

BGU 09

Physiologie Animale :

La Fonction Digestive.

La fonction digestive fait parti d'un ensemble de quatre fonctions de nutrition : respiration, digestion, excrétion et circulation.

D'autres fonctions sont par exemple : la locomotion, la marche, le travail, la stature, la posture, l'aguets, l'affût, etc...

I\ Introduction, généralités.

A\ Présentation de la fonction digestive.

Le tube digestif peut être séparé en différents segments (parties) :

- partie sus diaphragme : de la bouche à l'œsophage ;
- partie sous diaphragme : estomac, intestin grêle, gros intestin (ou colon), mais aussi pancréas et foie.

Les aspects de la digestion sont vastes :

- les besoins (adultes, au repos, ...)
- la prise alimentaire
- digestion des aliments
- absorption des nutriments
- métabolisme (devenir des nutriments dans l'organisme).

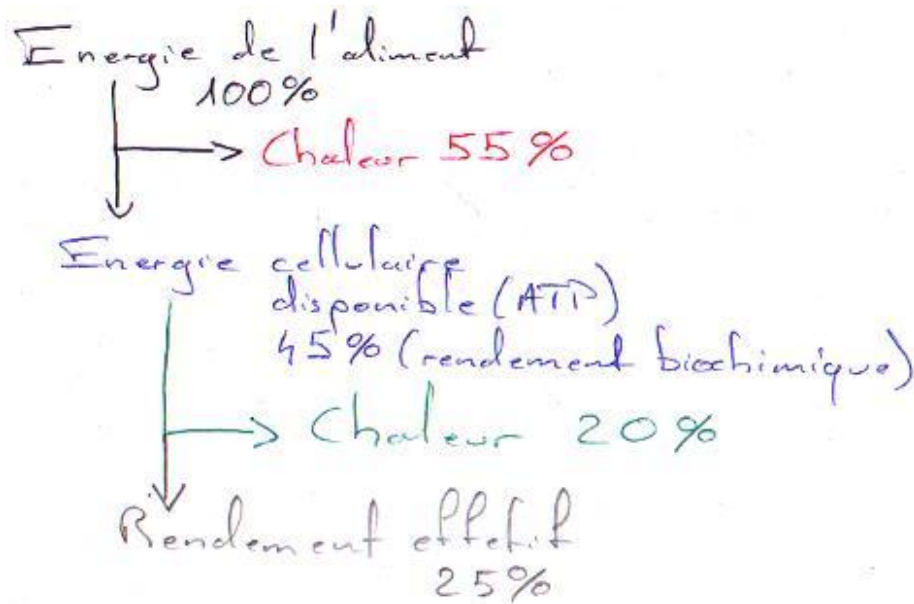
B\ Quelques rappels.

On distingue classiquement :

1. Le besoin d'énergie ou de calories, et sont concernés les glucides et les lipides (composés ternaires C-O-H). Ils servent à l'oxydation cellulaire. Ils vont aussi permettre les contractions musculaires, la régulation thermique, le transport actif, la réduction de synthèse ou l'anabolisme.

2. Le besoin de matière ou besoin plastique : glucides, lipides, protides (pour l'azote). Ces produits servent à « l'entretien », au renouvellement cellulaire, à l'énergie et à la synthèse de nombreuses hormones, à la croissance, à la gestation, à la lactation, aux exercices.

L'énergie chimique des nutriments est convertie en ATP avec un rendement d'environ 25%.



Les valeurs à connaître :

- Calorie (cal) : quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de 14,5°C à 15,5°C. En nutrition, on parle de Kcal. Kcal = Cal.
- Joule (J) : unité d'énergie mécanique. 1Cal = 4,184 J (ou 4,18J) \Leftrightarrow 1J = 0,239 Cal

C\ Mesure des dépenses énergétiques.

1\ La calorimétrie directe.

La calorimétrie mesure l'énergie thermique perdue par un sujet placé dans une enceinte close, isolée de l'extérieure.

2\ La calorimétrie indirecte ou thermochimie.

La thermochimie évalue l'énergie chimique des nutriments ou l'énergie théoriquement libérable par l'oxydation de substrats alimentaires en présence d'oxygène.

a\ La thermochimie alimentaire.

On utilise une bombe calorimétrique et on détermine ainsi la chaleur de combustion métabolique. Il faut tout de même corriger les valeurs obtenues ; par exemple, pour une protéine qui ne s'est pas complètement oxydée, il reste de l'urée qui renferme une énergie potentielle.

Il faut également tenir compte du rendement du tube digestif, mesuré par le coefficient d'utilisation digestive (CUD).

Constituants	CUD (en %)	Vol. Calorique (en KJ)	Kcal/gramme
Glucides	99	17	4
Lipides	95	38	9
Protides	85	17	4
Ethanol	99	30	7

b\ Thermochimie respiratoire.

Principe : L'organisme tire son énergie de l'oxydation des nutriments et la quantité d'énergie libérée dépend donc du volume d'O₂ utilisé.

Les méthodes de thermochimie respiratoire mesure la dépense énergétique d'un sujet à partir de sa consommation d'O₂.

c\ Coefficient thermique de l'O₂ : K_x.

Le coefficient thermique de l'O₂ est la quantité d'énergie libérée par litre d'O₂ consommé à partir de l'équation suivante : **métabolites + O₂ → CO₂ + H₂O + Energie.**

$$\text{Energie} = K_x \times \text{VO}_2$$

K_x varie selon les nutriments et l'on choisit un K_x moyen qui environ 5 Kcal/Litre d'O₂ (soit 20KJ/L d'O₂).

Comme le coefficient thermique de l'O₂ dépend du substrat transformé, il faut préciser la nature de celui-ci grâce au quotient respiratoire.

d\ Coefficient respiratoire (QR).

$$\text{QR} = \text{VCO}_{2(\text{expiré})} / \text{VO}_{2(\text{consommé})} \text{ unité : Litre par unité de temps.}$$

On détermine ce QR à partir d'une équation générale de l'oxydation des nutriments :

$$\text{QR}_{\text{glucides}} = 1 ; \text{QR}_{\text{protéines}} = 0.83 ; \text{QR}_{\text{lipides}} = 0.70.$$

3\ Evaluation du besoin énergétique.

a\ Définition du besoin énergétique.

« Besoins énergétiques d'un individu correspondant à la valeur de l'apport énergétique alimentaire qui équilibre la dépense d'énergie chez un sujet dont la corpulence, la composition de la masse corporelle et le degré d'activité physique sont compatibles avec le maintien durable d'une bonne santé et permettent l'exercice de l'activité physique nécessaire. » (OMS, 1986).

« Chez l'enfant et la femme enceinte ou allaitante, les besoins énergétiques incluent les besoins associés à la croissance tissulaire ou à la sécrétion lactée à un rythme comparable avec une bonne santé ».

Les apports énergétiques alimentaires correspondant à une moyenne des apports « habituels » assurés durant une durée déterminée, modérée et non aux apports effectifs d'une journée.

D'une façon conventionnelle, les apports sont exprimés sous forme d'apports journaliers.

A partir des besoins énergétiques d'une personne (homme de 60 à 70kg ou femme de 50 à 60kg) de référence, on procède à des corrections en prenant en compte, la taille, le poids, certaines modifications physiologiques (grossesse, allaitement, vieillissement) et les facteurs environnementaux (comme l'activité physique et le climat) pour déterminer les besoins de chaque sujet.

b\ Détermination du poids idéal en fonction de la taille.

Pour trouver le poids correspondant à la taille, il existe différentes formules.

- Indice de la masse corporelle (IMC) ou Indice de Quételet ou BMI en anglais (pour l'OMS).

$$IMC = P \text{ (en kg)} / T^2 \text{ (taille en cm)}$$

Ce rapport est de 22 pour un homme et de 20,8 pour une femme.

Pour un homme de 1m70, le poids idéal est de 63,6kg.

Pour une femme de 1m60, le poids idéal est de 51,7kg.

Un indice de 30 pour un homme et de 28,6 pour une femme sont des révélateurs d'obésité.

- La formule de Lorens, pour l'homme.

$$P = T - 100 - [(T - 150) / 4] ; T \text{ est en centimètre et } P \text{ en kg.}$$

Pour 1m70, le poids idéal est de 65kg.

- La formule de Lorens pour la femme.

$$P = T - 100 - [(T - 150) / 2,5] ; T \text{ est en centimètre et } P \text{ en kg.}$$

Pour 1m60, le poids idéal est de 56kg

La formule de Lorens permet un intervalle de +/- 10% mais si cet intervalle atteint 20%, on se trouve dans un cas d'anormalité.

Ces estimations de poids se font en tenant compte du squelette.

c\ Composantes du besoin énergétique.

Le besoin énergétique est la résultante d'un ensemble de dépenses :

- liées au métabolisme de base (pour les femmes enceintes et allaitantes, les besoins de production sont inclus dans ce métabolisme ; même chose pour la croissance d'un enfant) ;
- liées au travail digestif et à l'utilisation des nutriments par l'organisme ;
- liées à la thermorégulation ;
- liées au travail musculaire.

a\ Le métabolisme de base.

Ce métabolisme est dépense énergétique mesurée dans des conditions standards et qui exprime les dépenses nécessaires de la vie d'un sujet au repos, à la neutralité thermique (entre 20° et 25°C), mesurée par thermochimie respiratoire (repos, couché, au calme, à jeun depuis 14h à sa neutralité thermique).

On réalise la mesure toujours à la même heure (environ 10h) pour éviter l'impact circadien sur la dépense énergétique de repos pendant les 24 heures.

Le métabolisme de base est proche du métabolisme lors du sommeil (le pouls est plus faible pendant le sommeil). On observe :

- diminution du tonus musculaire,
- relâchement des muscles lisses,
- diminution des fonctions de l'organisme.

Ces méthodes sont utilisées pour déterminer le dysfonctionnement de la thyroïde.

Pour des sujets de même âge, de même sexe, le poids corporel est le facteur essentiel du métabolisme de base.

Pour un homme adulte de 70kg, avec une activité légère, on trouve une valeur de 70kcal/h.
Pour une femme adulte de 55kg, avec une activité légère, on trouve une valeur de 55kcal/h.

Les facteurs de variation du métabolisme de base : le poids, la taille, le sexe, l'âge (il y a évolution de 5% par an de 3 à 10 ans ; diminution de 2% par décennie après 20 ans), l'état physiologie.

Le métabolisme de base augmente de 20% en fin de grossesse. Celui-ci varie avec les conditions de l'environnement : la pratique régulière d'un exercice physique important provoque son accroissement. Une température élevée va faire diminuer ce métabolisme alors qu'une température basse le fait remonter.

Certaines « conditions de vie » provoquent des changements : le caféisme et le tabagisme accroissent le métabolisme de base.

Un homme d'un mètre 70 et de 65kg a un métabolisme de base de 110kJ/kg/jr (26,3kcal).

Une femme d'un mètre 60 et de 55kg a un métabolisme de base de 100kJ/kg/jr (23,9kcal).

β\ Dépenses liées au travail digestif.

Il y a augmentation du métabolisme de base. La méthode de détermination consiste chez des sujets vivants, placés dans les conditions standard de mesure du métabolisme de base et recevant un repas de composition définie, on mesure la dépense supplémentaire au métabolisme de base et on la compare à l'énergie ingérée.

La dépense d'énergie liée à la prise alimentaire se décompose en deux facteurs :

- les dépenses liées au travail du tube digestif (commune à tous les nutriments) qui constituent une faible d'accroissement de la dépense (3% de l'apport énergétique ingéré).
- Les dépenses spécifiques liées à l'utilisation cellulaire de chaque catégorie de nutriments, aussi appelé : Action Dynamique Spécifique des nutriments (ADS). ADS = 0 pour les glucides, 7% pour les lipides et entre 25 et 30% pour les protéides.

L'ingestion de 100kJ (5,88g de protéine) entraîne l'apparition de 130kJ dans l'organisme et 107 kJ quand le nutriment est un lipidique.

L'ADS est aussi appelé « Extra Chaleur Post Prandiale », soit ECPP (perte de chaleur après la prise alimentaire).

Quand on crée un apport énergétique au niveau du métabolisme de base, l'accroissement de la dépense énergétique lors de la prise alimentaire est d'environ 10% du métabolisme de base. Chez un sujet dans des conditions standards, sans activité physique, à 25°C, pour maintenir l'équilibre de l'état physiologie, il faut des apports énergétiques supérieurs de 10% au métabolisme de base.

γ\ Dépenses liées à la thermorégulation.

Homéothermie : la température centrale du corps (80%) doit être maintenue dans des limites étroites malgré les variations de la température ambiante → nécessité » d'un système de régulation (pour le froid ou le chaud).

Il existe chez l'Homme une température dite « de neutralité thermique », ou « température de confort » qui correspond aux conditions de mesure du métabolisme de base (20 à 25°C). C'est la température qui chez un sujet n'entraîne aucune dépense énergétique engagée dans la lutte contre le chaud ou le froid.

Dans le maintien de l'homéothermie, on trouve un rôle essentiel du sang.

- Thermogenèse :

C'est la lutte contre le froid, une lutte sans protection.

Il va y avoir mise en place des frissons thermiques (contractions musculaires sans mouvement) qui dégagent de la chaleur et mettent en œuvre un métabolisme de sommet, 2 à 5 fois supérieur au métabolisme de base.

- Thermolyse :

Il y a mise en jeu du système vasculaire par vasodilatation ; il y a évacuation thermique par la peau et/ou par l'eau (visible ou non). Dans les conditions du métabolisme de base, la perte journalière d'eau est de 0,7 à 0,8 litre, en distinguant environ 2/3 perdus par les poumons et 1/32 par la peau.

Si la température augmente, il va y avoir des pertes d'eau visibles par le mécanisme de sudation. La sueur d'une journée peut représenter jusqu'à 10 litres.

La thermolyse est efficace car la perte de chaleur d'un gramme d'eau vaporisée, élimine 2,45kJ.

Si les conditions de chaud ou de froid sont trop fortes, l'organisme s'épuise rapidement.

On admet actuellement que l'Homme est moins armé pour lutter contre le chaud que contre le froid.

δ\ Dépenses liées au travail musculaire.

La contraction musculaire est essentielle. Le rendement de mécanique de celle-ci n'est que de 20% : 75% de l'énergie est dépensée sous forme de chaleur. Ces efforts musculaires sont relativement difficiles par de fortes températures car il y a augmentation de la quantité supplémentaire de chaleur à éliminer.

Les dépenses liées au travail musculaire sont d'origines diverses : professionnelles, ludiques, sociales.

Activités	Homme	Femme
Sommeil	1	1
Position couchée et assise au calme	1,2	1,2
• Debout	1,4	1,4
Promenade lente	2,5	2,5
Marche soutenue	3,2	3,2
Position assise	1,3 à 1,5	1,3 à 1,5

Le poids du sujet est un facteur essentiel de la dépense énergétique liée à l'activité physique.

ε\ Les besoins énergétiques.

1\ Chez l'adulte.

Chez l'homme adulte moyen, les besoins énergétiques sont d'environ 2600kcal/jour, et chez la femme, ils sont de 2000kcal/jour.

Pour un homme, un travail physique pénible va faire monter les besoins énergétiques jusqu'à 3500kcal/jour.

Apports énergétiques conseillés par le CNERNA (1992)

Chez l'homme, activité physique réduite → 2100 kcal

Chez l'homme, activité physique moyenne → 2700kcal

Chez l'homme, activité physique forte → 3000 kcal

Chez la femme, activité physique réduite → 1800 kcal

Chez la femme, activité physique moyenne → 2000kcal

Chez la femme, activité physique forte → 2200 kcal

2\ Evolution des besoins énergétiques lors du vieillissement.

Avec l'âge, ces besoins vont diminuer :

- Changement du poids corporel et de la composition de l'organisme (diminution de la masse musculaire et accroissement de la masse grasse).
- Diminution de l'activité physique : incidence des maladies ou des infirmités qui font régresser l'activité physique.

L'apport énergétique total doit subir une diminution en fonction de l'âge.

	20 à 39ans	40 à 49 ans	50 à 59 ans	60 à 69 ans	70 à 79 ans
AET	100%	95	90	80	70

3\ Au cours de la grossesse.

Au cours de la grossesse, le métabolisme de base s'élève. De façon moyenne, le gain de poids est d'environ 12,5kg et les besoins supplémentaires sont de l'ordre de 400kJ/jour durant le second trimestre et entre 900 et 1000kj/jour pendant le troisième trimestre, soit 633 en moyenne.

4\ Au cours de l'allaitement.

Les apports énergétiques supplémentaires sont d'environ 2100kJ/jour.

5\ Chez les enfants (croissance).

Chez les enfants en croissance, on va distinguer deux facteurs : la valeur énergétique des tissus formés et le coût énergétique des biosynthèses.

On trouve une augmentation de 23kJ/gramme pour le coût énergétique de la croissance d'un nourrisson. Chez le jeune enfant, cette valeur est de 21kJ/gramme.

6\ Rations équilibrées.

L'arachide et les olives ont des acides gras saturés alors que le maïs et le tournesol ont des acides gras insaturés.

Pour les aliments, il faut regarder la qualité organoleptique.

II\ Glucides et digestion.

A\ Les sources.

Les glucides sont présents dans les aliments sous deux formes : les sucres de goût sucré (sucre simple comme le glucose, le fructose et le galactose ; ou sucre double comme le lactose, le saccharose et le maltose) et les sucres sans goût sucré (exemple : amidon).

Classiquement, les aliments sont divisés en 6 groupes :

1_groupe bleu : lait et dérivés.

2_groupe rouge : viandes, poissons, œufs (richesse en protéines).

3_groupe jaune : les corps gras

4_groupe marron : céréales et dérivés mais aussi les produits sucrés (les cuirités).

5_groupe vert : fruits et légumes.

6_groupe violet : les boissons.

1\ Groupe 1, lait et dérivés.

On trouve du lactose (glucose + galactose). Le taux est faible mais existe. L'aspect nutritionnel est intéressant car le lactose facilite l'absorption de Calcium, l'implantation de la flore lactique dans le tube digestif.

Les bactéries lactiques servent à la fabrication des produits laitiers.

Il existe parfois une intolérance au lactose s'il y a déficience en lactase intestinale.

2\ Groupe 2, viandes, poissons et œufs.

Les viandes rouges comptent 0,5% de glycogène (en poids frais ou parties comestibles).

Les huîtres contiennent 6% de glucides qui évoluent en glycogène au moment de la reproduction. Les moules contiennent 2% de glucides.

3\ Groupe 3, corps gras.

Le beurre contient 0,6% de glucides et la crème 4%.

4\ Groupe 4, céréales et dérivés – produits sucrés.

Le blé (en grains) montre 68% de glucides, avec 2% de sucres simples ; 64% d'amidon et 2% de cellulose.

Le riz présente 70% de glucides avec essentiellement de l'amidon et 1% de sucres simples.

Le maïs contient également 70% de glucides avec 2% de cellulose.

Le sucre pur comme le sucre de canne, et la betterave à sucre contiennent 100% de glucides.

Le miel contient 70% de glucose + fructose et 6% de saccharose.

On trouve ensuite les produits de confiserie, le chocolat (poudre de cacao 40% de glucides, chocolat à croquer 64% de glucides), les confitures 60% et les glaces entre 20 et 25% de glucides.

5\ Groupe 5, Plantes potagères (ou « légumes ») et Fruits.

Les plantes potagères (en lieu et place des « légumes ») comprennent :

- les « légumes » (en général 7% sauf la tomate 4%)
- les tubercules : pomme de terre 19% ; topinambour 17% ; manioc 37%
- les graines de légumineuses (vrais légumes) : haricots, lentilles, pois, fèves : 55 à 65% avec essentiellement de l'amidon
- les champignons : 4%

Les fruits :

- les fruits frais aqueux : 5 à 10%
- les oléagineux (olive, noix de coco, avocat) : environ 10%
- les graines d'oléagineux (noix, noisettes, amandes) : 17% dont 3% de cellulose
- les fruits amylacés (riches en amidon, comme les châtaignes) : 40%
- les fruits secs : 70%
- les fruits exotiques : bananes 20% ; ananas 12% ; dattes 73%

6\ Groupe 6, les boissons.

Pour les boissons à base de fruits, on trouve 10 à 15% de glucides.

B\ Les besoins et apports en glucides.

Les sucres devraient représenter au moins 40% de l'AET (Apport Energétique Total).

L'amidon devrait couvrir 2/3 des besoins et les oses et diholosides 1/3.

Les besoins sont de 5 g/kg/jour.

C\ La digestion des glucides.

1\ La bouche.

La salive, avec α -amylase (salivaire) (aussi appelée ptyaline) dont le pH optimum est de 6,5 est une enzyme activée par les ions Cl^- .

L'action de cette enzyme est limitée à cause du court temps buccal. Elle devient inactive quand le pH passe en dessous de 4 (elle garde toutefois une certaine action dans l'estomac).

De nombreuses espèces animales n'ont pas d'amylase salivaire.

2\ L'estomac.

En plus de la continuité de l'action relative de la ptyaline, il y a l'action chimique de l'HCl (acide chlorhydrique). Le suc gastrique pur a un pH de 1.

3\ L'intestin grêle.

α \ Action prépondérante de l' α -amylase pancréatique.

L'action de cette enzyme est similaire à celle de l' α -amylase salivaire, avec des coupures de l'amidon et du glycogène. On obtient des éléments maltoses, maltotrioses, soit, des oligosaccharides ramifiés en 1-6 et non ramifiés plus un peu de glucose.

β \ Le suc intestinal.

Ce suc est sécrété par les glandes de Brunner et de Lieberkühn.

On trouve des oligosaccharidases et des disaccharidases spécifiques ; par exemple, la maltase qui agit à pH compris entre 5,4 et 6 et une lactase qui agit de 5,6 à 6. On peut aussi citer une saccharase dont le pH optimum est compris entre 5,8 et 6,2.

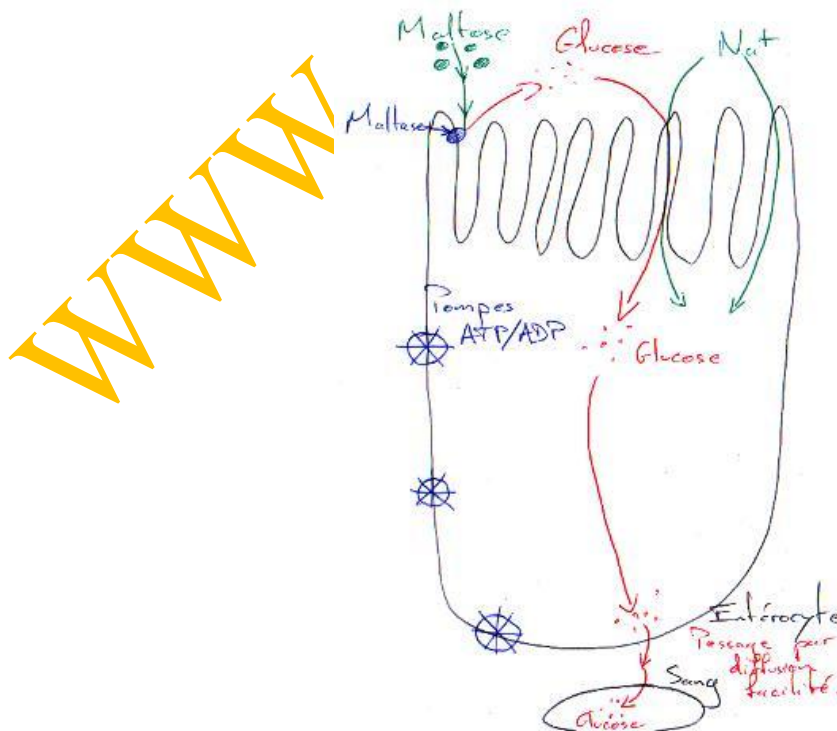
Ces hydrolases restent attachées à la bordure en brosse des entérocytes.

Il existe un complexe saccharase/Isomaltase qui hydrolyse le saccharose et la liaison $\alpha 1 \rightarrow 6$ des dextrines. La saccharase a aussi le nom d'invertase car le saccharose est dit « sucre inversé » ou bien encore de sucrase (saccharose se dit sucrose en anglais).

D \ Absorption des glucides.

1 \ Le glucose.

L'absorption du glucose est complexe et a surtout lieu dans le jéjunum (la partie haute de l'intestin grêle). L'absorption se fait par un transport actif secondaire : cotransport (ou symport) avec Na^+ au pôle apical de l'entérocyte. La concentration en glucose de l'entérocyte est supérieure à celle de l'intestin grêle. Cette absorption nécessite donc de l'énergie. L'énergie utilisée est associée au gradient de sodium assuré par les pompes Na/K sur les faces basolatérales). \rightarrow On obtient alors un gradient électrochimique de sodium entre la lumière intestinale et l'intérieur des entérocytes qui va dans le sens de l'entrée du sodium dans l'entérocyte.



Il y a entrée du glucose et du sodium au pôle apical de l'entérocyte. Le glucose passe dans le sang au pôle basal par diffusion facilitée.

Le glucose est le nutriment glucidique principal ($\approx 80\%$).

Le transport du glucose est actif, pour preuve, celui-ci est inhibé lorsque l'on ajoute de la ouabaine (glucoside caryotonique qui inhibe les pompes à sodium).

2\ Le galactose.

On trouve le même système que pour le glucose mais le galactose est présent en moindre quantité.

Toutefois, le galactose est un inhibiteur compétitif du transport de glucose dans l'intestin grêle.

3\ Le fructose.

Le fructose est absorbé par diffusion facilitée selon un gradient de concentration via un système indépendant du Na.

L'absorption de ce composé est lente par rapport à celle du glucose ou celle du galactose.

L'hydrolyse des polysaccharides est rapide, en effet, on observe que les mécanismes d'absorption du glucose et du fructose sont rapidement saturés.

On trouve une exception à ceci, l'hydrolyse du lactose qui a une vitesse deux fois moindre à celle du saccharose.

E\ Annexes.

Les fibres alimentaires.

a\ Définition.

Les fibres sont des polymères végétaux qui présentent dans leurs parois de la cellulose et des pectines végétales.

Les fruits et légumes sont surtout riches en cellulose et pectine. Le son contient de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine et de l'acide phytique.

Fibres végétales...	Biochimie	Distribution
Fibres glucidiques, fibreuses, cellulose	Eléments glucanes	Dans les parois des cellules végétales (indigestibles, rôle de ballast)
Fibres glucidiques, fibreuses, hémicellulose	Xylane, arabane, galactane	Dans le son et les légumineuses. Propriétés : hygroscopiques + ballast
Fibres glucidiques, non fibreuses	Pectines (peau de pomme), gommes, mucilage, alginates	Peaux et pépins de fruits, Algues
Fibres non glucidiques, Lignine		Dans les tiges et enveloppes de graines et des légumes secs
Fibres non glucidiques, Acide phytique		Dans le son

b\ Intérêt des fibres dans l'alimentation.

Les fibres ont un fort pouvoir de rétention d'eau et des substances hydrosolubles (glucides, minéraux, oligo-éléments) : elles jouent le rôle d'éponges. On peut trouver quelques fibres qui sont lipophiles.

Le son retient 8 fois son poids d'eau.

Les fibres de légumes et de fruits retiennent jusqu'à 10 fois leur poids d'eau, et les gommes arrivent jusqu'à 20 fois.

Cette capacité de rétention entraîne une augmentation du volume du bol alimentaire qui devient alors un lest ou un ballast, ce qui stimule alors la motricité (ou tonus) intestinale.

Remarque :

Les sucs intestinaux, la flore intestinale et les entérocytes desquamés forment les matières fécales minimales (liquides). Les fibres ont un rôle de tampon qui protège les muqueuses de l'action trop forte des sucs.

c\ Digestibilité des fibres.

On trouve un premier groupe de fibres indigestibles : lignine, mucilage, alginat. Des complexes vont ainsi se former (comme avec le son) et échapper ainsi à l'action enzymatique.

Le deuxième groupe de fibres est digestible. On y retrouve la cellulose, l'hémicellulose et les pectines ; ces dernières étant digérées à 90% par les enzymes bactériennes. Cellulose et hémicellulose sont digérées à 50% par les enzymes bactériennes.

Les produits de digestion des fibres sont des acides gras à courtes chaînes (C1, C2, C3, C4) qui seront absorbés ou éliminés voir même réutilisés par la flore. Il peut également y avoir production de gaz tels que le méthane, l'H₂, le CO₂ et des traces d'autres gaz éliminés par voie respiratoire ou intestinale, voir même cutanée.

d\ Fibres et transit.

Les fibres végétales sont hygroscopiques et difficiles à digérer. Elles maintiennent les selles humides et augmentent leur volume, ce qui provoque une augmentation de la vitesse du transit.

A dose préconisée, les fibres entraînent une accélération des transits lents (>3 jours) et un ralentissement des transits rapides (<1jour).

e\ Effets des fibres.

Digestion et absorption des lipides.

On observe trois effets majeurs :

- Prévention de l'athérome (en liaison avec le métabolisme du cholestérol) ;
- Prévention des choléithiases (cristaux dans les canaux biliaires) ;
- Prévention du cancer du colon par effet sur la flore intestinale.

En fait, toutes ces indications sont empiriques car les mécanismes réels sont encore hypothétiques.

Une augmentation du transit entraînerait une diminution de l'absorption de cholestérol en le piégeant dans les sels biliaires.

Il y a un effet écran produit par les substances hydrocolloïdales qui forment un film de protection au contact des entérocytes par rapport au milieu de la lumière intestinale.

- Effet sur le métabolisme des glucides.

Les fibres végétales améliorent la tolérance aux glucides et pendant les épreuves d'hyperglycémie provoquée (voie orale) permettent de faire diminuer le pic.

- Effet sur le métabolisme minéral.

Les fibres, par des phénomènes de chélation vont retenir les minéraux tels que Fe, Cu, Zn, Mg, Ca ... Ces ions seront donc mal absorbés.

F\ Glycémie et index glycémique.

On réalise les mesures au réveil et deux heures après la fin du repas. En général, on va trouver une valeur comprise entre 0,8 et 1,4g/L.

L'index glycémique permet de différencier les sucres « lents » et les « rapides ». Les sucres « lents » sont des sucres qui pénètrent lentement dans le sang.

Les sucres rapides sont de petite taille et élèvent rapidement la glycémie. Ils sont à éviter dans les cas de diabète ou d'obésité.

L'index glycémique est le fait que la glycémie augmente plus ou moins vite et atteint un pic, puis, redescend, ce qui forme un triangle. Le pic maximal est obtenu entre 20 minutes et 25 minutes.

La classification entre sucres lents rapides est supplantée par la notion de "bons" ou "mauvais" glucides.

Le classement de cet index, ou glycémie, à une valeur de 100% ; les raisins 85%, les patates 80%, riz blanc 72%, riz brun 66%, pâtes 60%, saccharose 60%, pois 50%, pommes 39%, lait écrémé 32%, lentilles 29%, soja 15%.

G\ Les boissons alcoolisées.

1\ La fermentation alcoolique.

Il y a apparition d'éthanol à partir de glucose. Tous les fruits sucrés donneront de l'éthanol. Par exemple, un vin à 12% indique que l'on a 12mL d'éthanol dans 100mL de ce vin ; c'est la même chose pour les bières et les autres alcools...

2\ La distillation

On part d'un besoin alcoolisé : on a besoin d'une boisson plus alcoolisée que la boisson de base.

A partir de vin, on va former le cognac et l'armagnac ; le cidre est la base du calvados ; la canne à sucre va permettre la fabrication du rhum.

Les origines de l'alcool sont différentes pour le whisky et la vodka.

Le métabolisme de l'alcool est toujours un sujet d'études.

1g d'éthanol libère 7kcal (soit 29,3J).

L'alcool ingéré doit être métabolisé par l'organisme avec une priorité absolue ; d'où le danger de prises multiples et rapides d'alcool en un temps restreint.

On distingue trois voies métaboliques pour la dégradation de l'alcool :

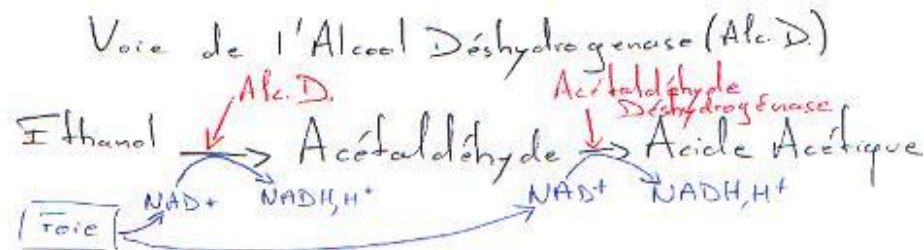
- Voie normale : « l'Alcool Déshydrogénase ».

Le NAD est un co-enzyme qui intervient dans tous les métabolismes glucidiques. L'absorption trop importante d'alcool fait dériver le NAD.

- Système microsomal oxydant l'éthanol,
- Système peroxydasique.

→ Ces deux dernières voies sont dangereuses car elles interviennent quand la voie normale est saturée. Elles nécessitent le NADPH₂, des enzymes des microsomes, des acides nucléiques et des acides aminés cellulaires.

La courbe de Widmark (avec flèche d'alcoolémie).



A partir d'une alcoolémie donnée, à un temps 0, et à condition de cesser les prises alcooliques, l'éthanolémie diminue d'environ 0,2g/L/h.

III\ La digestion des lipides.

A\ Sources.

1\ Groupe 1, lait et dérivés.

Le lait contient 3,9% de lipides (39g/L).

A l'état naturel, les lipides sont sous forme de globules gras, maintenus dispersés et stables, à 37°C et sous l'action émulsifiante des lécithines.

Au froid, les globules montent à la surface et forment la crème.

Les fromages ont un taux moyen de lipides de 25%, mais ces lipides sont exprimés par rapport à l'extrait sec.

2\ Groupe 2, viandes, poissons et œufs.

Les viandes rouges possèdent 20% de lipides, le porc 25%, l'agneau 24%, le mouton 19%, le veau 10%, le cheval 2% et la charcuterie 30 à 40%.

Les volailles maigres (poulets, pintades) et les lapins (cuniculture) possèdent environ 10% de lipides. Les volailles grasses comme les canards 18%, les oies 33% et les dindes 22%.

Les poissons ont en moyenne 7% de lipides.

Les poissons maigres montrent moins de 5% de lipides (limande, sole), les demis gras ont entre 5 et 10% (sardine, saumon) et les gras (anguille, thon) ont plus de 10% de lipides.

Les œufs comprennent environ 11% se répartissant e, 0,2% dans le blanc et 92% dans le jaune.

3\ Groupe 3, corps gras.

Dans ce groupe, on va trouver les graisses animales (lard, saindoux) et les lipides végétaux (huile d'olive, d'arachide) qui comprennent 100% de lipides.

Le beurre ne contient que 83% de lipides et la crème autour de 30%.

On attribue aux lipides, le goût différentiel des viandes (en fonction des concentrations, et de la nature des lipides).

4\ Groupe 4, céréales et dérivés - produits sucrés.

On trouve très peu de lipides dans ce groupe. Par exemple, le grain de blé contient 1,5% de lipides et le cacao est l'exception de ce groupe, avec 29% de lipides.

5\ Groupe 5, Plantes potagères (ou « légumes ») et Fruits.

Ce groupe montre aussi très peu de lipides avec en général moins de 1% de lipides.

On trouve cependant une exception : les oléagineux. Ces plantes montrent un taux très importants de lipides : 50 à 60%.

Les châtaignes ont seulement 2,6% de lipides.

6\ Groupe 6, les boissons.

Le taux moyen de lipides est de 0% dans ce groupe.

B\ Besoins.

L'AET en lipides est compris entre 30 et 35%.

Les lipides de constitution sont retrouvés dans les viandes.

C\ La digestion (des triglycérides).

Les acides gras sont généralement des C16, C18 ou C20.

Parmi les lipides, on trouve les triglycérides, le cholestérol, les vitamines liposolubles (A : vision de nuit par le carotène ; D : ossification ; E : impliquée dans le vieillissement mais aussi la gestation ; K : impliquée dans la coagulation).

La digestion des lipides met en jeu la salive. Il existe une lipase linguale, sécrétée par la face dorsale de la langue, par les glandes d'Ebnér. C'est une enzyme peu importante chez l'Homme, mais importante chez le rat, la souris.

Dans l'estomac, il y a des effets chimiques par l'HCl ainsi que l'action de la chaleur et du péristaltisme. Les lipides vont ainsi commencer à s'émulsionner.

Dans le suc gastrique, on cite l'existence d'une lipase gastrique « pré duodénale ».

→ Finalement, on obtient l'hydrolyse des triglycérides qui aboutit à la formation d'acides gras à chaîne courte et d'acides gras insaturés à chaîne longue. Au final, on obtient des acides gras libres et des 1,2diglycérides.

Dans la période néonatale, l'activité de la lipase pancréatique est faible ; les lipides du lait doivent être digérés ; 30% des triglycérides ingérés du lait seraient digérés dès l'estomac ; dans les triglycérides du lait, on retrouve beaucoup d'acides gras à chaînes courtes et moyennement hydrophiles qui sont absorbés par voie sanguine directe, par la muqueuse gastrique, comme l'alcool.

Le duodénum (longueur, 50 cm).

Dans les phases prandiales, la vésicule biliaire se contracte et fait passer la bile dans le duodénum, par le canal cholédoque. La bile (sans enzyme) contient des acides et des sels (Na) biliaires.

On va trouver l'acide glycocholique, l'acide taurocholique, l'acide désoxycholique l'acide lithocholique et l'acide chénodésoxycholique.

Les sels biliaires ont un rôle majeur.

Grâce à l'émulsion des graisses dès le duodénum. Ils ont des propriétés leur faisant diminuer la tension superficielle.

Leur action est indispensable :

- pour que les lipides se transforment en globules de 0,5 à 1 μ m de diamètre (indispensable à l'action de la lipase pancréatique),
- pour l'absorption des vitamines liposolubles,
- pour la digestion des autres aliments car si les lipides ne sont pas digérés, ils entourent les aliments, ce qui empêche les enzymes d'agir. Il y aurait dans ce cas une prolifération de bactéries intestinales avec un phénomène de putréfaction et un surplus de gaz (aussi appelé, météorisation).

La lipase pancréatique.

Cette lipase a un rôle majeur et déterminant car elle agit à l'interface huile/eau des gouttelettes lipidiques finement émulsifiées.

La co-lipase. C'est une protéine qui est sécrétée en pro-enzyme. Elle est présente dans le suc pancréatique et a une action synergique à la lipase.

La phospholipase, également sécrétée en pro-enzyme, va former des phospholipides.

Ces deux enzymes passent du stade pro-enzyme au stade enzyme par coupure d'un pentapeptide, ce qui les active.

La lipase pancréatique agit en surface, sur les globules émulsionnés, en libérant un mélange de diglycérides, de monoglycérides, de glycérol libre et des acides gras libres. Dans ce processus, les sels biliaires interviennent en plus en favorisant la formation de particules hydrosolubles (les micelles).

La structure des micelles est analogue à celle de l'émulsion lipidique mais plus petite. Les groupements non polaires (acides gras, monoglycérides et sels biliaires) sont orientés vers le centre. Les groupements polaires, hydrophiles, sont en surface.

Les micelles ont un diamètre de 3 à 100nm. Il s'agit de quelques milliers de molécules (solution claire).

La solution lipidique a des particules de diamètre de 0,5 à 10µm qui forment une solution sombre.

Après la digestion intraluminale des lipides, il y a au contact de la membrane des entérocytes, trois fractions différentes :

- gouttelettes d'émulsion lipidiques insolubles,
- micelles solubles,
- molécules libres (acides gras, monoglycérides, glycérol et stérols).

D\ L'absorption.

L'absorption des lipides est complexe. Les micelles sont au contact de la membrane apicale des entérocytes, dans le feutrage de glycoprotéines. Les acides gras libres surtout, et les monoglycérides, passent dans l'entérocyte par diffusion passive.

Les micelles libèrent leurs composés pour en accepter d'autres, au fur et à mesure de l'action de la lipase pancréatique.

Dans l'entérocyte, les acides gras libres sont activés en AcylCoA. Ils se combinent ensuite à des monoglycérides et reconstituent des triglycérides, lesquels s'unissent à des protéines et forment de fines gouttelettes : les chilomicrons, de diamètre compris entre 0,1 et 0,5µm. Ces chilomicrons sont le mélange de lipoprotéines, de triglycérides, de cholestérol et de vitamines liposolubles.

Les chilomicrons sont expulsés de l'entérocyte au pôle basal par exocytose. Ils passent ensuite dans les vaisseaux chylifères. Ils ne peuvent pas passer par les capillaires sanguins car ils sont recouverts d'un réseau de polysaccharides qui s'y oppose ; mais aussi, le diamètre est trop faible pour pouvoir les accepter. Le glycérol et les acides gras à courte chaîne (inférieur aux C12) sont absorbés par voie sanguine (voie portale).

Le cholestérol non estérifié prend la même voie que les acides gras libres, ré-estérifiés dans les entérocytes.

IV\ Protéines et digestion.

A\ Les sources.

1\ Groupe 1, lait et dérivés.

Ce groupe montre une richesse en protéines. Le lait alimentaire (lait de vache) montre un taux moyen de 3,5% de protéines.

On trouve des variations selon l'animal mais aussi selon des variations naturelles : alimentation, saison, cycle de lactation.

Les protéines du lait sont représentées par les caséines (α, β, γ et K). Les caséines sont soumises à l'action de la présure, extraite de la caillotte de jeunes veaux. Fonctionnement avec du Ca²⁺, un pH acide et une température proche de 40°C. Cette présure va attaquer la caséine K

et former un précipité qui évoluera en caillé. Ce dernier donne le fromage par expulsion de lactosérum (mécanisme de synergie). On trouve le même processus dans la coagulation naturelle du sang.

Le sérum est un ensemble plasma - fibrinogène.

En plus, on trouve de la lactalbumine et de la lactoglobuline. Le caillé est un concentré de lipides et de protéines. Le lactosérum contient les produits hydrosolubles.

2\ Groupe 2, viandes, poissons et œufs.

Les viandes comprennent environ 18% de protéines. La charcuterie, 25 à 26% ; les volailles et lapins, environ 20% ; les poissons entre 18 et 22% ; les œufs, 13% dont 11% dans le blanc et 16% dans le jaune.

3\ Groupe 3, corps gras.

On ne trouve pas de protéines dans ce groupe.

4\ Groupe 4, céréales et dérivés - produits sucrés.

Pour les céréales et dérivés, on retrouve 10 à 11% de protéines sans les grains de blé, riz, maïs...

Les produits sucrés, comme le cacao, contiennent 21% de protéines.

5\ Groupe 5, Plantes potagères (ou « légumes ») et Fruits.

Les plantes potagères :

- légumes et tubercules : 1 à 2%
- graines de légumineuses : 18 à 24% en moyenne (soja, 35%)

Champignons : 2,4%

Fruits :

- frais (aqueux) : moins de 1% de protéines
- graines d'oléagineux : entre 14 et 21% de protéines
- fruits amylacés, environ 4%

6\ Groupe 6, les boissons.

Pas de protéines.

B\ Les besoins.

Les besoins en protéines ont des particularités. Les protéines ont un aspect « plastique » ou « constitutionnel ». Le corps possède des protéines à renouveler, par exemple :

- les protéines des muqueuses,
- les protéines musculaires,

- les hormones (très nombreuses),
- les enzymes,
- les anticorps.

Il y a aussi les pertes minimales d'azote (qui sont obligatoires). Pour un homme adulte, il y a perte de 54mg d'azote par jour et par kilo de poids. Les pertes sont représentées par les urines, les matières fécales, la sueur, les menstruations (chez la femme) et par les cheveux et ongles (les phanères).

Les protéines peuvent être apportées selon deux sources (animales ou végétales). Les protéines animales sont les meilleures à cause du problème des acides aminés indispensables. Elles devraient représenter $\frac{1}{2}$ à $\frac{2}{3}$ des protéines alimentaires.

De nombreux travaux ont été faits pour optimiser les protéines et l'alimentation. Trois facteurs ressortent :

- la quantité protéique, 12 à 14% de l'AET ;
- le taux de digestibilité protéique, qui s'étudie par de multiples facteurs ;
- l'aspect de qualité protéique, tenant compte de la composition en acides aminés essentiels pouvant être absorbés et donc, utilisés par l'organisme.

Ces trois facteurs ont donné lieu à l'expérimentation ancienne de « nutrition » qui a permis de classer les protéines végétales.

On va s'intéresser à trois « phénomènes » : l'azote ingéré (Ni), l'azote urinaire (Nu), l'azote fécal (Nf).

Le dosage de l'azote est très sûr et comporte deux étapes : la minéralisation sulfurique (une masse organique est soumise pendant 24 heures à l'action de H_2SO_4 [pur] à $900^\circ C$) qui permet de mettre toutes les formes d'azote en la forme $(NH_4)_2SO_4$; le dosage par la méthode de Kjeldahl. $[P] = [N] \times 6,25$.

On peut faire ces mesures sur l'Homme, les animaux, en utilisant des « cages à métabolisme ».

$$Ni - Nf = N_{\text{observé}}$$

$$Ni (\text{ingesta}) - (Nu + Nf) (\text{excreta}) = N_{\text{retenu}}$$

Le Coefficient d'Efficacité Protéique (CEP).

$$CEP = \Delta P \text{ (g ou kg)} / N$$

Le Coefficient d'Utilisation Digestive (CUD).

$$CUD = [(Ni - Nf) / Nf] - [N_{\text{absorbé}} / N_{\text{ingéré}}]$$

La Valeur Biologique (VB).

$$VB = [Ni - (Ni + Nf)] / [Ni - Nf] = N_{\text{retenu}} / N_{\text{absorbé}}$$

L'Utilisation Protéique Nette.

$$UPN = N_{\text{retenu}} / N_{\text{ingéré}}$$

La plupart des protéines alimentaires contiennent environ 16% d'azote.

Les besoins protéiques moyens.

Ce besoin moyen est de l'ordre de 1 gramme de protéine par kilogramme par jour (chez un adulte). Cette valeur passe à 6 grammes par kilogramme et par 24 heures pour une femme enceinte et à 16 gramme pour une femme allaitante.

On retrouve 9 acides aminés essentiels ; ils doivent absolument être apportés en même temps et en quantité optimale.

Pour le classement des protéines, on utilise divers facteurs nutritionnels et si l'on prend l'UPN, chez les rats, on obtient le classement suivant :

- œufs 94%
- lait de vache 82%
- poisson 80%
- riz en grain 70% après cuisson
- soja 61% après cuisson
- blé 40% après cuisson.

Le facteur limitant en protéines est l'acide aminé essentiel de la protéine par rapport à celle de l'œuf.

La référence aux préférences de l'œuf est remplacée par des données de la FAOMS en mg d'acides aminés essentiels par gramme de protéine.

Comme facteur limitant, on trouve la zéine : lysine + tryptophane. Dans les céréales, c'est la lysine qui est limitante.

Les protéines végétales sont d'un coût inférieur aux protéines animales. De plus, on peut suppléer ces protéines végétales, soit en ajoutant les acides aminés manquant, soit en pratiquant des mélanges de diverses sources végétales.

Insérer document

Quelques exemples empiriques :

- En Chine, il y a le mélange riz + soja
- En Amérique du Sud, mélange maïs + haricots rouges
- En Afrique du Nord, mélange semoule + pois chiche ou bien semoule + lait caillé.
- En Inde, mélange, riz + lentilles
- En France, mélange flocon de céréales + lait du yaourt ou bien, pain + fromage, ou bien, riz + fromage, ou lait + patates (mais pauvres en leucine).

C\ Digestion.

1\ La bouche.

Au niveau de la bouche, la mastication permet un début de clivage dans les aliments.

2\ L'estomac.

Dans l'estomac, la présence d'HCl va entraîner la dénaturation (chimique) partielle de protéines. Grâce à l'HCl, le pepsinogène va former la pepsine par hydrolyse d'un peptide. On trouve des endopeptidases à pH optimum de 1,6 à 2,4 et de poids moyen de 35 000Da.

L'hydrolyse est préférentielle entre les acides aminés aromatiques (tryptophane, phénylalanine, tyrosine) et les acides dicarboxyliques (glu). Celle-ci s'en gage par le NH₂.

On voit également que le pouvoir de digestion est contenu dans les sécrétions pancréatiques. En effet, on supporte une ablation de l'estomac, bien qu'il faille des prises alimentaires fragmentées et que l'on observe l'absence de sécrétion du facteur intrinsèque, indispensable pour l'absorption de vitamine B12 dans l'iléon. Cette absence de sécrétion est appelée anémie de Biermer ou anémie pernicieuse. Il y a donc apport supplétif obligatoire.

- La présure ou « rénine » ou « chymosine ».

Cette enzyme est présente seulement chez les nourrissons. Elle attaque les caséines en présence de Ca^{2+} . Elle est absente chez l'adulte où là, il y aura action de la pepsine. On trouve de la présure car le nourrisson a un estomac peu acide.

3\ Le duodénum.

Le duodénum est le lieu majeur de l'hydrolyse des protéines grâce au déversement du suc pancréatique (nombreuses protéases et peptidases) avec deux points communs :

- sécrétion sous forme de précurseurs inactifs (grains de zymogène),
- pH optimum de 7 à 8 ; le pH est remonté par les ions HCO_3^- de la bile et du suc pancréatique.

Les Endopeptidases.

Il y a également sécrétion d'endopeptidases. Par exemple, l'entérokinase duodénale (émise par certaines cellules du duodénum) va cliver le trypsinogène en trypsine (T) plus un heptapeptide. La trypsine est activée par des ions Ca^{2+} et va hydrolyser préférentiellement des liaisons peptidiques proches des acides aminés basiques, engagés par leur COOH .

Il existe également des facteurs dits « anti-trypsiques », contenus dans certains aliments : le blanc d'œuf qui donne une glycoprotéine ou ovomucoïde ainsi que légumineuses (de la plus faible inhibition provoquée à la plus forte inhibition provoquée) haricot cru, soja, lentilles, petits pois.

Le chymotrypsinogène est clivé en chymotrypsine par l'action de la trypsine. La chymotrypsine va préférentiellement cliver les acides aminés aromatiques, engagés par leur COOH .

La proélastase est clivée en élastase par la trypsine. Elle va hydrolyser des petits acides aminés (glycine, alanine).

La collagénase : elle hydrolyse quelques liaisons peptidiques du collagène.

Il faut noter que l'on trouve un système d'autorégulation de la trypsine selon la prise alimentaire et la quantité de protéines.

Les Exopeptidases.

On trouve la procarboxypeptidase qui est activée en carboxypeptidase sous l'action de la trypsine. Elle va hydrolyser la liaison peptidique côté COOH et libérer un acide aminé à la fois.

On peut également trouver des ribonucléases pour l'ARN et des désoxyribonucléases pour l'ADN.

Le suc intestinal.

Ce suc est sécrété par les glandes de Bruner et de Lieberkühn. On retrouve dedans, des aminopeptidases qui hydrolysent des liaisons peptidiques où sont engagés les acides aminés à NH_2

terminal ; mais aussi des tri-oligopeptides et oligopeptides qui vont former des acides aminés libres.

D\ L'absorption.

Il y a similitude d'absorption par les entérocytes du glucose et des acides aminés.

La concentration en acides aminés dans l'entérocyte est plus forte que dans la lumière intestinale. On retrouve le même schéma d'absorption que le glucose.

On admettra qu'il existe plusieurs types de transporteurs dépendant du Na⁺ et spécifiques (neutres, basiques, dicarboxyliques) ou de tel ou tel acide aminé (exemple : phénylalanine, leucine, lysine).

Quelques protéines peuvent être absorbées par les entérocytes sans transformation majeure. C'est le cas classique des Anticorps du lait maternel qui vont faire bénéficier l'enfant de la protection immunologique de la mère.

Chez l'adulte, il peut y avoir absorption de di ou tripeptides par des transporteurs.

Dans tous les cas, les molécules en question seront absorbées par voie sanguine, donc portale.

V\ Mammifères, oiseaux et digestion.

A\ Présentation.

Il y a beaucoup de données, essentiellement pour deux types d'animaux :

- Animaux à intérêt zootechnique
- Animaux de compagnie (en général monogastriques).

Parmi les herbivores, on retrouve le cheval et les lapins ; parmi les omnivores, on a les porcs et les volatiles chez les granivores.

Parmi les animaux de laboratoire, on cite : la souris, le rat, le chien, le cobaye, le lapin, le singe.

Il y a ressemblance du TD de l'Homme avec celui du rat mais surtout du porc. La peau et les yeux humains ressemblent à ceux des lapins et cobayes. Notre système nerveux est comparable à celui des singes.

Les travaux de toxicologie sont principalement réalisés sur des rats, singes et rats.

B\ Anatomie.

1\ Bouche et dents.

a\ Le cheval.

La formule dentaire du cheval est connue. Les lèvres sont mobiles. Les chevaux peuvent pâturer l'herbe plus rase que les bovins.

b\ Les porcs.

Ces animaux ont une dentition d'omnivore. Il possède un groin qui leur permet de fouir.

2\ L'estomac.

a\ Le cheval.

L'estomac est en cornemuse, dans la partie droite de l'abdomen. Sa taille réduite (15 à 18 litres). La muqueuse interne a deux aspects :

- cul-de-sac à gauche où arrivent les aliments sont dans la partie blanche et plissée (sans glande digestive)
- cul-de-sac à droite : la muqueuse est rose et violacée, avec des glandes gastriques. Le cardia est très serré et interdit tout retour en arrière des aliments (vomissement impossible). Le pylore est largement ouvert. Les aliments restent peu de temps dans l'estomac qui va se vider dès qu'il se remplit. Il n'a qu'une capacité d'un volume.

b\ Les oiseaux.

Ils ont un estomac avec trois poches :

- Le jabot : simple réservoir où ramollissent les graines ; pas de glandes digestives.
- Le ventricule succenturié : élargissement du tube digestif, peu développé, la muqueuse interne a des glandes gastriques. Les aliments ne font que passer mais s'imprègnent de sucs gastriques.
- Le gésier : on y trouve une membrane coriace, entourée de muscles puissants où les aliments comme les graines vont être broyés. Le broyage est favorisé par les graviers ingérés avec les graines par les oiseaux.

3\ L'intestin.

a\ L'intestin grêle.

Le développement de l'intestin grêle dépend de l'alimentation de l'espèce. Court et gros calibre chez les carnivores ; étroit et long chez les herbivores.

En moyenne, deux fois plus long chez le bœuf que chez le cheval ; mais l'intestin grêle de cheval a un diamètre deux fois plus gros. C'est la surface d'absorption qui compte.

b\ Le gros intestin.

Le développement de cette partie de l'intestin est en rapport avec le régime alimentaire : court chez les carnivores et long et compliqué chez les herbivores. Le cheval a un développement exceptionnel de 130 à 140 litres !!! Les $\frac{3}{4}$ de sa capacité digestive. En comparaison, le bœuf n'a une capacité digestive que de 40 litres.

Cet intestin est divisé en trois parties :

- le caecum : poche en cul-de-sac, bosselé chez le cheval, lisse chez le bœuf ;
- le colon : partie la plus longue ; celle du cheval est spéciale : elle fait 3 mètres de long, 80 centimètres de diamètre et divisée en deux parties (colon repli et colon flottant dont le dernier qui est beaucoup plus petit) ; Remarque : chez l'Homme, le colon est ascendant, transverse, descendant, et sigmoïde ;

- le rectum : c'est la partie terminale, reliée à l'anus. Remarque : chez les oiseaux, la différence avec l'intestin grêle n'existe pas.

Chez la poule, on a deux caecums de 8 centimètres débouchant dans la partie terminale de l'intestin, débouchant dans le cloaque.

On va distinguer les ruminants qui ont une digestion stomacale et les non ruminants qui ont une digestion intestinale et qui peuvent avoir des pathologies d'ordre cholique et des colites.

C\ Quelques éléments de physiologie.

1\ Le cheval.

La mastication du cheval est plus complète que chez les ruminants et les carnivores car il ne fait pas de rumination.

La sécrétion salivaire est intermittente (se fait lors des repas) et représente 5 à 50 litres par jour. Cette sécrétion est fonction de la richesse en eau des aliments.

Le brassage stomacal est insignifiant : en effet l'estomac se vide 2 ou 3 fois durant un repas. On va trouver un brassage intestinal prolongé, surtout au niveau des caecums.

Au niveau des rations, on va trouver un fractionnement de l'alimentation en 8 repas journaliers. Les aliments sont concentrés ne sont à donner qu'après le fourrage.

2\ Le porc.

La mastication est intermédiaire entre celle des carnivores et celle des herbivores. Le porc a une salivation moyenne de l'ordre de 15 litres par jour.

3\ La volaille.

On a un ramollissement des aliments dans le jabot qui est dépourvu de glandes salivaires. L'hydratation se fait par l'eau de boisson qui humidifie les aliments. LA salivation est insignifiante : 10 à 15mL/jour.

Le broyage a lieu après le ventricule succenturié et le malaxage se fait dans le gésier, avec l'aide de petits graviers.

VI\ Symbiose et digestion.

(Ou apports symbiotiques des aliments).

A\ Introduction.

Le tube digestif des eucaryotes abrite des microorganismes participant plus ou moins, par leurs activités métaboliques, à la fourniture de nutriments directement utilisables (par les cellules hôtes). On peut citer des symbiotes intracellulaires et coelomiques.

B\ Les symbiotes du tube digestif.

1\ Les symbiotes intracellulaires.

On trouve diverses espèces d'invertébrés allant des coelentérés aux mollusques. Ces animaux peuvent héberger dans certaines cellules, des algues vertes (des zoochlorelles) ou brunes (des zooxanthelles). A la lumière, les algues vont synthétiser des sucres simples mis à la disposition de l'hôte.

2\ Les symbiotes coelomiques.

On trouve par exemple certains invertébrés vivant près des cassures tectoniques.

Les bactéries impliquées sont capables d'utiliser un certain type d'énergie, fournie par l'oxydation du H_2S et des sulfates qui abondent dans les sources d'eaux chaudes et au niveau de ces cassures

Par exemple, on peut citer un pogonophore (*Riftia pachyphila*) qui peut mesurer jusqu'à un mètre. Sa cavité coelomique est largement occupée par de grandes poches appelées des trophosomes qui sont remplies de bactéries, qui, dans ce milieu, synthétisent de l'ATP et fixent du CO_2 .

a\ Digestion de la cire d'abeilles (cire de nids).

Cette cire est essentiellement composée de lipides. Des oiseaux se nourrissant de cette cire vont posséder des microorganismes dans leur intestin (bactéries comme *Micrococcus cerolipicus* et des levures comme *Candida albicans*).

b\ Digestion de la cellulose.

La cellulose est le polysaccharide de structure majeur de la paroi végétale, l'alimentation de base des herbivores et des xylophages.

On trouvera principalement des microorganismes anaérobies qui digèrent la cellulose et qui fournissent ainsi des acides venant du métabolisme oxydatif anaérobie du glucose, ainsi que du CO_2 et du méthane.

Beaucoup d'invertébrés se nourrissent de cellulose par le biais de microorganismes symbiotiques. On trouve dans ce cas les termites inférieurs qui sont xylophages et qui peuvent compter jusqu'à 45 espèces de flagellés symbiotiques (les termites supérieurs sont herbivores). La vie de ces animaux est OBLIGATOIREMENT symbiotique.

Chez les vertébrés, on va trouver des bactéries et des protozoaires symbiotiques qui peuvent attaquer la cellulose par action de la cellulase (enzyme). Ceci est optimisé chez les herbivores et particulièrement les ruminants. On note aussi la présence d'un système différent, qui consiste à recycler les fécès : la coprophagie.

L'ingestion de fécès est importante pour de nombreuses espèces, cela allant des poissons jusqu'aux mammifères.

L'auto coprophagie existe est assez rare. Dans la plupart des cas, les animaux mangent les fécès d'autres espèces. Il y a ainsi apports de nutriments particuliers.

Par exemple, les chiens, chats et chevaux ont un régime alimentaire déséquilibré. En général, les herbivores mangent les fécès des carnivores. Les espèces auto coprophages sont par

exemple les rongeurs : castor, écureuil, chinchilla, lapin ainsi que certains lémuriens comme l'opossum et le koala.

La digestion de la cellulose a lieu dans l'intestin. Il y a ré ingestion immédiate des fécès particulièrement appelés caecotrophes (fécès ayant la même composition que le bol alimentaire mais avec des microorganismes qui sont expulsés et qui les différencient des autres fécès) Ces fécès sont également riches en eau et avalés sans mastication, puis, stockés dans une poche antérieure de l'estomac, non acide.

Ici, l'action des microorganismes continue jusqu'à une nette amélioration du rendement de la cellulose plus des gains en composés azotés et en nutriments essentiels, procurés par les microorganismes qui sont eux-mêmes digérés.

Insérer schéma de l'estomac.

C\ Les ruminants.

Mérycisme est un synonyme de rumination.

L'estomac des ruminants forme deux compartiments principaux, séparés par des constriction transversales. L'estomac antérieur va former les chambres d'origine oesophagiennes alors que l'estomac postérieur, glandulaire, est comparable à un estomac classique de mammifères.

a\ Rumen ou Panse.

Cette poche est la plus volumineuse. Elle représente 80% du volume stomacal (250 litres chez la vache).

b\ Réticulum ou Bonnet (ou réseau également).

C'est la poche la plus antérieure et la plus petite. Elle représente environ 5% du volume gastrique (15 litres chez la vache).

c\ Omasum ou Feuillet.

C'est la troisième poche représentant autour de 8% du volume total (20 litres chez la vache).

d\ L'Abomasum ou Caillette.

C'est cette partie qui représente l'estomac classique des mammifères. Il fait environ 8% du volume total. Il assure la sécrétion de HCl et de pepsinogène.

La panse et le bonnet renferment une culture de microorganismes anaérobies avec de nombreuses bactéries et des champignons inférieurs et des protozoaires ciliés appartenant à deux familles (Isotrichidae et Orphyoscolidae). On a entre 10^5 et 10^{10} individus par mL de ce « bouillon de culture ».

Le métabolisme de cette flore donne des acides gras volatils mais aussi du méthane et du CO_2 en proportions variables selon le type de nourriture ingérée et le type de microorganismes dominants. L'essentiel du méthane et du CO_2 est éliminé par éructation, ce qui est indispensable la rumination.

La grande partie des acides gras volatils est absorbée au niveau des trois 1^{ères} poches. Le pH est à peu près neutre. On trouve une grande production salivaire, continue, estimée à 200 litres par jour pour la vache.

Le reste passe dans la caillette avec une attaque des protéines, puis passe dans l'intestin avec un système de digestion proche des autres mammifères.

La rumination a été très étudiée, et surtout les systèmes réflexes qui la commandent.

Chez la vache, 2 à 4 kg de microorganisme sont digérés par l'hôte, ce qui lui apporte une grande quantité de produits azotés. Une part des l'azote est recyclée car la vache récupère sous forme d'urée une bonne partie des groupements NH_2 venant de son métabolisme protéique.

Il y a récupération d'ammoniac venant de l'activité bactérienne et ainsi, les ruminants assurent une certaine balance azotée alors que leur régime alimentaire en est pauvre.

La température centrale de ces animaux est environ supérieure de 1 à 2°C par rapport à l'Homme. La rumination prend entre 4 et 10 heures par jour. La glycémie est de l'ordre de 0,6g/L.

WWW.BIODEUG.COM