

ASPECTS PHYSIOLOGIQUES DU METABOLISME ENERGETIQUE

Coucou on va s'attaquer à un cours un peu long mais pas très compliqué. Si le prof fait des rajouts je vous mettrai la fiche à jour avec les rajouts encadrés en rouge pour que vous ne puissiez pas les louper. Tous mes petits commentaires et explications bonus sont en italique et de cette couleur. Maintenant que je vous ai tous dit c'est partie !!

PARTIE 1 – Métabolisme de base

Dans ce cours on va étudier le métabolisme de base. On va commencer par donner des définitions, ensuite des méthodes de mesure, puis nous verrons comment le métabolisme de base varie et quels sont ses liens avec la surface corporelle et les conséquences en physiologie.

I/ Définitions

Métabolisme de base : production de chaleur par l'organisme dans une situation de repos complet en position couchée, à distance d'un repas, en situation de neutralité thermique (quand il ne fait ni chaud ni froid).

C'est la **production de chaleur inéluctable** de l'organisme dans cette situation. L'organisme produit de la chaleur car tout travail de l'organisme a un rendement inférieur à 1 : le ratio entre l'énergie libre transformée en travail et l'énergie libre consommée est inférieur à 1.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Energie libre transformée en travail}}{\text{Energie libre consommée}} < 1$$

Exemples :

- La phosphorylation oxydative (qui produit de l'ATP à partir des nutriments) a un **rendement de 40%**. Donc 60% de l'énergie libre des liaisons covalentes des nutriments est dissipée sous forme de chaleur. (Anecdote du prof : le moteur diesel a un rendement équivalent à celui de la phosphorylation oxydative, ce qui est une performance technique).

- La contraction musculaire (qui utilise de l'ATP pour faire des mouvements ou des contractions isométriques) a un **rendement de l'ordre de 25%**. Ainsi l'énergie dissipée sous forme de chaleur est de l'ordre de 75%

Energie libre : énergie des liaisons covalentes utilisables par les êtres vivants dans le métabolisme énergétique.

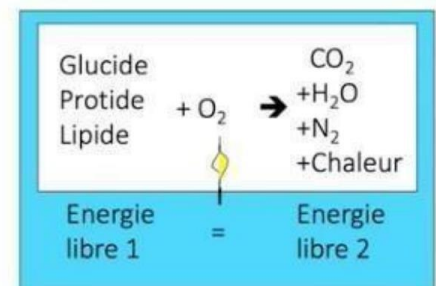
Bioénergétique : description du transfert et de l'utilisation de l'énergie libre par les organismes vivants (cf. biochimie).

II/ Méthodes de mesure

1) Mesure de l'énergie libre des nutriments par combustion

On considère que **l'organisme « brûle » des calories** (c'est ce qu'on dit aujourd'hui vulgairement). On a cette image car, selon le **principe de conservation de l'énergie**, lorsqu'on brûle physiquement parlant des glucides, protides et des lipides dans une **bombe calorimétrique de Berthelot** en présence d'oxygène et d'une flamme pour déclencher la combustion, on aboutit aux produits terminaux de la réaction (du gaz carbonique avec un peu d'eau et d'azote) avec une certaine quantité de chaleur.

Bombe calorimétrique de Berthelot



Donc **l'énergie initiale** du système contenue dans les liaisons covalentes des nutriments **se retrouve à l'état final**.

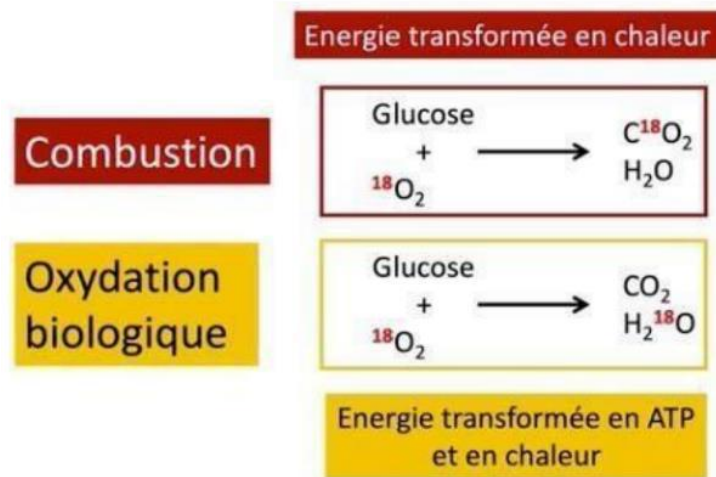
2) Combustion et oxydation

Etant donné que l'organisme produit de l'eau et du gaz carbonique lorsqu'on respire, on peut faire l'analogie avec la bombe calorimétrique de Berthelot. Simplement, il y a une différence fondamentale entre **combustion** et **oxydation**. Pour voir cela, on utilise **l'isotope 18 de l'O₂** traçable par un spectrographe de masse :

- Pour la **combustion**, **l'O₂ apparait dans le CO₂**

- Alors que dans un organisme vivant : **oxydation** biologique, l'atome lourd **d'O¹⁸** atterri dans la **molécule d'H₂O**.

Regarder bien le schéma suivant vous allez comprendre : on peut voir que l'O¹⁸ marqué par l'isotope 18 se retrouve dans le CO₂ pour la combustion et pour oxydation biologique on le retrouve dans l'H₂O...



Il y a des analogies entre combustion et oxydation. On peut donc parler d'un organisme qui brûle des calories à condition de ne pas faire de confusion entre les mécanismes corporels et extracorporels.

3) Energie libre des nutriments dans l'organisme

→ On peut considérer que l'énergie libre des nutriments dans l'organisme est pratiquement égale à l'énergie des nutriments dans la bombe calorimétrique.

On a donc pour l'oxydation dans l'organisme :

- **1 gramme de glucide = 4 kcal versus 4,1** (avec la bombe)
- **1 gramme de lipide = 9 kcal versus 9,3** (avec la bombe)
- **1 gramme de protide = 4 kcal versus 5,6** (avec la bombe)

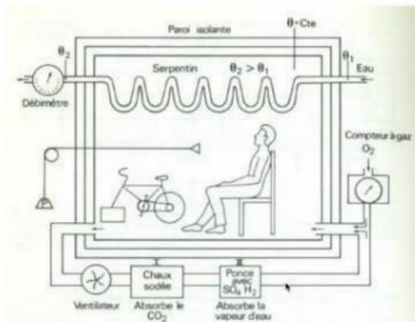
Il faut connaître ces valeurs ++

Attention aux QCM calcul qui arrive bientôt !

En revanche on a une grande différence pour les **protides** car le catabolisme des protides s'arrête à l'urée. On ne peut pas éliminer de l'azote sous forme stable, on fabrique donc de l'urée qui contient encore des liaisons covalentes entre les atomes C, O et N et qui ne sont **pas utilisables** pour fabriquer de l'énergie libre. L'utilisation énergétique d'un gramme de protide est donc inférieure à celle de la bombe calorimétrique (*le*

catabolisme ne va pas se faire jusqu'à la fin, on ne peut pas exploiter toute l'énergie libre des protéines). Pour les protéines, comme le catabolisme s'arrête à l'urée, on aura énergie libre = 1,5 kcal/g.

4) Mesure de la production de chaleur : calorimétrie directe



Dispositif permettant de mesurer l'émission de chaleur dans différentes situations : repos, travail mécanique, jeûne, phase post-prandiale...

Historiquement, pour mesurer la production de chaleur, on utilise un dispositif complexe avec un individu au repos dans un environnement **thermo régulé** (encore utilisé dans certains laboratoires aujourd'hui).

→ On va mesurer la **différence de température avec un circuit d'eau** (serpentin sur le schéma).

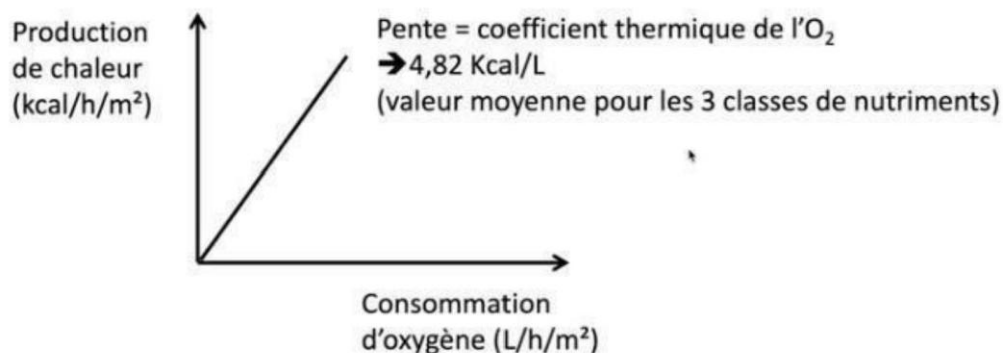
→ L'eau entre avec une certaine température et ressort avec une autre.

Le delta de température (différence de température) correspond à la **production de chaleur captée par l'eau**. Le sujet peut effectuer différents exercices (traction, pédalage...). On mesure la **consommation d'O₂** et le **relargage de CO₂** en trappant l'air expiré par de la chaux sodée qui absorbe le CO₂. Ce dispositif **mesure l'émission de chaleur** dans différentes situations : il est à la base de la **calorimétrie directe**.

5) Coefficient thermique de l'oxygène (autre manière de mesurer le métabolisme de base)

En se basant sur la **consommation d'oxygène**, on peut mesurer le métabolisme de base car on utilise l'O₂ pour oxyder nos nutriments. Si on met la **consommation d'O₂** en rapport avec la **production de chaleur**, la **relation est linéaire**

La pente de cette relation est le **coefficient thermique de l'oxygène**. Il est de **4,82 kcal/L** d'oxygène consommé en moyenne pour une alimentation équilibrée chez l'homme.



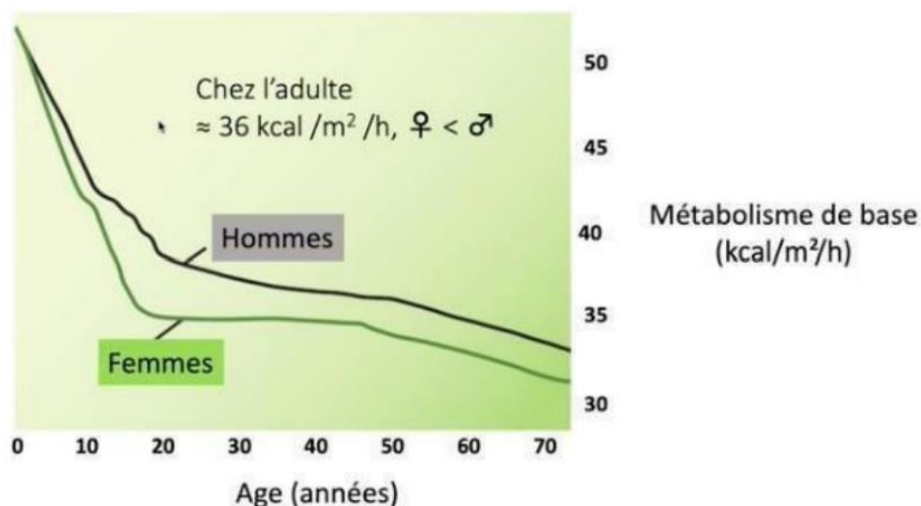
III/ Variation du métabolisme de base

1) Origine de la production de chaleur par l'organisme

- **Métabolisme de base** : production de chaleur minimale en position couchée, à distance des repas et en situation de neutralité thermique. Il peut être multiplié par 4 quand on est exposé au froid.
- **Activité dynamique spécifique des aliments** : production de chaleur secondaire à la synthèse des molécules de stockage de l'énergie libre des aliments (triglycérides, glycogènes). Cf bioch
- **Activité mécanique** : production de chaleur secondaire au travail mécanique des muscles striés squelettiques. On peut multiplier par 20 la production de chaleur lors d'un exercice musculaire soutenu.

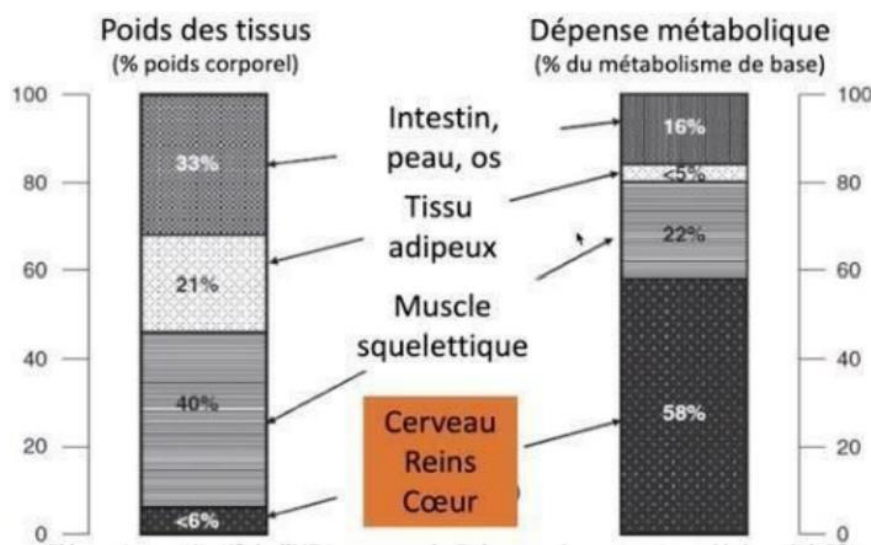
2) Variation du métabolisme de base au cours de l'existence

On représente le métabolisme (valeur à l'axe vertical) par rapport à l'âge (axe horizontal). Chez les femmes comme chez les hommes le métabolisme de base est **très élevé chez l'enfant**, cette valeur élevée **décroche au moment de l'adolescence**, puis a une décroissance très faible lorsqu'on vieillit. En moyenne, la production de chaleur du métabolisme de base par rapport à la surface corporelle et à l'heure est de **36 kcal/m² /h**.



3) Participation des différents organes au métabolisme de base

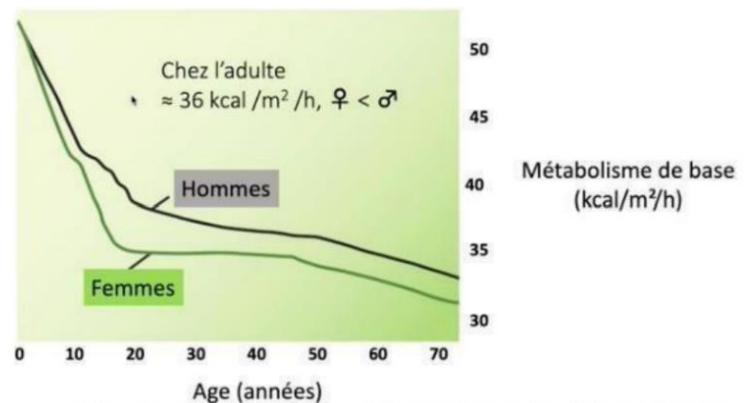
Le muscle squelettique, le tissu adipeux, la peau, les os et l'intestin forment l'essentiel de la masse du corps mais **les tissus métaboliquement actifs sont ceux qui pèsent peu par rapport au corps : le cerveau, les reins et le cœur**. Le tissu adipeux a une très faible dépense métabolique mais il est dans une proportion importante du poids de l'individu. De même pour le muscle squelettique. *(En gros pas de corrélation entre l'activité métabolique et la proportion de l'organe).*



Masse principale du corps :	Tissus métaboliquement les plus actifs :
Muscle squelettique	Cerveau
Tissu adipeux	Reins
Peau	Cœur
Os	
Intestin	

4) Métabolisme de base : différence entre homme et femme

La différence de métabolisme de base entre les hommes et les femmes provient de la **différence de composition corporelle** : à âge et poids égal, **la femme a plus de tissus adipeux que l'homme**. On dit l'homme obèse est moins aqueux.



On voit sur le schéma que le décrochage apparaît au moment de la puberté où les femmes et les hommes acquièrent leurs caractères secondaires avec la répartition de tissus adipeux de manière plus abondante chez la femme que chez l'homme.

IV/ Lien avec la surface corporelle

1) Surface corporelle : paramètre le plus proche du métabolisme de base

La surface corporelle est très bien corrélée au métabolisme de base, elle peut servir pour comparer des grandeurs physiologiques entre des individus de corpulence différente.

Par exemple :

Si on s'interroge sur la fonction rénale d'Averell par rapport à celle de Joe, on a intérêt à considérer qu'ils ont une taille différente d'un facteur 3, mais la **taille ou le poids ne sont pas suffisants**.

Quel paramètre anthropométrique permettrait de comparer le métabolisme de base de 2 individus de corpulence différente ?



→ Le poids
 Cheval = 17 kcal/kg/j
 Souris = 158 kcal/kg/j
 Facteur 9 !

→ La surface corporelle
 Moins de différence inter-espèce;
 Différence intra-espèce acceptable.

Lien logique : émission de chaleur par unité de surface.

Si quand on compare le métabolisme de base d'animaux de poids extrêmement différents (comme le cheval et la souris) et qu'on le rapporte au poids on a un facteur 9 de différence.

Quand on le met en rapport avec la **surface corporelle**, il y a beaucoup moins de différences intra-espèce et inter-espèces. C'est logique puisque **la chaleur est radiative et qu'elle dépend de la surface corporelle qui l'émet**.

Explication de ma vieille Manon :

° Si on prend en compte seulement le poids, on aura forcément une grande différence. La souris produira moins de chaleur, car elle est bien plus petite.

° Cependant, si on prend en compte la surface corporelle, on aura une production de chaleur en m^2 donc une sorte de proportionnalité. Il y aura moins de différence entre le cheval et la souris.

2) Généralisation : utilisation de la surface corporelle pour comparer les grandeurs physiologiques entre elles

Le paramètre anthropométrique idéal serait la **masse de tissu actif**. Depuis le début en physiologie, on utilise un individu standard qui n'existe pas. Il est défini par :

- **Une taille d'1,70m**
- **Un poids de 65kg**
- **Une surface corporelle de 1,73 m²**

Attention le prof avait changé le poids de l'individus standard il y à deux ans (on passe de 70Kg à 65Kg). Mais la fiche de l'année dernière n'était pas à jour.

Pour chacun d'entre nous la surface corporelle se calcule à partir de la taille et du poids. Elle correspond plus ou moins au métabolisme de base ce qui permet d'indexer un certain nombre de grandeurs physiologiques comme par exemple **le débit de filtration glomérulaire**.

3) Exemple du débit de filtration glomérulaire

Rappel hyper important, **débit de filtration glomérulaire** : volume de plasma totalement épuré d'une substance par unité de temps par les reins.

On prend deux sujets de taille, poids et surface corporelle différents avec le même débit de filtration glomérulaire : **80ml/min**. Si on indexe le débit de filtration glomérulaire à un individu standard en faisant une règle de 3 (= *tableau en croix*), on trouve que le sujet 1 a un rein qui fonctionne beaucoup moins que le sujet 2. On peut donc comparer de façon intelligente la fonction rénale de deux sujets de gabarit différents.

	Poids (kg)	Taille (m)	DFG (ml/min)	Surface corporelle (m ²)	DFG (ml/min/1,73 m ²)
Sujet 1	85	1,80	80	2,05	67,5
Sujet 2	72	1,70	80	1,83	75,6

Petite explication : Quand on dit qu'on indexe débit de filtration glomérulaire (DFG), cela signifie qu'on lie une certaine valeur de DFG à une certaine valeur de surface corporelle (qui est la valeur de référence).

Ici, pour une même valeur de DFG, comme on est sur des gabarit différents, cela signifie que **la fonction rénale des deux est différente quand on le ramène à un individu standard (même s'ils ont le même DFG)**. Cela permet de comparer les fonctions rénale grâce à des rapports de proportionnalité (règle de 3).

4) Valeur comparable : valeur divisée par la surface corporelle

Il en va de même pour le **débit cardiaque**, chez un individu standard :

- Le débit cardiaque est de : **5 L/ min**
- L'index cardiaque qui est rapporté au m² : on a **3,5 L/min/m²**

La filtration glomérulaire d'un individu standard quand a elle est de **120 ml/min/1,73m²**.

(Là on parle de la fonction des reins).

V/ Conclusion

→ Le métabolisme de base est **une dépense énergétique inéluctable**

→ Il se mesure par la **production de chaleur** au repos

→ Le métabolisme de base est bien **corrélé à la surface corporelle**

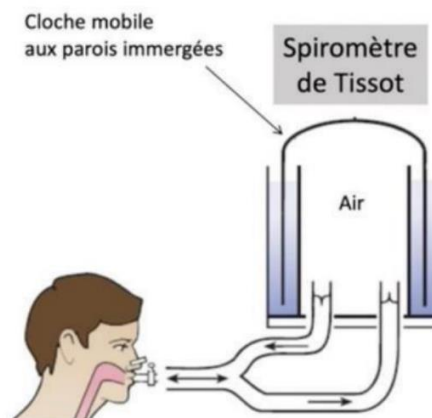
→ La surface corporelle permet **d'indexer les valeurs biologiques** pour les comparer entre individus de corpulence différente

PARTIE 2 – Respiration

On va maintenant parler de la **respiration** à l'échelle de l'**organisme** et de la **mitochondrie**. On fera de nouveau la différence entre **oxydation** et **combustion** et on descendra dans les mécanismes mitochondriaux (**phosphorylation oxydative**).

1/ Respiration à l'échelle de l'organisme

Comment mesure-t-on la consommation d'O₂ et la production de CO₂ à l'échelle de l'organisme ? On utilise un **spiromètre** dont le volume sous la cloche va varier. Ce volume est en **circuit fermé** avec l'individu. Pour distinguer oxygène et gaz carbonique on utilise un piège à CO₂ qui est de la chaux sodée et ainsi **la consommation d'oxygène est responsable d'une diminution de volume sous la cloche avec le piège à CO₂.**



Respiration
 Consommation d'O₂ =
 ↘ du volume sous cloche
 Production de CO₂ =
 ↗ du volume sous cloche.

La diminution est moindre si on ne met pas le piège du coup la différence de volume nous donne les deux paramètres.

Rappel : **Oxygène** → **nécessaire à l'oxygénation des nutriments**

L'oxydation biologique se produit dans **l'eau** chez les êtres vivants. Un composé carboné R-COH avec de l'eau va donner un composé carboné oxydé avec 2H et une certaine quantité de chaleur car le **rendement est inférieur à 1**.



Composé carboné

Composé carboné oxydé

L'oxydation biologique correspond à une **déshydrogénation** qui n'est pas la soustraction d'une molécule hydrogène H₂ stable mais la **soustraction de l'atome réactif H** qui va se dissocier dans l'eau (qui est une molécule faiblement ionisée en e⁻ + H⁺).

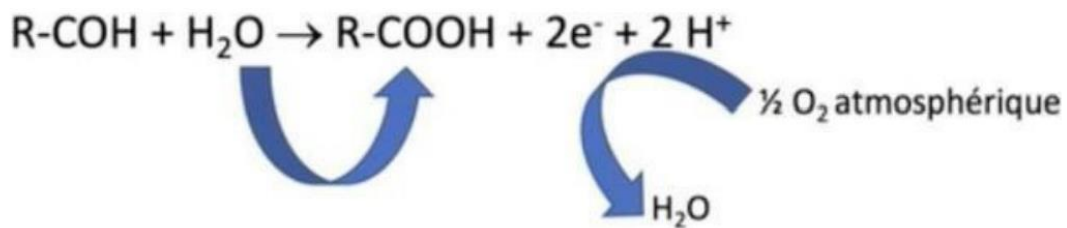
Déshydrogénation : $\text{H} \leftrightarrow \text{e}^- + \text{H}^+$

Rappel : lors d'une oxydation biologique, l'atome O₂ atterri dans la molécule d'H₂O.

II/Oxydation et combustion

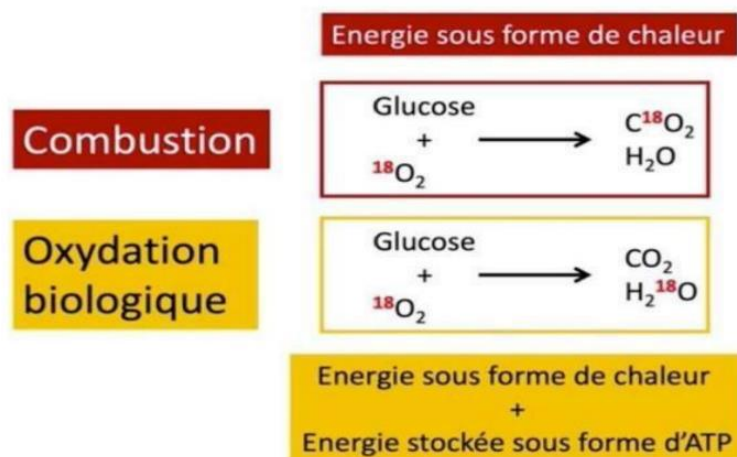
1) Oxydation biologique = déshydrogénation

On peut donc écrire la réaction d'oxydation biologique :



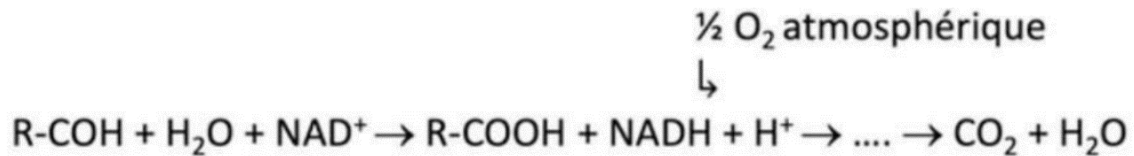
- On voit avec la flèche à gauche que l'oxygène qui vient **oxyder** le radical carboné **provient de l'eau** de l'organisme.
- On voit avec la flèche à droite que l'oxygène qui vient **fixer** les protons et les électrons provient de **l'atmosphère** (de l'air que vous respirez quoi).

La source d'oxygène pour l'oxydation biologique est bien l'eau et l'oxygène atmosphérique capte bien les électrons et les protons. C'est ce qu'on a vu dans la partie précédente, lorsqu'on trace l'atome lourd d'oxygène dans la combustion il atterri sur le gaz carbonique. Alors que si on le trace dans l'oxydation biologique il atterri sur la molécule d'eau.



2) Oxydation + Réduction + Phosphorylation

L'**oxydation est couplée à une réduction** et à une **phosphorylation** ainsi il y a des composés qui vont être capables d'être réduits en même temps que les composés organiques vont être oxydés. Par exemple le NADH, le FAD et finalement l'O₂ puisqu'au cours de la réaction ci-dessous le composé NADH ou FAD ou O₂ va aboutir du CO₂ associé à de l'eau à partir du radical carboné initial.



Donc ce **transfert d'une paire d'électrons** du composé organique R-COH au FAD ou NAD⁺ puis finalement à l'O₂ se produit dans les **chaines respiratoires mitochondriales** et libère l'énergie nécessaire à l'assemblage d'une molécule d'ATP.

Vous voyez tout ça en bioch dans la partie sur le métabolisme mitochondrial.

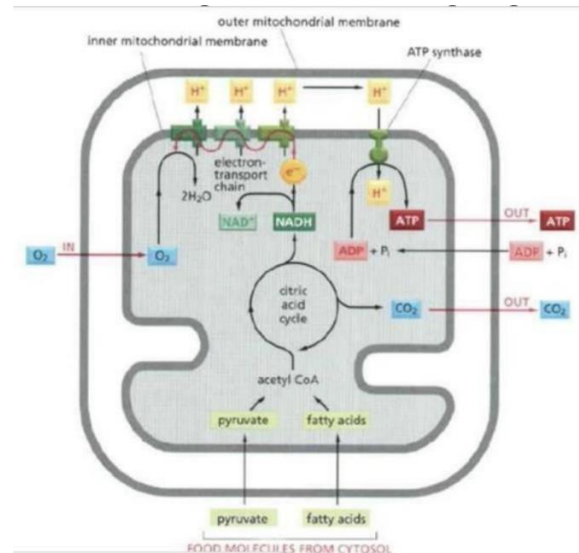
3) Empreinte carbone

Le **gaz carbonique** est le produit final de l'oxydation des composés organiques par les êtres vivants ce qui nous permet de comprendre ce qu'est l'empreinte carbone. Chaque organisme vivant qui a un métabolisme énergétique (donc qui consomme des nutriments) va avoir une **empreinte carbone** plus ou moins forte. De la même manière que les machines consommant des énergies fossiles vont produire du gaz carbonique qui auront une empreinte carbone.

III/ Oxydation phosphorylante

1) Schéma simplifié du fonctionnement mitochondrial

Si on regarde la mitochondrie de manière simplifiée, on réalise qu'il y a dans le cytoplasme nos composés organiques qui entrent à l'intérieur et qui sont transformés en **acétyl-CoA** pour entrer dans le **cycle de Krebs** et être dégradés jusqu'au **gaz carbonique**. Au cours de cette dégradation, la molécule **NADH** va intervenir et permettre aux **chaines des transport d'électrons** de faire leur travail ; à l'oxygène de trapper les électrons et les protons pour former de l'eau. En même temps il y a la formation d'un **gradient de concentration** de protons qui est différent entre l'espace intermembranaire et le cytoplasme.



Le gradient de concentration permet par **diffusion des protons à travers la pompe ATP synthase** de synthétiser de l'ATP à partir d'ADP et de phosphate inorganique Pi.

Il peut y avoir quelques différences avec la bioch sur cette partie mais il faut quand même apprendre la version physio pour la physio même si c'est chiant.

2) Chaines respiratoires mitochondriales : convertisseur électrochimique

Les **chaines respiratoires mitochondriales** fonctionnent comme **des convertisseurs électrochimiques**.

On peut leur appliquer **la théorie électrique** qui dit que le travail (joules) est proportionnel à la quantité d'électricité (coulombs) multiplié par la différence de potentiel (volts).

Autrement dit : Travail (J) = Quantité d'électricité (C) x Différence de potentiel (V). la formule elle est la pour que vous visualisez que c'est proportionnel.

Cette différence de potentiel est liée à l'accumulation de protons entre les feuillettes membranaires et pourrait théoriquement se mesurer entre l'intérieur de la mitochondrie et l'intervalle entre les deux feuillettes. On ne le mesure pas directement c'est pourquoi on parle aujourd'hui de **théorie chimio-osmotique** : on considère que les choses se passent comme ça mais on n'en a pas la confirmation directe.

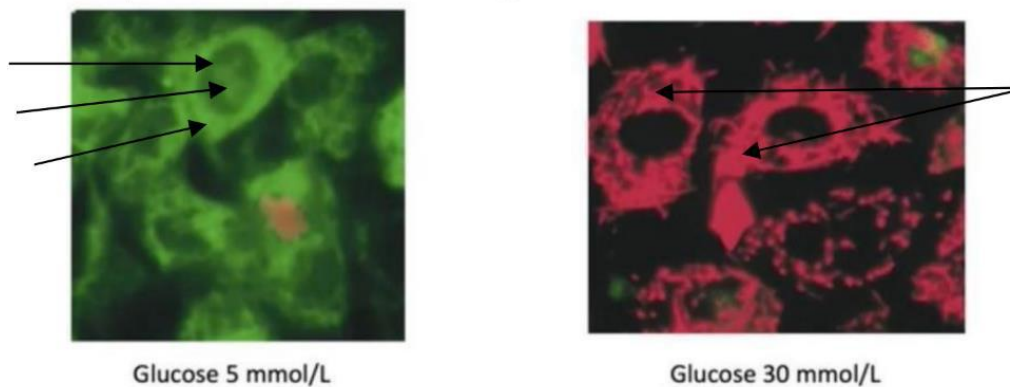
→ Cependant on en a des **confirmations indirectes**

3) Activité des chaînes respiratoires mitochondriales

Exemple des confirmations indirectes : Ici on utilise **une sonde qui va s'accumuler dans le cytoplasme** des mitochondries **proportionnellement à la différence de potentiel**.

On voit sur la photo de gauche une cellule dont le noyau apparaît en noir avec sa chromatine un peu vert clair et le cytoplasme en vert foncé où se trouvent les mitochondries. On expose ces cellules endothéliales (d'aorte bovine) à une concentration de glucose de 5 mmol/L et on mesure une **fluorescence** puisque la sonde qui s'accumule dans les mitochondries peut absorber une longueur d'onde particulière.

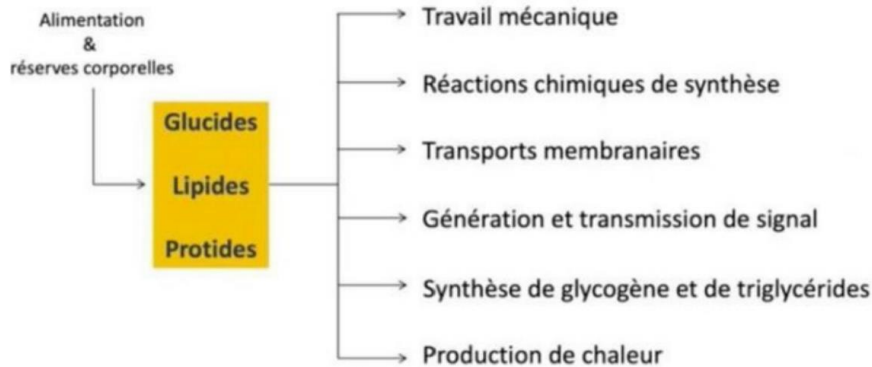
Lorsqu'on fait la même chose avec six fois plus de glucose (photo de droite) dans le milieu de culture, on s'aperçoit que **la sonde fluorescente s'est accumulée dans les mitochondries**. Elles deviennent alors rouges et extrêmement visibles.



Ainsi **l'augmentation de la fabrication d'ATP liée à l'arrivée importante de glucose** (qui est une des molécules précurseur du cycle de Krebs) est mesurable indirectement par cette sonde fluorescente.

4) Utilisation de l'ATP

Dans l'organisme, l'ATP va servir à faire un **travail mécanique**, des **réactions chimiques** de synthèse, des **transports** membranaires, va générer des signaux et permettre leur transmission, va aussi permettre la **synthèse de molécules de stockage** et enfin la **production de chaleur**. Cet ATP provient de la dégradation des nutriments qui sont soit d'origine alimentaire soit d'origine corporelle (réserve corporelle) soit des deux.



IV/ Conclusion

→ L'énergie libre des nutriments est transformée en **ATP au cours de la respiration** (cf Bioch).

→ L'ATP est **en permanence synthétisé** par toutes les cellules et **n'est PAS stockée**. C'est un petit peu comme l'électricité, on ne sait pas le stocker.

→ L'ATP diffuse selon son **gradient chimique** à l'intérieur de la cellule vers les zones actives pour être consommé (donc le transfert d'ATP est favorable dans ces zones) et permettent les fonctions cellulaires.

PARTIE 3 – Intérêt de la mesure de la consommation d'oxygène

Maintenant, on va voir en quoi il est intéressant en physiologie et médecine de mesurer **la consommation d'oxygène** et comment on fait ça. C'est intéressant parce que ça nous donne une idée du rendement musculaire, que ça nous permet de surveiller la rééducation cardiovasculaire chez des personnes qui ont fait un infarctus du myocarde par exemple, et que ça nous permet d'optimiser l'entraînement chez les sportifs de haut niveau.

I/ Mesure du rendement musculaire

1) Déterminants de la consommation d'O₂

Globalement la **consommation d'oxygène** est déterminée par la capacité de faire **circuler** le sang, en amont d'établir un **échange** entre l'air et le sang, et finalement de **transporter** l'oxygène dans le sang.

2) Mesure du rendement musculaire

Pour mesurer le rendement musculaire, il faut s'intéresser à la consommation d'oxygène au **repos et à l'effort** et calculer la différence. Ainsi on utilise le **coefficient thermique de l'oxygène** et un tapis roulant. On mesure finalement le rapport entre l'énergie mécanique et l'énergie consommée réellement.

$$\text{Rendement de la contraction musculaire} = \frac{\text{Energie mécanique (kcal)}}{\text{Energie consommée (kcal)}}$$

Exemple :

On prend l'exemple d'un sujet au repos avec une consommation d'oxygène de 0,3 L/min et de 2,0 L/min à l'effort. Il va donc consommer 1,7 L/min pour cet effort spécifiquement.

Pour calculer la consommation d'O₂ spécifiquement à l'effort on fait la différence entre la consommation en O₂ entre effort et repos.

- On a donc $2 - 0,3 = 1,7$ L/min

Si on **multiplie cette consommation d'oxygène au coefficient thermique de l'oxygène**, on obtient la **quantité de kcal par unité de temps que l'individu utilise**.

Rappel : le coefficient thermique de l'oxygène = 4,82 kcal/L.

- On a donc $1,7 \times 4,82 = 8,19$ kcal/min

On mesure maintenant son **activité mécanique** à l'aide d'un tapis roulant. On trouve énergie mécanique = 1,88 kcal/min. On peut alors faire le rapport entre cette énergie mécanique (kcal/min) et l'énergie consommée afin de trouver le **rendement de la contraction musculaire**.

$$\text{Rendement de la contraction musculaire} = \frac{\text{Energie mécanique } 1,88}{\text{Energie consommée } 8,19} = 23\%$$

Chez cet individu à ce moment-là, le rendement de la **contraction musculaire est de 23%**. Ce paramètre peut être optimisé dans le cadre d'un entraînement.

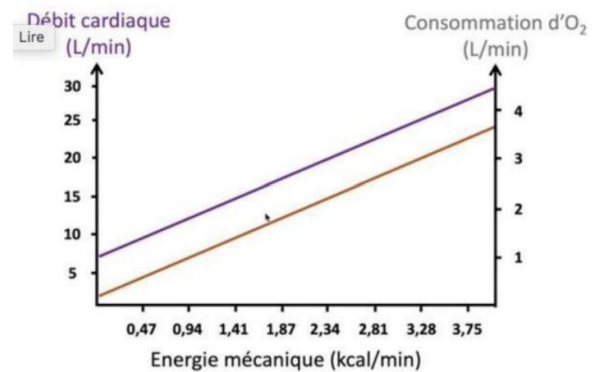
Vous êtes censé savoir-faire ces calculs même si c'est jamais tombé tel quel. Avec l'augmentation du nombre de Qcm on sait jamais.

II/ Surveillance de la rééducation cardiovasculaire

1) Rééducation cardiovasculaire après un infarctus du myocarde

Infarctus : destruction d'un certain nombre de cardiomyocytes (*cellule musculaire cardiaque*) qui aboutit à la **diminution de la force de contraction** du coeur et donc une **diminution du volume d'éjection systolique (VES)** du sang par le coeur.

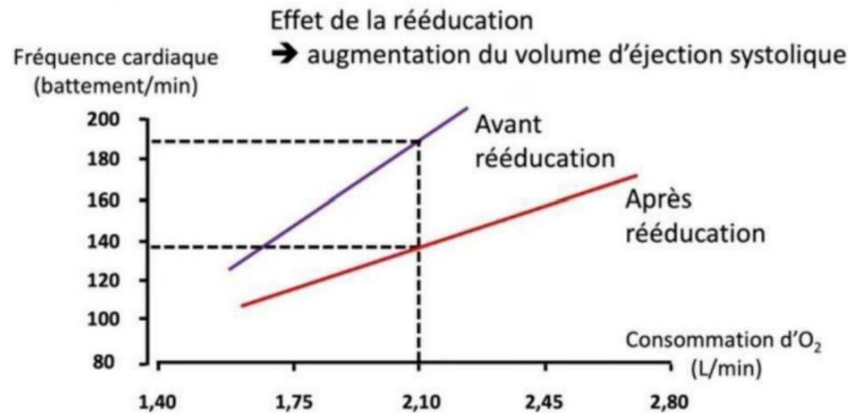
Sur l'axe horizontal, cette **énergie mécanique est proportionnelle à la consommation d'oxygène**.
Comme pour consommer l'oxygène il faut le faire circuler, le **débit cardiaque évolue en parallèle** de la relation entre énergie mécanique et consommation d'O₂.



Sachant que le Débit cardiaque = Fréquence cardiaque x VES, et que le VES diminue après un infarctus du myocarde, on peut mesurer la relation entre la fréquence cardiaque (axe vertical) et la consommation d'oxygène à différents moments de la rééducation :

- Avant la rééducation, pour une consommation d'oxygène de 2,10 L/min, on peut observer une **fréquence cardiaque très élevée** (environ 190 bpm).
- Après la rééducation, on voit aussi que cette même consommation d'oxygène est obtenue pour une **fréquence cardiaque bien plus modérée** (environ 135 bpm).

→ Ainsi grâce à la rééducation on a pu **diminuer**, on a aussi pu la diminuer **pour un même débit cardiaque**, donc le VES a augmenté au cours de la rééducation (ce qui était l'objectif).

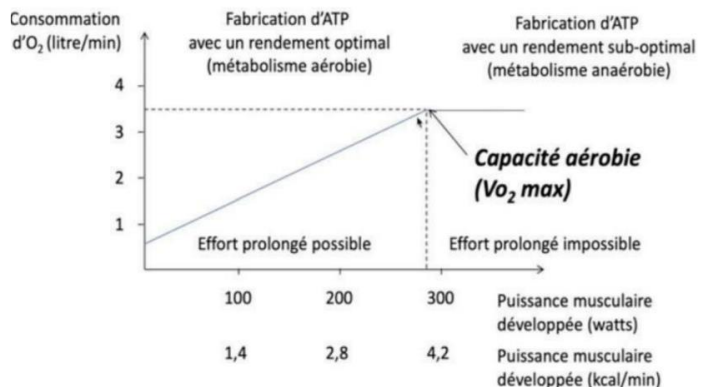


III/ Optimisation de l'utilisation de l'oxygène chez le sportif

1) Capacité aérobie et sport

Capacité aérobie (VO₂ max) : consommation maximale d'oxygène avant un seuil de plateau.

Il y a toute une phase où la consommation d'oxygène (axe vertical) augmente en fonction de la puissance développée (indiquée en watts ou en kcal/min). Tant qu'on peut augmenter notre consommation d'oxygène en proportion de la puissance développée, on est dans un **rendement optimal** du métabolisme aérobie c'est-à-dire de la fabrication d'ATP avec un rendement qui n'est quand même que de **40%**.

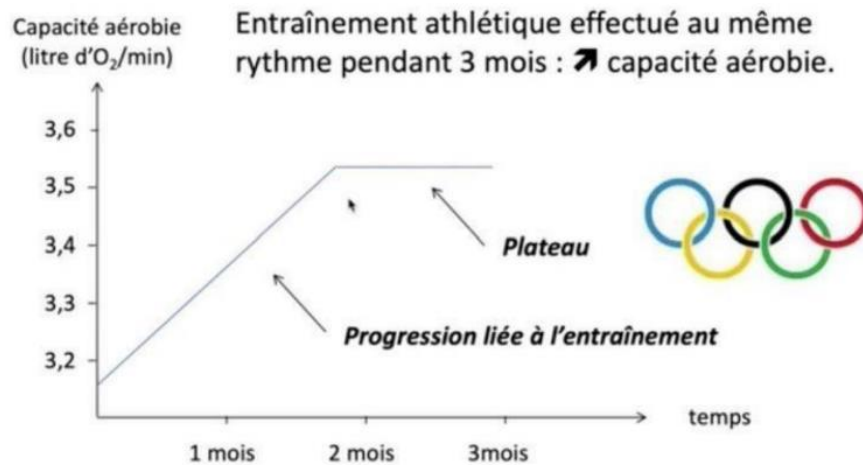


Il arrive un point entre la phase croissante et la phase de plateau. A ce moment, si on continue à augmenter son effort ça ne durera pas longtemps car le **rendement de la fabrication d'ATP devient sub-optimal**. Toute une série de métabolites qui vont limiter l'effort (comme l'acide lactique) sont produits par l'organisme.

→ Le point d'inflexion s'appelle la **VO₂ max**.

On peut faire **augmenter cette VO₂ max** au cours d'un entraînement programmé. Sur le schéma ci-dessous, on voit que grâce à l'entraînement réalisé pendant 3 mois elle part de 3,1 L/min pour arriver à 3,55 L/min.

Cette progression liée à l'entraînement optimise les performances du sportif donc il est prêt pour la compétition lorsqu'il est sur la phase de plateau à partir d'environ 2 mois d'exercice.



IV/ Conclusion

→ L'analyse de la **consommation d'oxygène** qui est facile à mesurer permet de diriger.

- L'entraînement des sportifs
- La rééducation des patients cardiaques

→ Attention, il s'agit d'une **mesure globale**. Lorsqu'on a une anomalie sur cette mesure on ne peut pas identifier l'origine du problème sans de plus amples explorations.

C'est bientôt fini, plus qu'une seule partie !

PARTIE 4 – Bilan énergétique

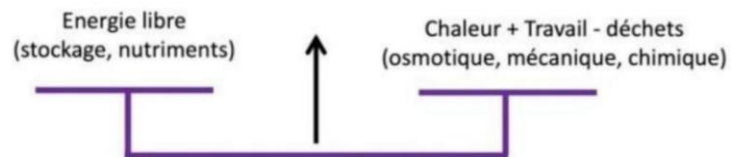
Bilan énergétique : différence entre l'énergie disponible et la dépense énergétique d'un individu. Ce bilan permet d'expliquer des variations pondérales ou des stabilités pondérales.

- **Bilan énergétique = Energie disponible – Dépense énergétique**

1/ Énergie disponible – dépense énergétique = bilan

1) Bilan énergétique

On retrouve d'un côté **l'énergie libre des nutriments**, des éléments stockés dans l'organisme et de l'autre côté il y a la **production de chaleur et le travail moins les déchets** qui sont produits.



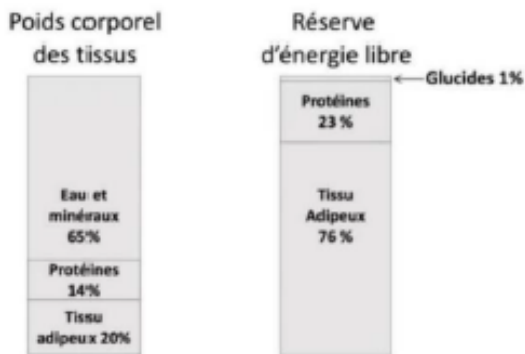
L'organisme est incapable d'utiliser ces déchets entièrement car les liaisons covalentes ne sont pas accessibles au métabolisme énergétique : **l'urée et l'acide urique**.

2) Energie d'origine alimentaire

Il faut bien comprendre que lorsqu'on mange, tous les nutriments qui possèdent des molécules de transport sur l'épithélium intestinal vont être **absorbés** par l'intestin grêle.

La prise alimentaire est **contrôlée par l'individu** qui gère son assiette et biologiquement par un certain nombre d'**hormones** (ex : hormones de la satiété produites par l'estomac et par le tissu adipeux qui sont la **ghréline** et la **leptine**). La dimension culturelle chez l'homme peut aboutir à des **excès alimentaires** ce qui ne se produit pas chez les animaux sauvages.

3) Capital énergétique de l'organisme



Les tissus ont un **potentiel énergétique**. Le **tissu adipeux** est une énorme réserve énergétique et les **muscles** sont aussi une réserve énergétique.

→ Le poids corporel des tissus n'est pas proportionnel aux réserves d'énergie libre.

On voit qu'il y a une grande proportion d'eau et de minéraux dans l'organisme par rapport au poids total.

II/ Prise de poids

1) Un sujet prend du poids

Exemple : (l'exemple n'est pas à apprendre mais par contre il faut savoir faire les calculs ++)

Un sujet prend du poids. Il a un apport énergétique moyen de 3100 kcal. En 15 jours il a pris 400g.

Comment calculer cet apport de 3100 kcal ?

- On mesure la consommation d'oxygène sur quelques minutes puis en extrapolant la consommation quotidienne à 623,2 L/j.
- Ensuite on multiplie cette consommation par le coefficient thermique de l'oxygène (4,82 kcal/L) ce qui nous donne le nombre de kcal ingérées par le sujet qui est proportionnel au nombre de kcal brûlées par ce même sujet. Donc $623,2 \times 4,82 = 3100$ kcal.

Comment expliquer sa prise de poids ?

La prise de poids se fait au profit du **tissu adipeux**. Dans 400g de tissu adipeux, on a $400g \times 9 \text{ kcal/g} = 3600$ kcal. S'il a pris 400g en 15 jours ça veut dire qu'il a une dépense énergétique quotidienne de 2860 kcal/j.

$$\text{Dépense énergétique} = \frac{(3100 \text{ kcal par jour} \times 15 \text{ jours}) - 3600 \text{ kcal}}{15 \text{ jours}} = 2860 \text{ kcal}$$

Comme il a une consommation de 3100 kcal et qu'il dépense 2860 kcal, il a donc 240 kcal/j qui sont ingérés mais qui ne sont pas dépensés : $3100 - 2860 = 240$ kcal/j. Il a donc **240 kcal d'excès** par jour. On va donc dire à ce sujet **d'augmenter sa dépense énergétique**.

2) Dépense énergétique chez l'adulte

On peut voir les dépenses énergétiques de manière schématique assez artificielle, car selon la manière dont on pratique le footing, la natation ou le cyclisme la dépense n'est pas la même mais en moyenne :

- Métabolisme de base : **40 Kcal/m² /h**
- Travail de bureau : 60 Kcal/m² /h
- Faire le ménage : 140 Kcal/m² /h
- Cyclisme : 250 Kcal/m² /h
- Natation : 350 Kcal/m² /h
- Footing : 600 Kcal/m² /h
- Marche (4km/h) → 200 kcal/h
- Footing (10Km/h) → 690 kcal/h
- Natation (2.5 km/h) → 1160kcal/h

III/ Comment garder un poids stable ?

Exemple : on a un sujet qui a 3000 kcal/j de ration alimentaire et qui a un métabolisme de base de 40kcal/h/m².

1) Calcul de sa dépense supplémentaire

- **Dépense supplémentaire = dépense énergétique totale – métabolisme de base**

Ici le métabolisme de base = $40\text{kcal/h/m}^2 \times 24\text{h} \times 1,73\text{ m}^2 = 1660\text{ kcal}$ (environ)

Donc dépense supplémentaire = $3000 - 1660 = 1340\text{ kcal/jour}$.

Là le prof considère la dépense énergétique supplémentaire comme l'excès de calories ingérées prcq ça va être les mêmes valeurs, si on considère qu'il faut éliminer l'excès de calorie (dans le cas où on ne souhaite pas prendre de poids). Du coup suivant cette logique le nombre de calories que le sujet doit « brûler » pour être à l'équilibre, c'est le nombre de calories ingérées (3000 kcal ici) auquel soustrait le métabolisme de base (1660 kcal ici).

Il sait également que ce sujet **dépense 800kcal** en travaillant dans la journée (travail de bureau). Donc on soustrait la dépense supplémentaire à cette dépense-là. Il lui reste donc à peu près 600kcal

$1340 - 800 = 600\text{ kcal}$

- Il faut donc avoir une activité physique soutenue qui **dépenserait 600 kcal tous les jours** pour ne pas prendre de poids. Cependant ce n'est pas rien d'aller faire 10 km de footing tous les jours. (*Rappel : Footing (10Km/h) → 690 kcal/h*).

2) Conséquence d'une dépense supplémentaire insuffisante

On prend l'exemple d'une **dépense totale de 2461 kcal/jour** pour **3000 kcal/jour d'apports**. Donc la différence est de 539 kcal/jour.

Rappel : on fait : $3000 - (1661 + 800) = 539$ kcal/jour. Comme on est en positif on est dans de l'excès (donc prise de poids).

$$\text{Gain de masse grasse} = \frac{539 \text{ kcal/ jour} \times 31 \text{ jours}}{9 \text{ kcal /g}} = 1856 \text{g en 31 jours}$$

Si on extrapole sur 1 mois (si on multiplie ces 539 kcal/j par 31 et qu'on divise par la quantité de calories libérée par la combustion 1g de lipide) on trouve que ce sujet, s'il ne fait pas 10km de footing par jour et s'il continue à manger de la même manière **va prendre 1,856 kg en 1 mois**.

IV/Conclusion

→ Le bilan énergétique est intéressant et nécessaire devant des variations de poids

→ Lorsque le bilan énergétique est perturbé, il n'indique pas forcément la cause du déséquilibre.

Petite dédis :

- *Dédis à vous qui avez terminé cette fiche (ne vous inquiétez pas pour les calculs ils sont pas très compliqué).*
- *Dédis à mon chien ma princesse*
- *Dédis à Sarah t'étais vraiment une marraine incroyable !!*
- *Dédis aux fillottes, vous allez tous casser soyez fier de votre travail !*
- *Dédis à Clarisse et à Charlotte*