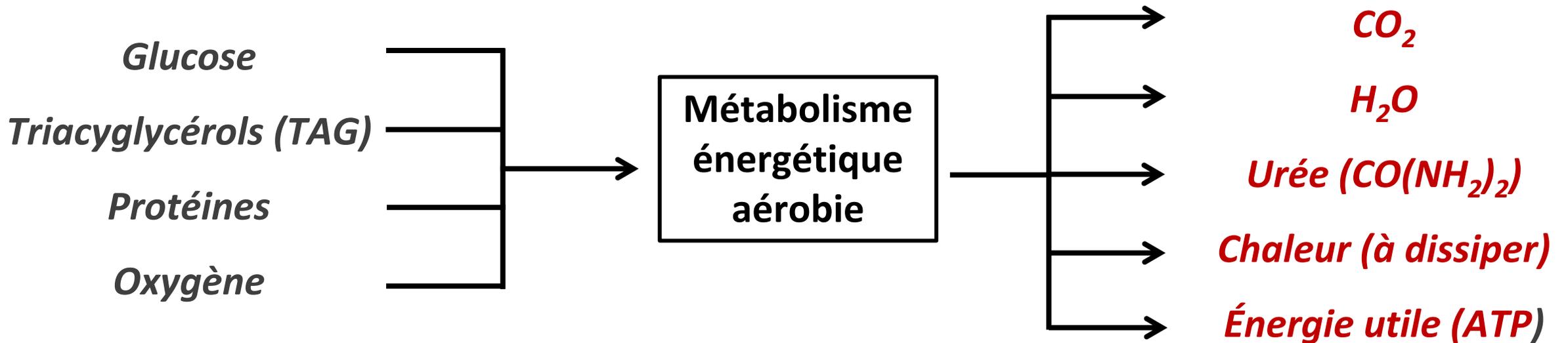


- Réaction de combustion :



Simple analogie

- Fonctionnement du **métabolisme énergétique aérobie**



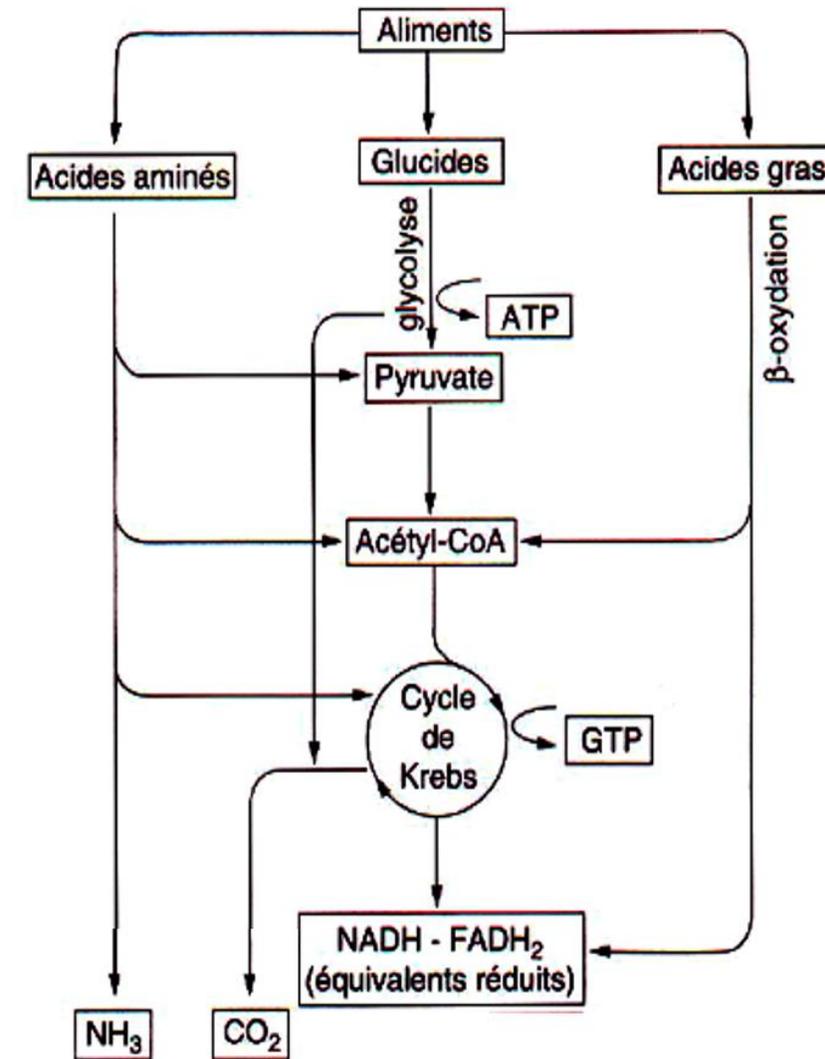
- Le glucose et les TAG sont responsables de la production de **CO₂** et **H₂O**
- L'urée est un déchet azoté obtenu par oxydation des protéines (opérée par le foie)

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

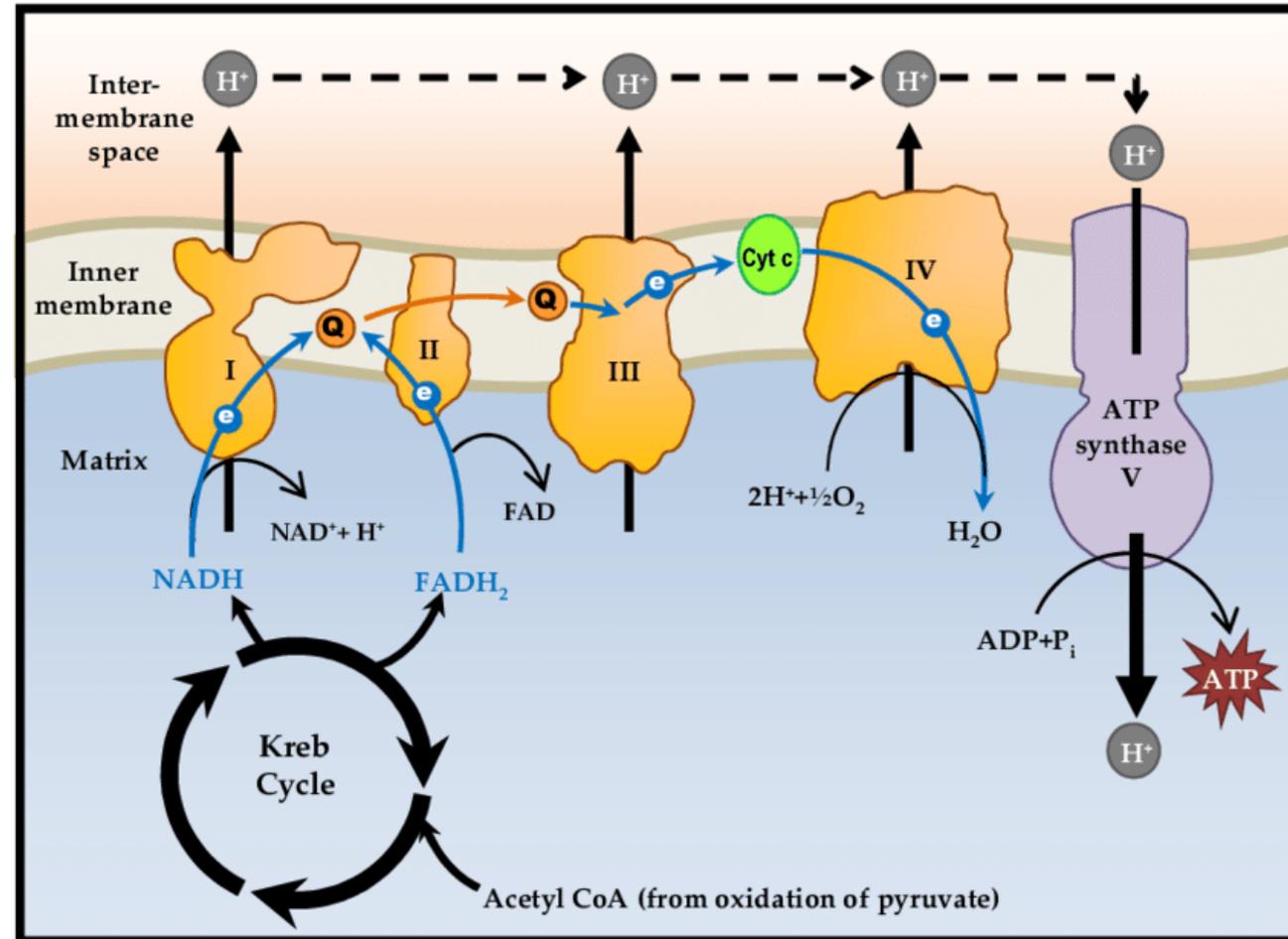
Fonctionnement du métabolisme aérobie

- **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 **CO₂** (sans utilisation d'**O₂**) et du **NADH₂** et du **FADH₂** (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_2 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)

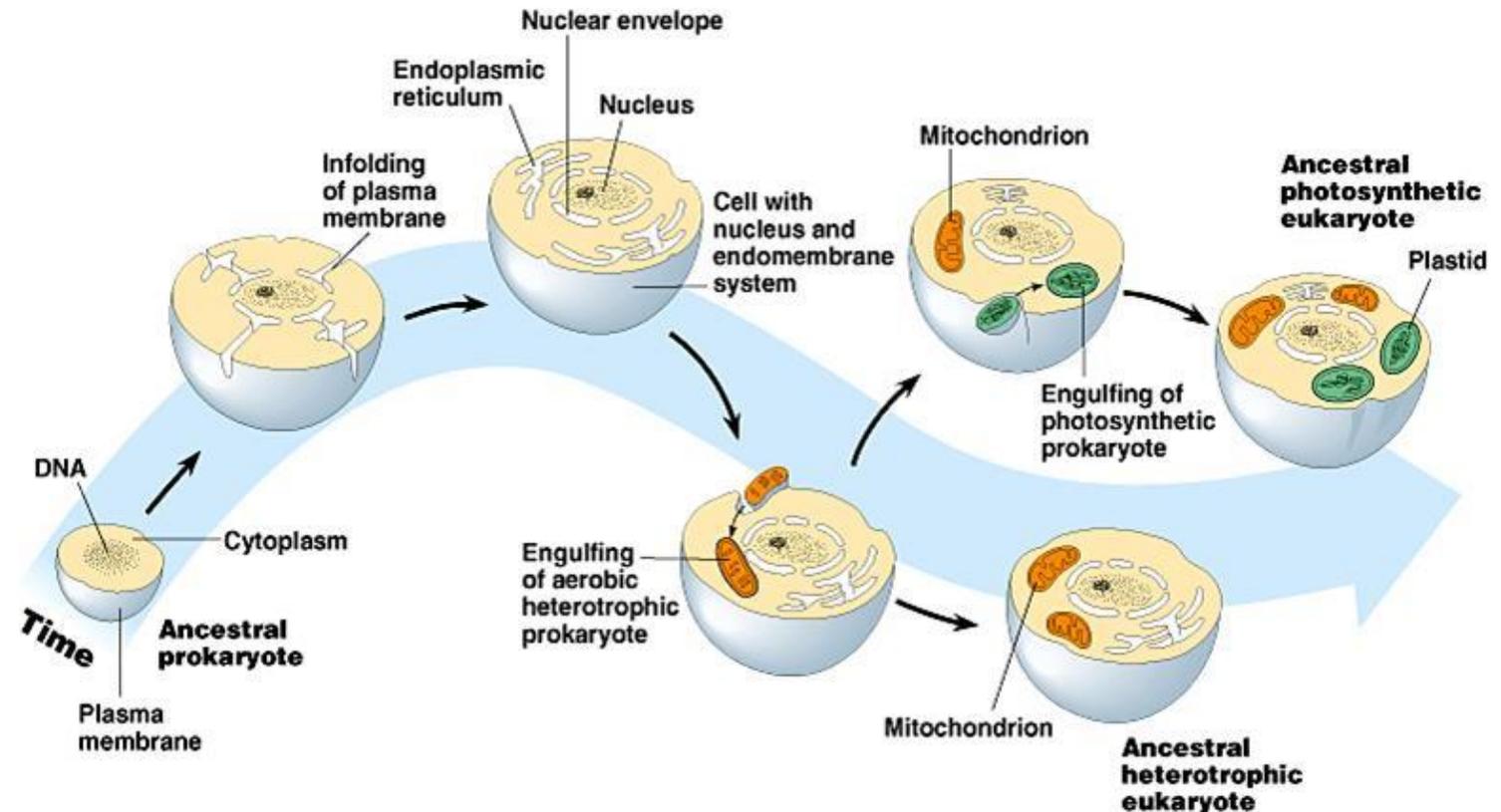


Fonctionnement du métabolisme aérobie : Mitochondrie

- **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



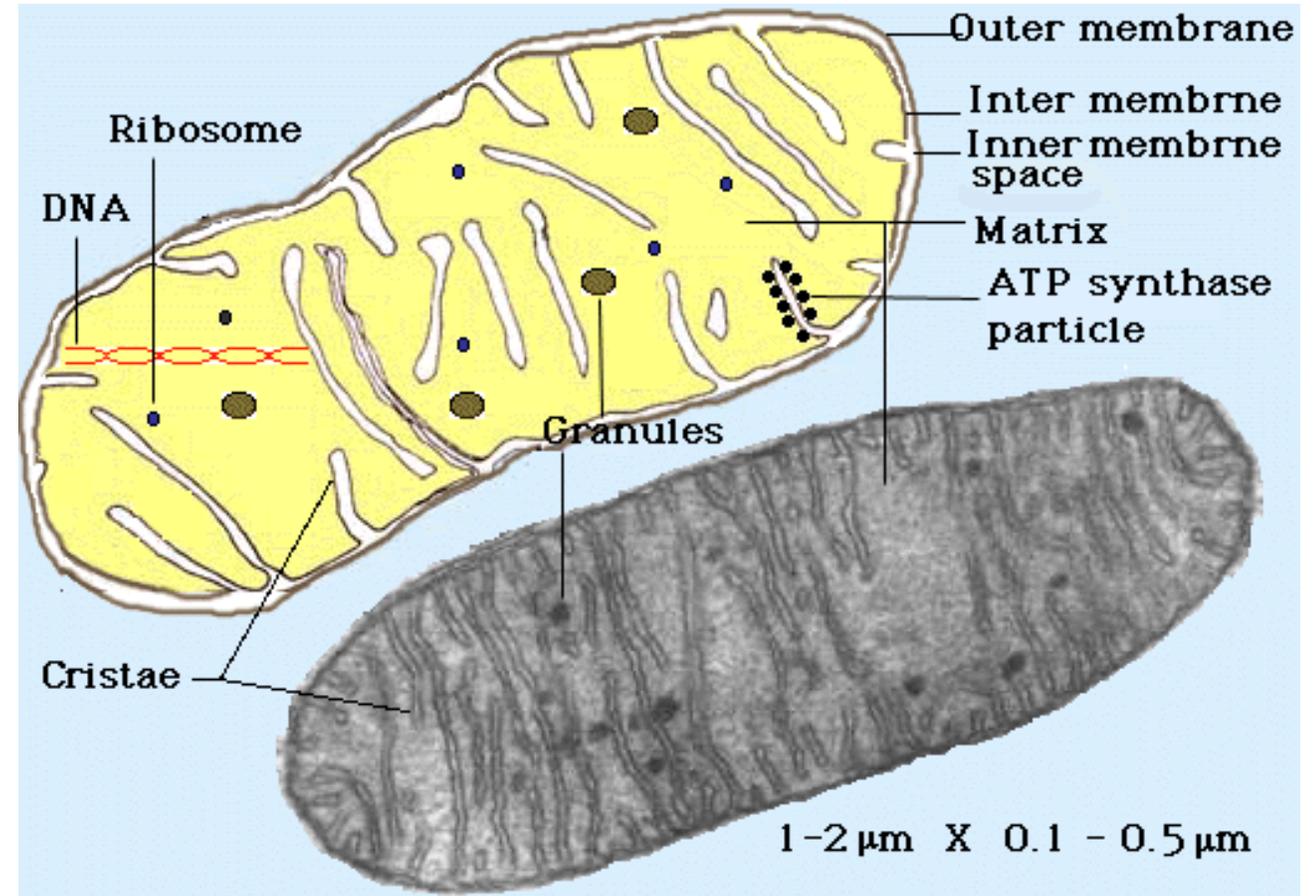
Lynn Margulis



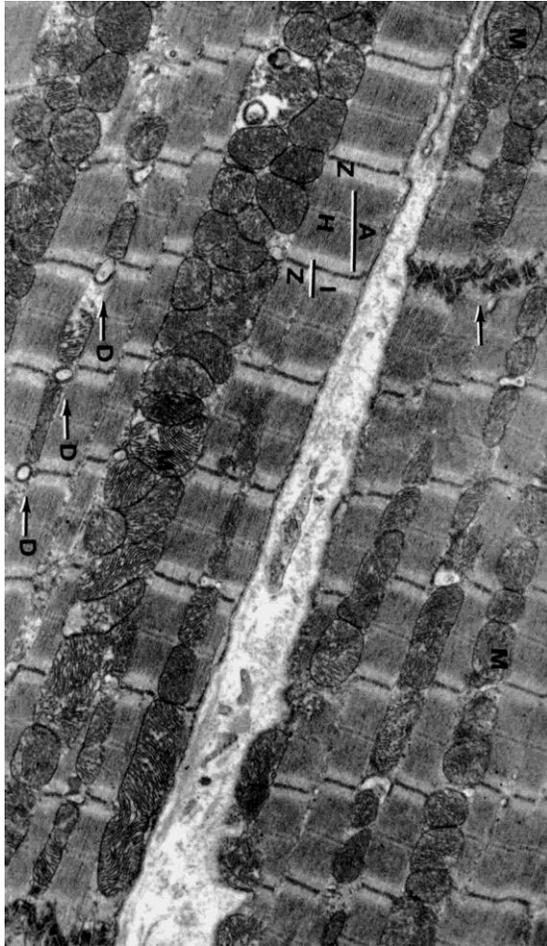
Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Fonctionnement du métabolisme aérobie : Mitochondrie

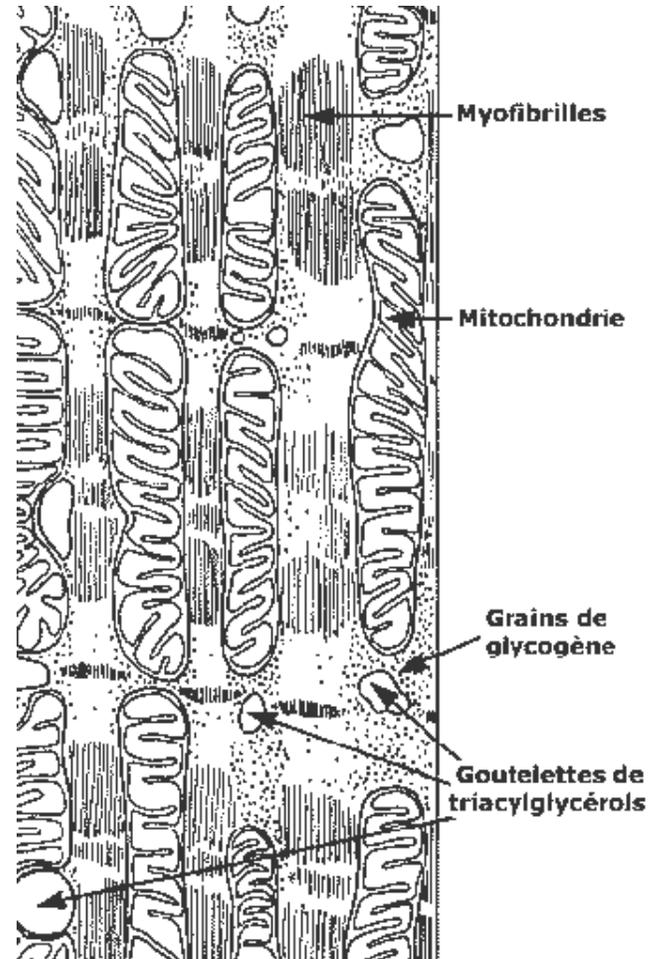
- La production d'ATP et les processus de la chaîne respiratoire, et de l'ATP synthase, ont lieu dans la mitochondrie
- La mitochondrie est un organite (présent à l'intérieur de la cellule) composée d'une membrane externe et d'une membrane interne repliée sur elle-même



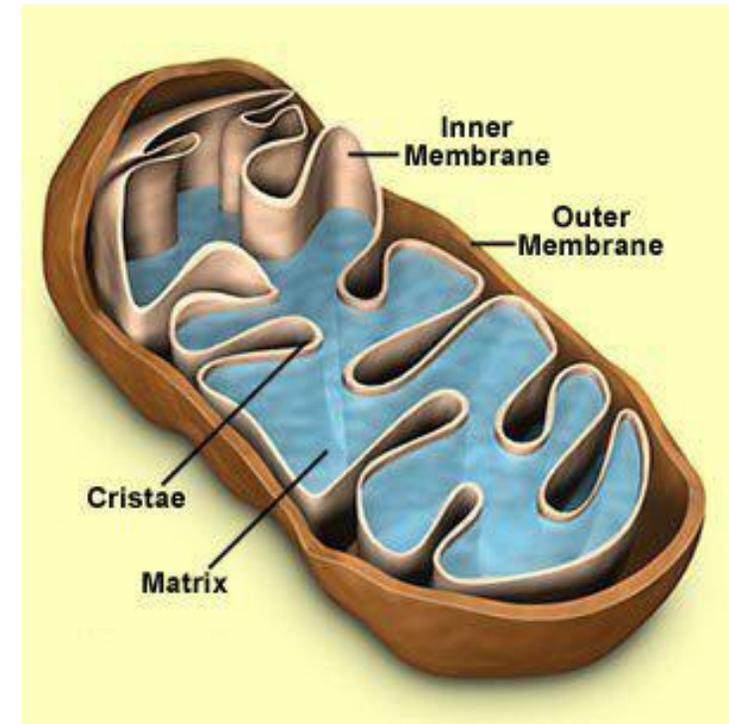
Fonctionnement du métabolisme aérobie : Mitochondrie



Microscopie
électronique



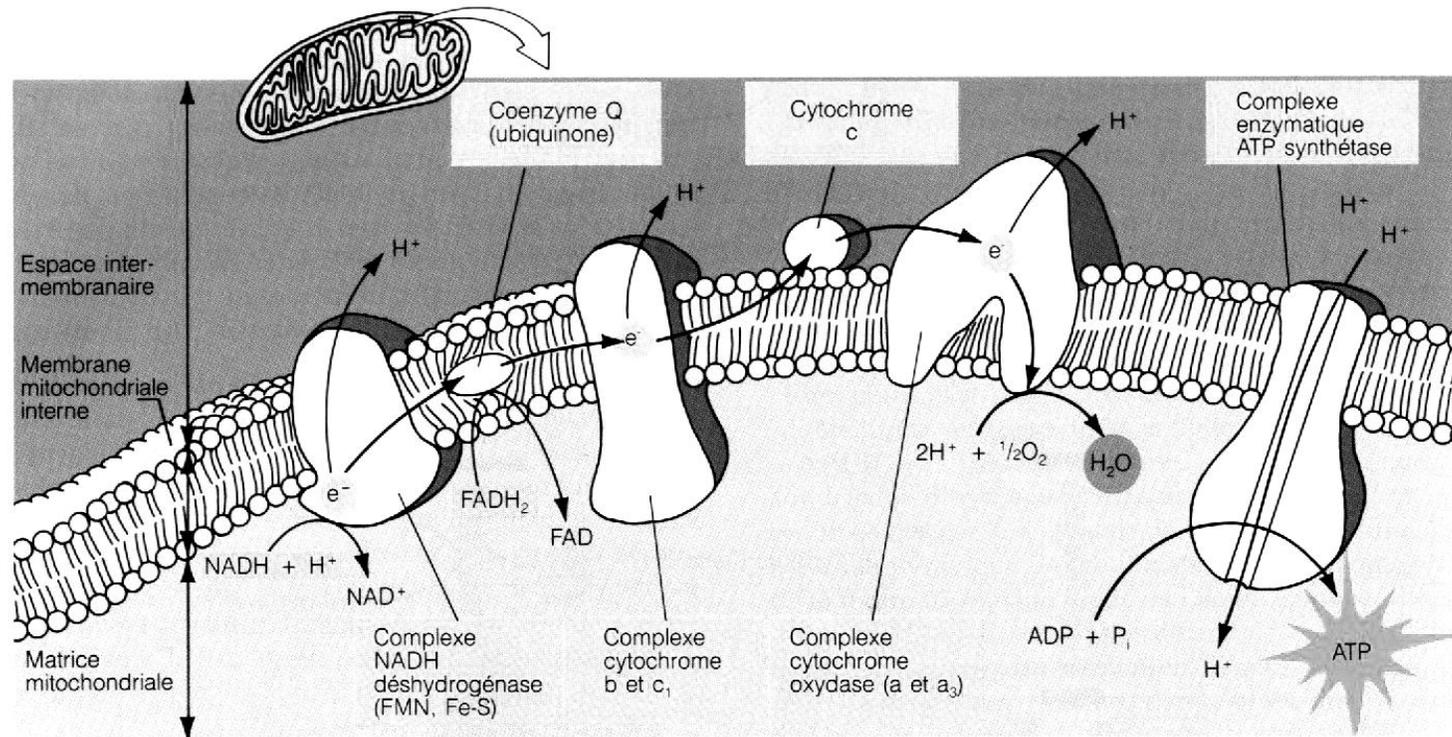
Myofibrilles: protéines responsables de la contraction



Fonctionnement du métabolisme aérobie

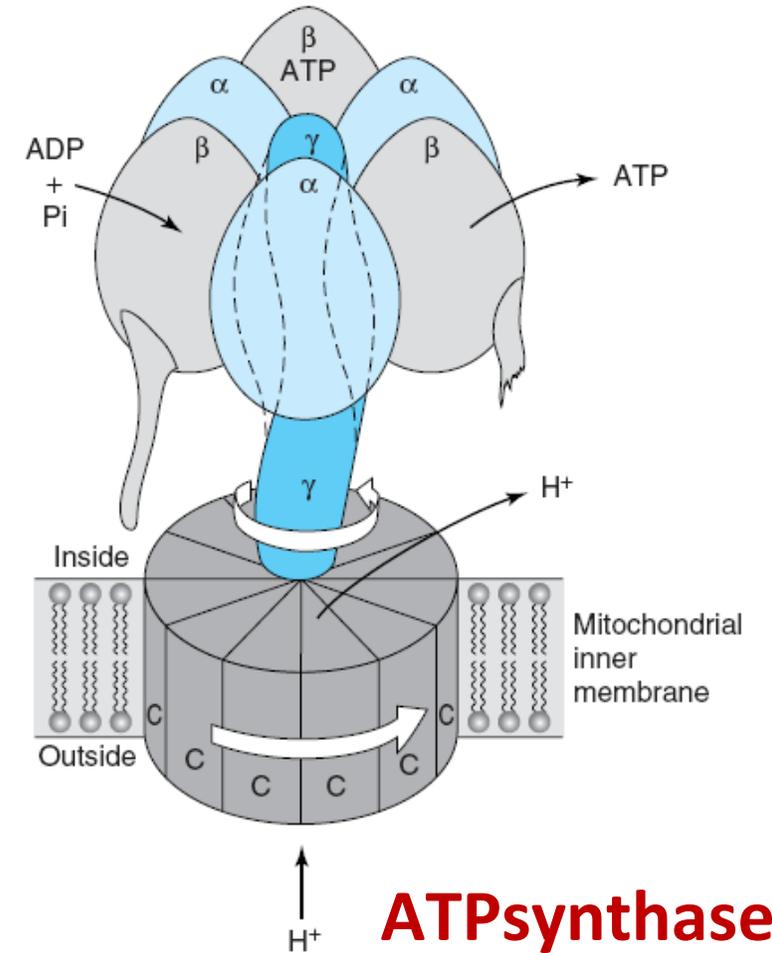
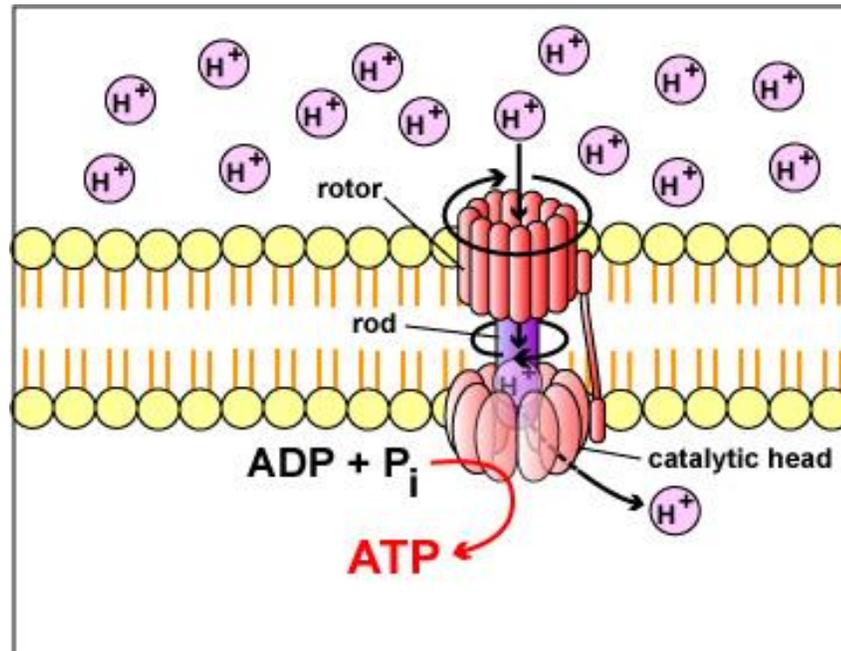
- **Chaîne respiratoire et ATPsynthase** : stœchiométrie variable
 - Fuites (leaking) : force dépendantes
 - Patinage (slipping) : flux dépendant
 - Variation de stœchiométrie de l'ATPsynthase/ase
 - **Rendement variable**

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



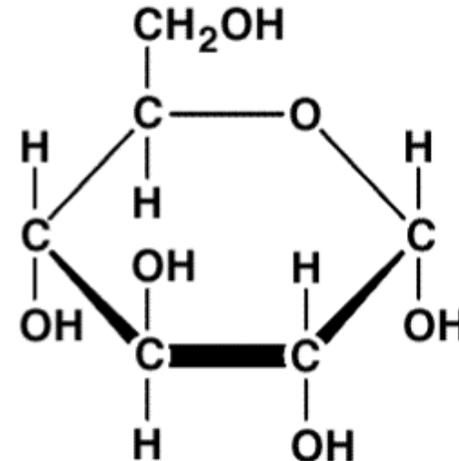
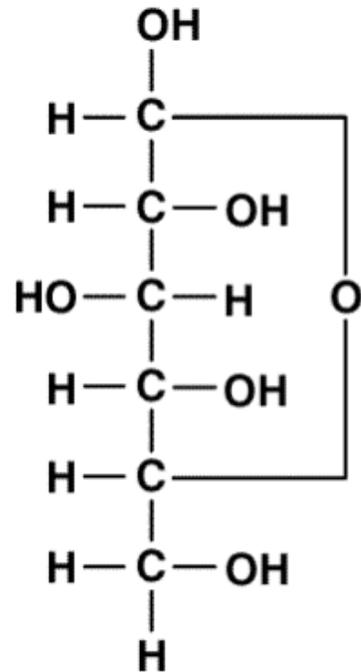
ATP synthase

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_2 (oxydant du glucose)** : $\frac{669,6}{134,4} = 4,98 \text{ kcal / L}$
- **Equivalent énergétique du CO_2 (produit par l'oxydation du glucose)** : $\frac{669,6}{134,4} = 4,98 \text{ kcal / L}$

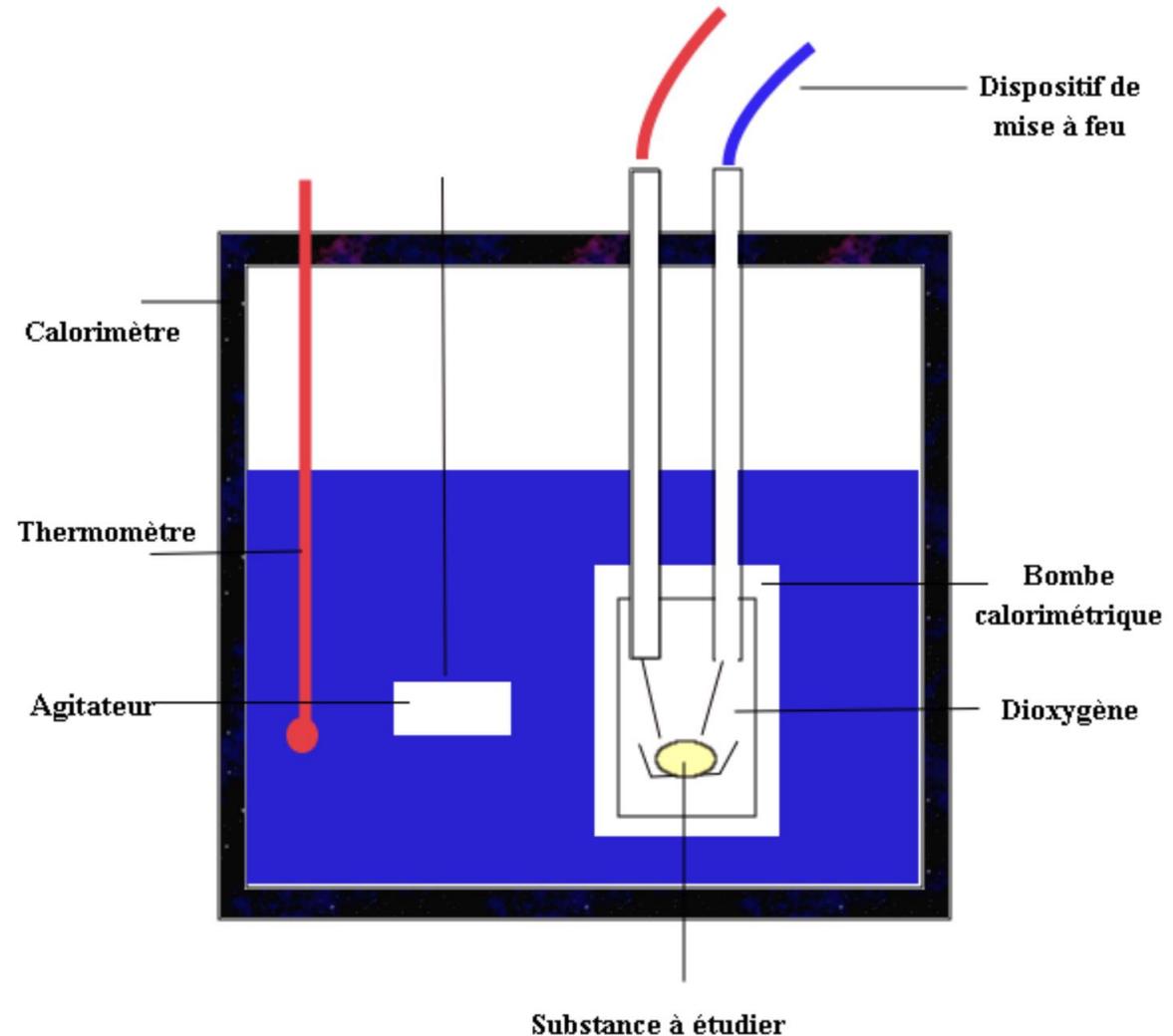
Lien avec 23.1

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 proportionnelle 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'O₂ 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

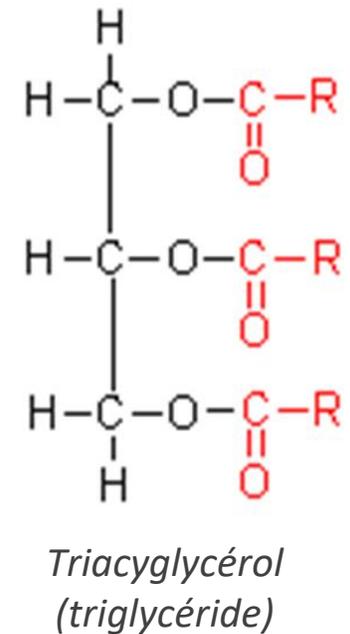
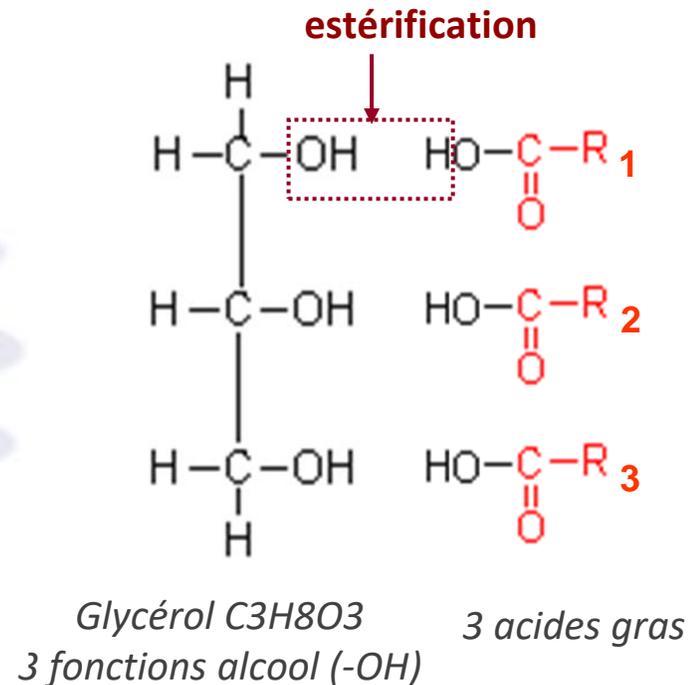
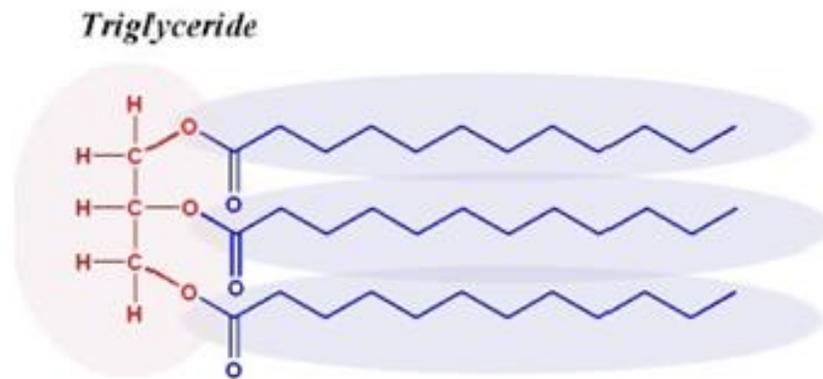
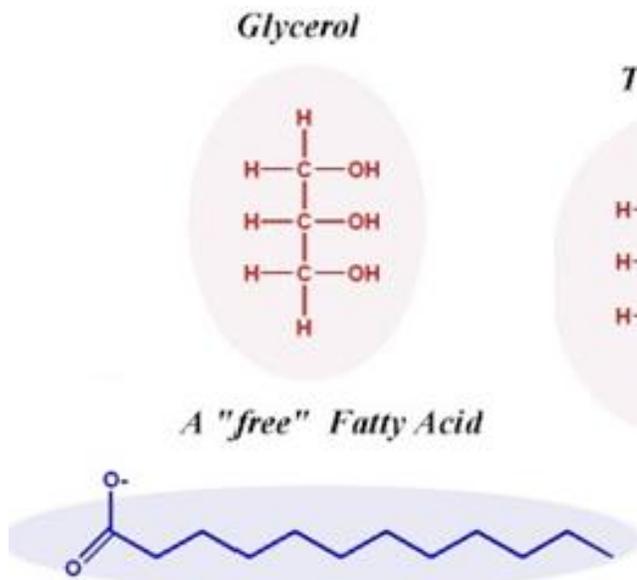


Oxydation des nutriments : Acides gras

- 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

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

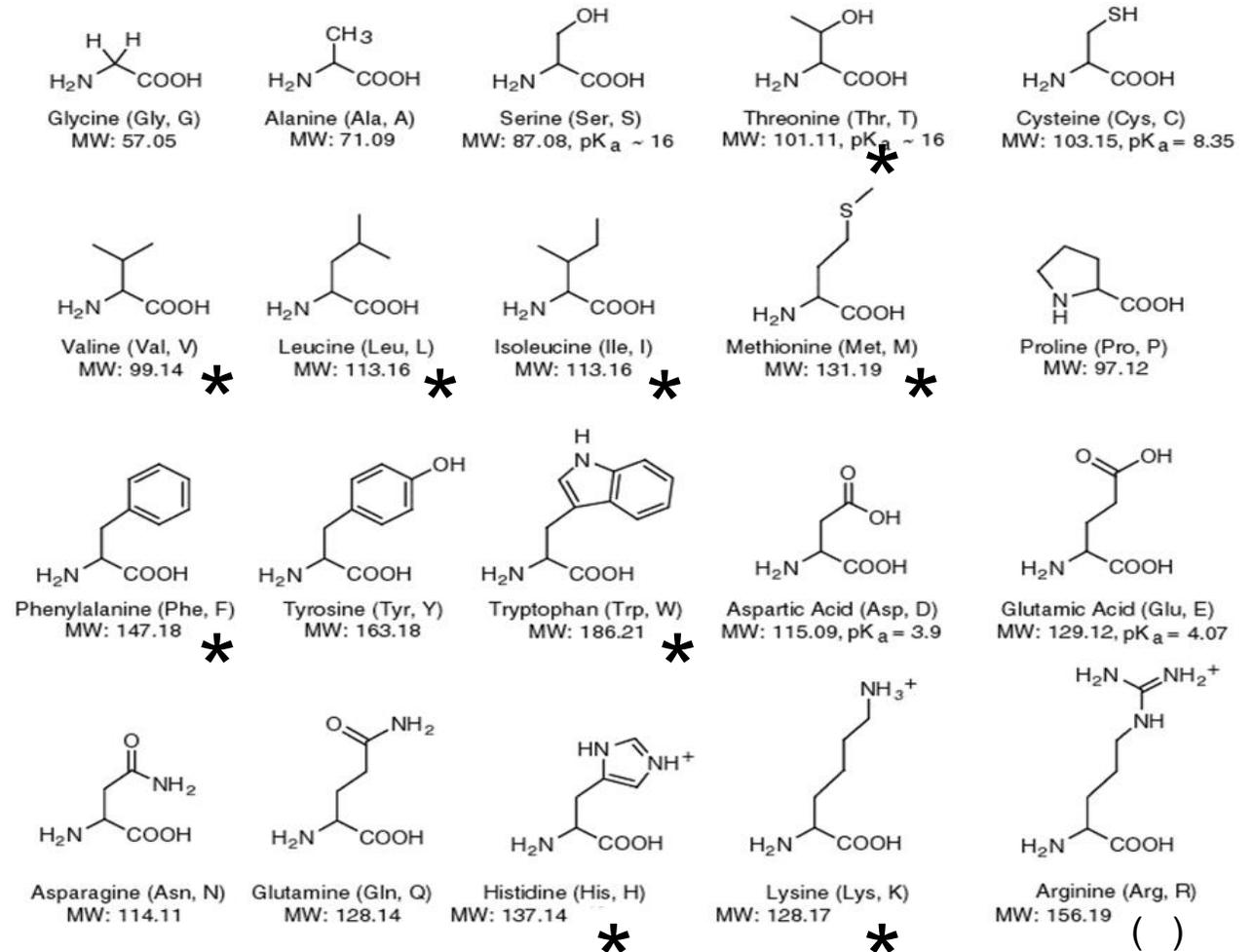
$$VO_2 = 77,5 * 22,4 = 1736 \text{ L/mol} = 2,023 \text{ LO}_2/\text{g}$$

- 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'O₂** (oxydant) : $\frac{4 * 10\ 504}{9340,8} = 4,5 \text{ kcal / L}$

- **Equivalent énergétique du CO₂** (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 ^a (kcal/g)	kcal ^b /L O ₂	RQ ^c (CO ₂ /O ₂)	Atwater Factor ^d (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 ^a	5.6			
Protein through metabolism ^a	4.70	4.66	0.835	4.0
Alcohol ^e	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_2 consommé et de CO_2 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 :*

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

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

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

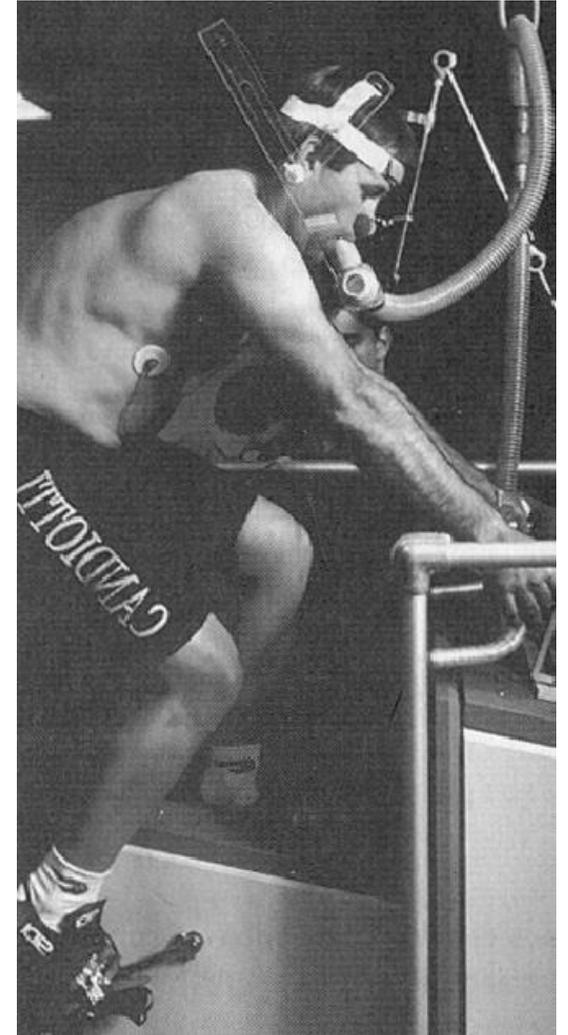
- *En exercice :*

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

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

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

- *Rendement brut :* $225/1011 * 100 = 22,2 \%$
- *Rendement net :* $225/(1011 - 134) * 100 = 25,7 \%$

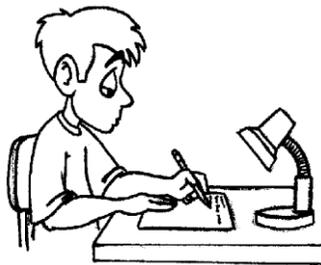


Plan de la présentation

- 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



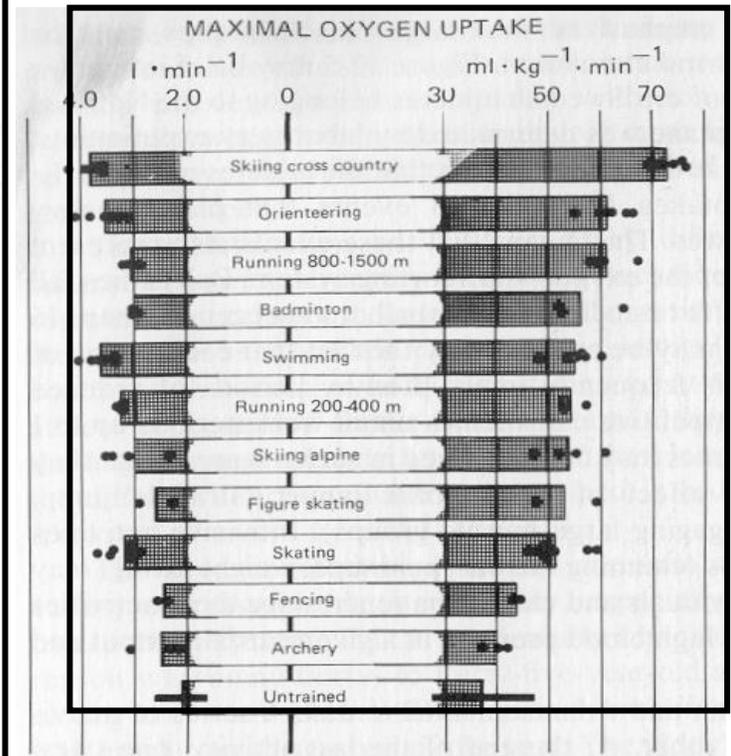
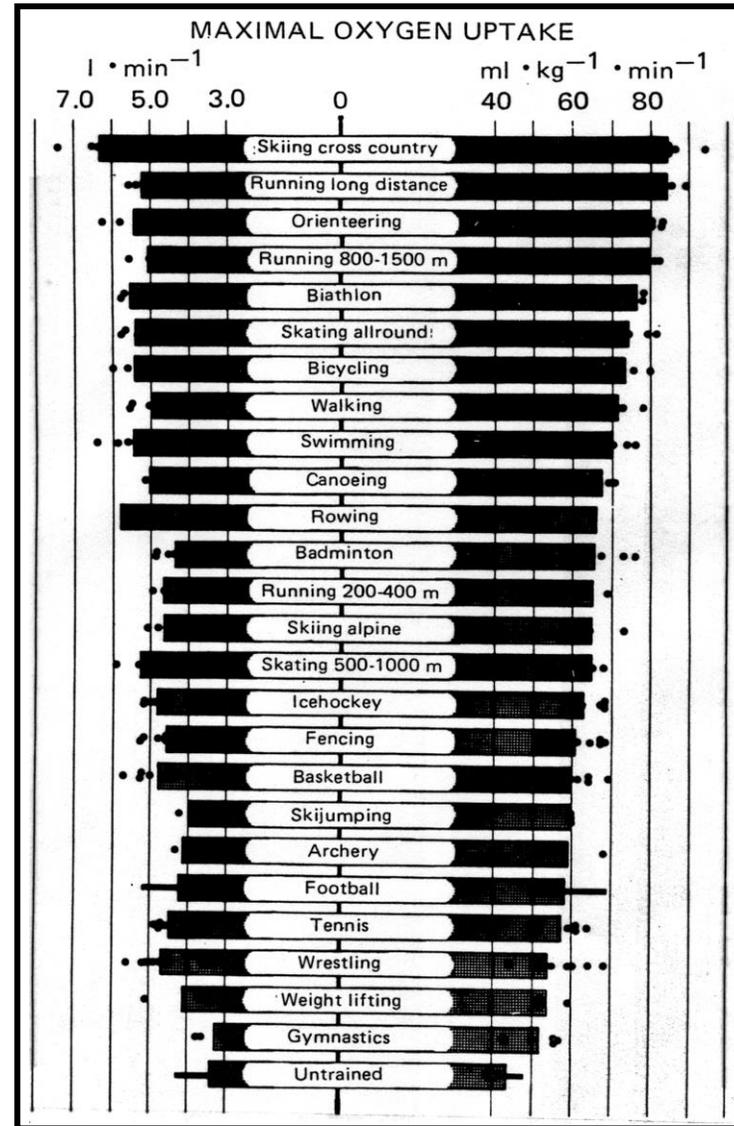
Étendue métabolique aérobie (aerobic metabolic scope)

Etendue métabolique aérobie

- La puissance aérobie est quantifiable selon 3 unités :
 - (watt : Puissance mécanique)
 - $\text{VO}_{2\text{max}}$: Volume maximal d'oxygène qu'un organisme aérobie peut consommer par unité de temps lors d'un exercice dynamique aérobie. Le VO_2 est soit absolu (L/min) soit 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

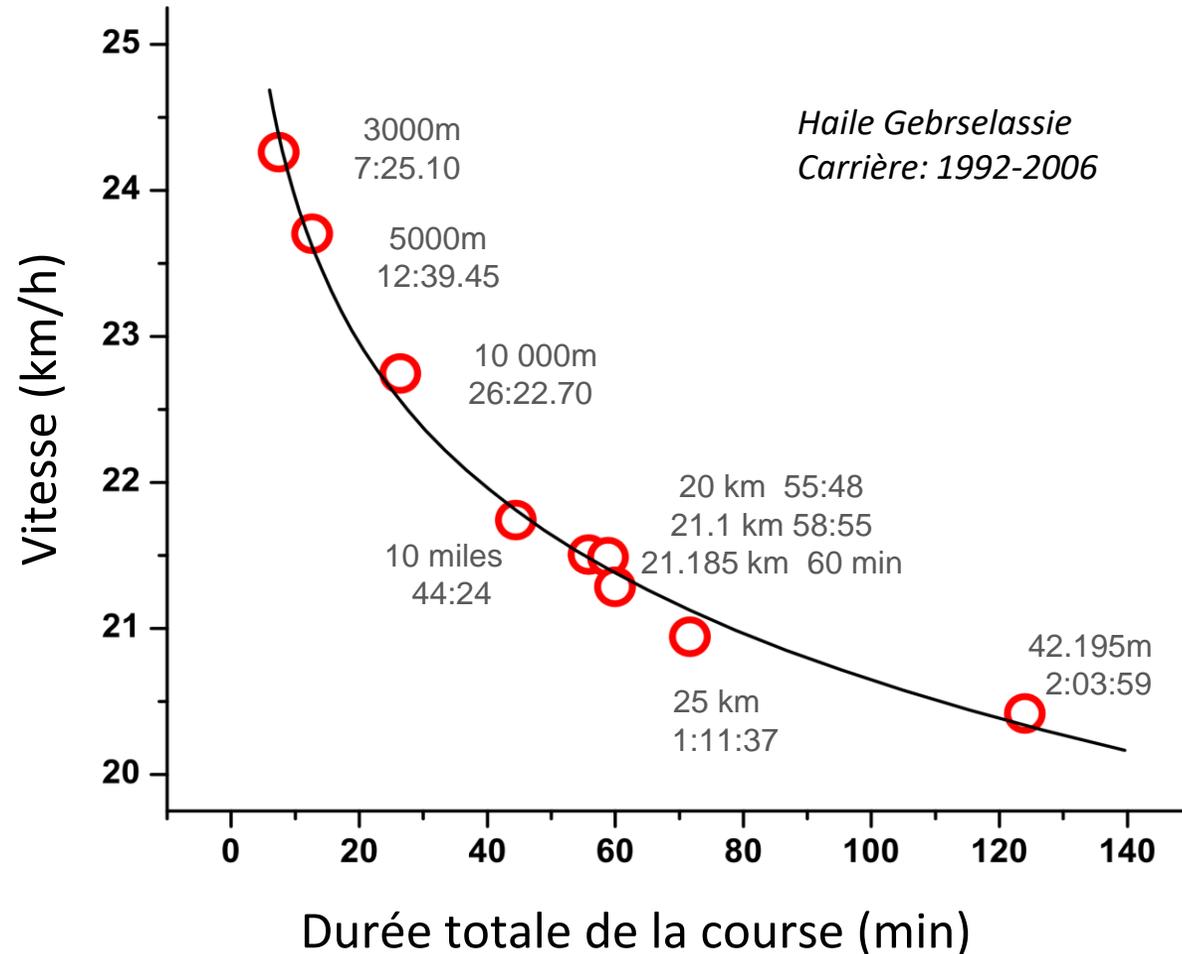
Astrand et al.

Textbook of work physiology
Human Kinetics, 2003, p 314

Hommes

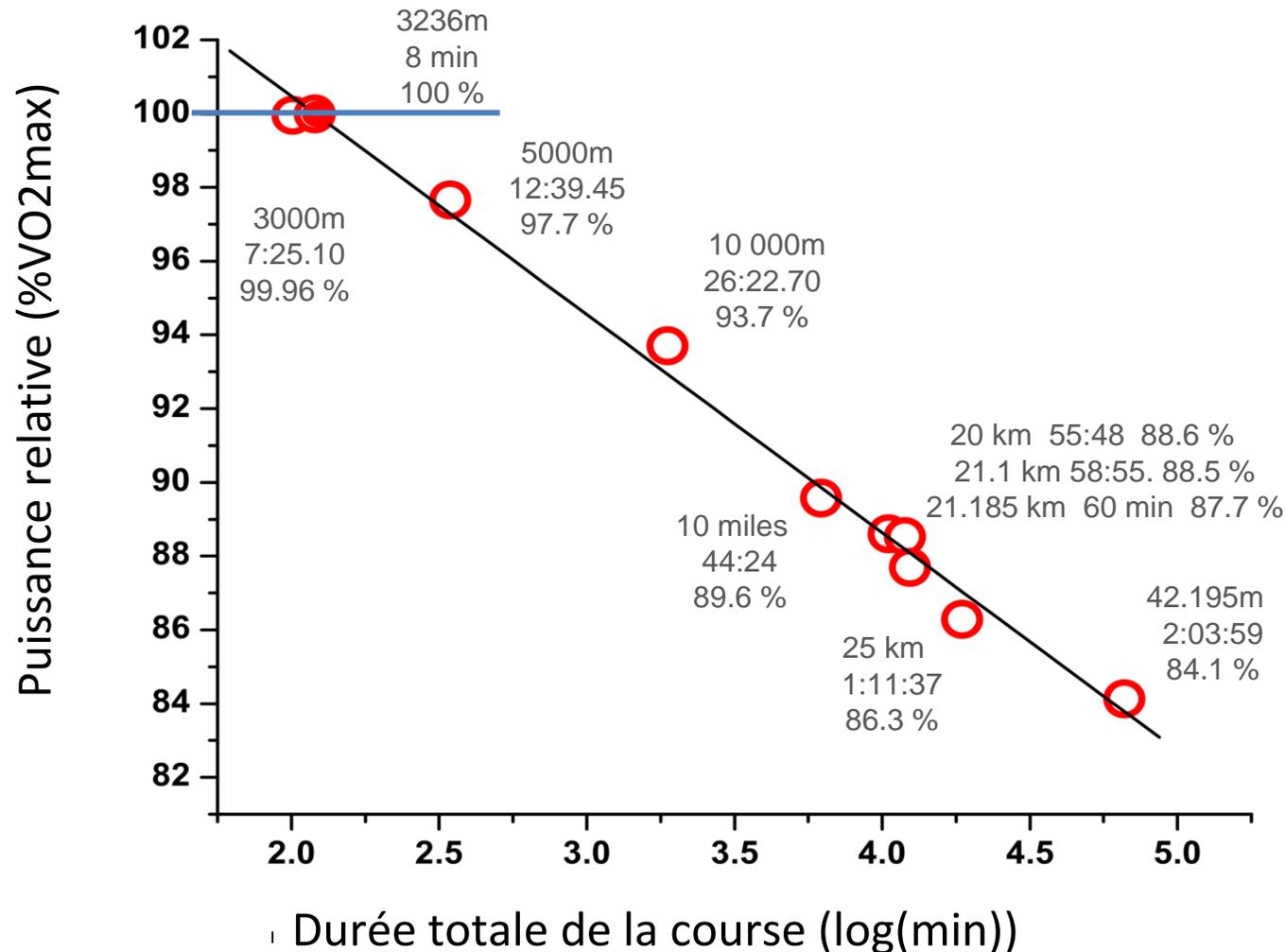
Etendue métabolique aérobie sous maximale :

Endurance : capacité de soutenir longtemps un %VO₂max élevé



Etendue métabolique aérobie sous maximale :

Endurance: capacité de soutenir longtemps un %VO_{2max} élevé

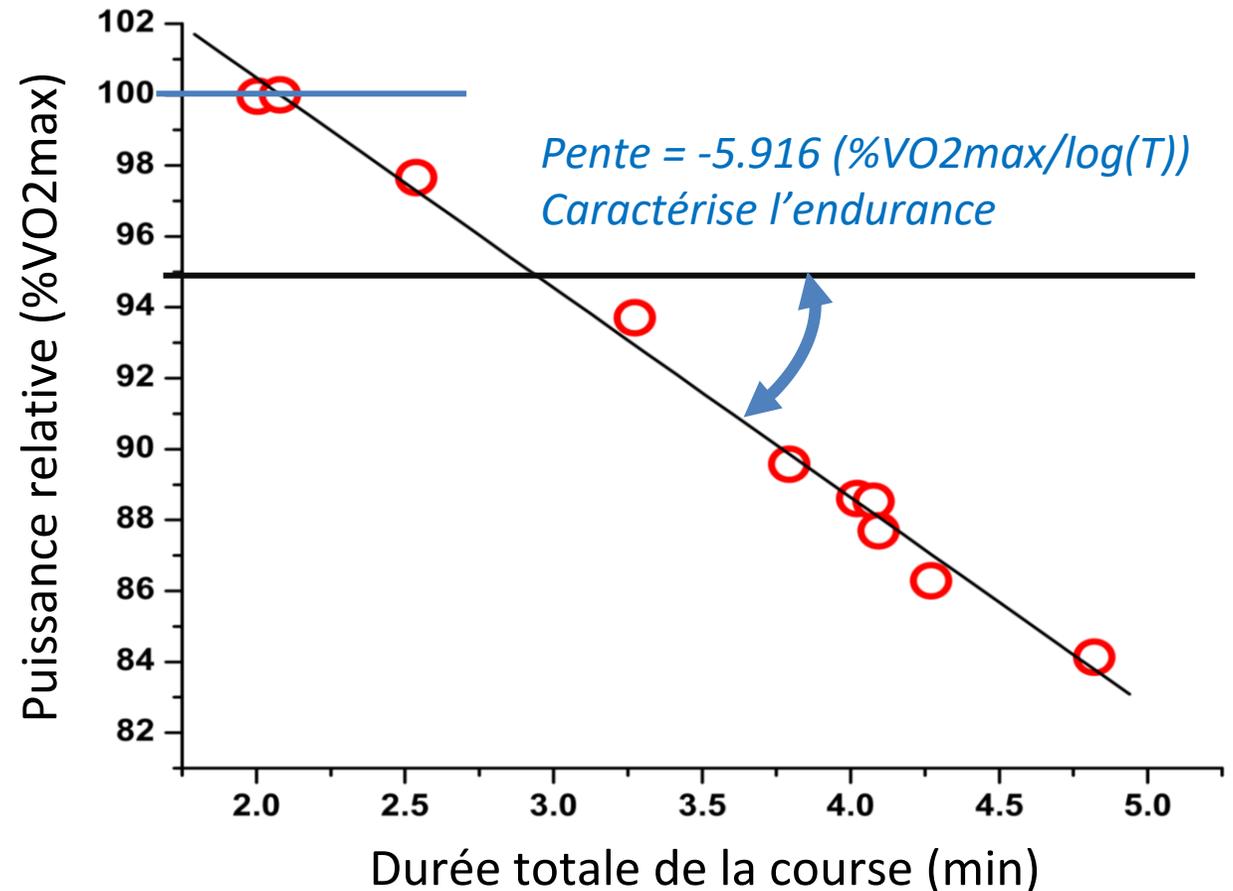


- Conversion vitesse en VO₂ (échelle logarithmique en X) :
 - $VO_2 = -5,026 \log(T) + 95,408$
 - $r = -0,9956$
 - $R^2 = 99,1 \%$ de la variance
 - Erreur moyenne : 0,47 %
 - $VO_{2max} = -5,026 \ln(8) + 95,408 = 84,96$ ml x kg /min
- Conversion VO₂ en %VO_{2max}
 - $\%VO_{2max} = -5,916 \ln(T) + 112,3$
 - $R = -0,9956$

Etendue métabolique aérobie sous maximale :

Endurance : capacité de soutenir longtemps un $\%VO_{2max}$ 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 VO_2 relatif est mesuré à 1,438 L/min. Pour rappel l'utilisation d'un litre d' 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

	Randonnée	Vélo
<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'O₂ et de CO₂ 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_{2max}, 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

