

La Prise Alimentaire et la Digestion

Introduction :

Pourquoi avons-nous besoin de manger ?

(**Fig 1**) Pour le besoin énergétique, pour produire de l'ATP. Le métabolisme consomme de l'ATP :

- Métabolisme de base (55 à 70% du métabolisme) : maintien des fonctions vitales minimales.
- Travail musculaire et activité (variable) : Travail (2500 kcal/J) 40% de perte sous forme de chaleur
- Digestion et alimentation (10%) : pertes liées à la digestion
- Autres : croissance, reproduction (allaitements (700 kcal/J), grossesse)

I) Choix de la nourriture et prises alimentaires

Les structures permettant la prise alimentaire vont conditionner le type de nourriture de l'organisme. Les régimes alimentaires peuvent être plus ou moins spécialisés selon l'espèce considérée, cette spécialisation résulte de processus de coévolution/compétition entre les espèces.

Il y a différents types de prises alimentaires :

A) La microphagie

(**Fig 2**) Le fait d'ingérer les particules dispersées dans le milieu qui sont nombreuses, mais proportionnellement petites par rapport à la taille de l'organisme. Corresponds aux organismes filtreurs (absorbe de l'eau de mer pour retenir de petites particules). Ex : éponges, moules, lophophorates, les baleines, requins-pêlerins...

B) Nourritures liquides

L'alimentation liquide correspond à des régimes alimentaires très spécifiques :

- Régimes hématophages (le fait de se nourrir de sang),
- Nectar des fleurs, des sèves des arbres.

Ex : Les araignées quand elles capturent un insecte elles vont injecter des enzymes digestives dans le cocon : c'est une digestion externe qui va liquéfier la proie pour la réabsorber ensuite.

C) La macrophagie

(**Fig 3**) Ingestion d'aliment de grande taille proportionnellement à l'organisme, ce sont des aliments qui vont être sélectionnés dans le milieu, alimentation plus fragmentée dans le temps. Les éléments ingérés sont plus durs et implique des structures buccales (exemple de la radula de certains mollusques).

D) Autres

Absorption de substances organiques dissoute (on laisse entrer dans le corps des substances organiques) => osmotrophie avec l'exemple du ténia.

Ou hébergé des organismes autotrophes (photosynthétiques ou oxydant les sulfures...)

E) La nutrition

Question du choix de la nourriture. Comment un animal fait-il pour s'alimenter correctement ?

Le choix de la nourriture est déterminé par les organes sensoriels et par apprentissage qui est conditionné/renforcé par le système de la récompense.

Comportement particulier chez certains animaux : le caribou a les bois qui sont produits chaque année et ces bois c'est de l'os (phosphate de calcium) et les prairies en hautes altitudes sont très pauvre en phosphores/phosphates et pour combler ce manque de phosphates ont appris à manger les os qui trouvent, lécher des pierres => comportement qui apporte les nutriments essentiels de l'organisme.

- Il y a des nutriments essentiels, car ils ne peuvent pas être fabriqués par l'organisme.

Pour l'Homme les **8 acides aminés (aa) essentiels** : à partir de ces 8 on peut fabriquer les autres. Selon le type d'aliment consommé, il y aura certains types de aa (intérêt de la variation de repas).

Conséquence de lacune en aa : le kwashiorkor : petit avec un ventre très gonflé, mais très maigre → absence de protéines dans le sang permettant de drainer l'eau par osmose → forme des œdèmes.

Les **acides gras essentiels** (ceux qu'on ne peut pas fabriquer) sont les acides gras insaturés ou polyinsaturés : on les trouve dans les huiles végétales (omega 3).

Les **vitamines** : molécules organiques nécessaires en très faible quantité (microgramme ou quelques milligrammes/jours). On est rarement en surdose et elles ne sont pas toxiques.

Il y en a 13 chez l'Homme qui sont regroupés en 2 catégories :

- Les vitamines hydrosolubles (B et C)
- Les liposolubles (A, D, E et K)

Chez l'Homme, 3 vitamines sont synthétisées par des bactéries intestinales (microbiote) : les vitamines K, B8 et B12. La vitamine D peut aussi être synthétisée par un précurseur au niveau de la peau avec l'exposition au soleil.

Les déficits en vitamines : le scorbut : carence en vitamines C (cas chez les navigateurs) : jusqu'à 2M de mort. La vitamine C est essentielle et elle est très sensible aux UV donc si on prend des jus de fruit privilégier ceux qui sont à l'absence de la lumière (dans les briques ou bouteilles vertes).

Les **minéraux ou oligoéléments** : nutriments inorganiques requis en petite quantité (1 à 2500 mg/jours) en évitant les surdoses qui peuvent être toxiques. On a le calcium, phosphore, fer magnésium, iodé...

Ces oligoéléments comme le fer et le phosphore peuvent rentrer dans des cofacteurs enzymatiques notamment dans l'ATP.

Crétinisme est une maladie liée à une carence en iodé et donc en déficits en hormones.

II) Principes généraux de la digestion chez les métazoaires

A) Digestion intracellulaire et tube digestif

Pourquoi après avoir absorbé de la nourriture faut-il la réduire en élément plus petit ?

Pour qu'ils passent par les membranes des cellules (taille de macromolécules) par des transporteurs ou par diffusion.

Digestion = décomposition des aliments en molécules absorbable (implique l'hydrolyse de polymères en monomères).

1) Digestion intracellulaire

(Fig 4) Compartimentation de la digestion : on l'observe chez les organismes unicellulaires ou les particules endocytées/phagocytées vont fusionner avec un lysosome formant un endolysosomes. Système de membrane interne qui va phagocytter => digestion sans dégâts.

2) Cavité gastrovasculaire

(Fig 5) La digestion est extracellulaire dans le cas de la cavité gastrovaculaire : les enzymes sont libérés dans le milieu extérieur : exo-enzymes. La cavité est refermée et présente une ouverture. On la trouve notamment chez les cnidaires (méduses, coraux..).

3) Tube ou tractus digestif

(Fig 6) Existe chez tous les bilatériens : un tube ou tractus digestif avec deux ouvertures : s'il y a deux ouvertures le flux de nourriture dans le tube digestif est unidirectionnel (une entrée une sortie). Deux avantages :

- Délimite des compartiments spécialisés : un compartiment de stockage, un de digestion enzymatique / chimique et un d'absorption.
- Possibilité d'ingérer à nouveau de la nourriture avant la fin de la digestion des aliments précédents.

Grandes caractéristiques du tube digestif : on a quasiment toujours un mucus protecteur produit par des cellules, ils sont entourés de muscles qui permettent de propulser les aliments, les cellules intestinales sont organisées de façon à optimiser les paramètres de la Fick. Enfin les tubes digestifs sont adaptés aux régimes alimentaires.

B) Propulsion des aliments

(Fig 7) Les aliments sont déplacés mécaniquement par le tube digestif soit par des mouvements musculaires volontaires (phénomène de déglutition), mais souvent c'est des mouvements involontaires : mouvement de péristaltisme (*péri = autour, stallein = resserrer*) : il s'agit d'ondes de contraction et de relâchement qui pousse les aliments dans le tube digestif.

Pour contracter ce péristaltisme, il faut des muscles lisses, des sphincters¹ et des plexus nerveux². Il y a autant de neurones dans la moelle épinière que dans le tube digestif (on parle de cerveau des entrailles).

C) La digestion mécanique

Étape suivante : la digestion chimique, cela va homogénéiser les aliments dans le tube digestif. 4 étapes :

- La mastication : fragmentation de la nourriture et mélange avec la salive dans la bouche
- Le pétrissage : dans l'estomac (mélange les aliments dans l'estomac).
- La segmentation : contraction rythmique et locale du gros intestin : contraction rythmique, contraction et relâchement, le but est de mélanger le contenu du tube digestif.

D) Digestion chimique

Processus catabolique³ permettant la dégradation des aliments en unités assimilable. Elle peut être enzymatique ou non enzymatique.

¹ Muscle organisé en anneau qui peuvent se fermer et s'ouvrir.

² Centre nerveux avec des neurones qui innervent les muscles du système digestif

³ Catabolisme : Métabolisme qui comprend les processus de dégradation des composés organiques, avec dégagement d'énergie et élimination des déchets.

- Digestion chimique non enzymatique :
 - Action de l'acide chlorhydrique au niveau de l'estomac
 - Action des sels biliaires (agit comme des détergents et fragmentent des lipides)

- La digestion chimique enzymatique : repose sur l'action des enzymes soit produite par le tube digestif ou par des glandes annexes (exocrine : sécrétion dans le milieu extérieur : ici le tube digestif). Ces enzymes fonctionnent dans des conditions physico-chimiques particulières : à un pH, une température optimale. (**Fig 8**).

E) L'absorption

(**Fig 9**) Passage des produits de la digestion + l'eau, les vitamines, les oligoéléments du tube digestif vers le sang ou la lymphe. Il y a deux grands types de transports :

- Actif : implique une dépense énergétique
- Passif : sans dépense énergétique (diffusion simple à travers les phospholipides ou facilité par des transporteurs membranaires)

F) Régulation des fonctions digestives

Deux systèmes de régulation :

- (**Fig 10**) **Régulation nerveuse** : on parle de réflexe, car c'est involontaire :
 - Réflexes courts : implique uniquement les neurones localisés dans le tube digestif notamment au niveau des plexus nerveux entériques (fonctionne dans la paroi du tube digestif)
 - Réflexes longs : implique le système nerveux central et notamment le système nerveux autonome.

- **Régulation hormonale** : beaucoup d'hormones différentes (on connaît plus d'une trentaine d'hormones qui peuvent influencer la digestion), leurs sécrétions se font au niveau local par des cellules spécialisées : les endocrinocytes gastro-intestinaux (on les trouve au niveau gastrique et intestinale) : elles peuvent directement agir ou passer dans le sang pour aller plus loin.

III) Digestion chez l'Homme

(**Fig 11, 12**) Anatomie du tube digestif et organes annexes : Attention la rate est proche du tube digestif (TD), mais elle n'a pas de rôle digestif. Chez l'Homme on a environ 5 mètres de TD (9 mètres chez le cadavre, car les muscles se détendent). La lumière du tube digestif est considérée comme le milieu extérieur. Attention savoir différentier les 3 structures de l'intestin grêle : duodénum, jéjunum et iléon.

A) Présentation du tube digestif chez l'Homme

(**Fig 13, 14**) La structure est à peu près la même **sur tout le TD** avec 4 couches de l'extérieur vers la lumière :

En anatomie, la lumière (en latin lumen) d'un organe creux désigne l'espace intérieur circonscrit par ses parois.

- La **séreuse** : fonction protectrice : couche mince de cellule et de tissus conjonctifs⁴ qui entoure le TD (couche très fine)
- La **musculeuse** : composé de muscles lisses impliqués dans le péristaltisme et organisé en couche (une longitudinale et une circulaire), entre les deux il y a le plexus⁵ nerveux myentérique : réseau de neurones

⁴Tissus conjonctifs (ou système conjonctif) : tissus qui ont pour fonction de servir de soutien, de protéger les autres tissus corporels et d'assurer l'intendance des tissus fonctionnels comme l'apport des nutriments et élimination des déchets.

⁵ Plexus : réseaux de nerfs ou de vaisseaux

- La **sous-muqueuse** : tissus conjonctifs + plexus nerveux sous muqueux (de Meyer) + vaisseaux lymphatiques et sanguins.
- La **muqueuse**⁶ : couche la plus importante d'un point de vue fonctionnelle : elle comprend une fine épaisseur de muscle (la musculeuse de la muqueuse).

B) Bouche pharynx et l'oesophage

(Fig 15) Au niveau de la bouche, les aliments sont fragmentés par les dents et enrobés de salive. La bouche est limitée en haut par le palais, sur les côtés par les joues et en bas par la langue. Elle est fermée par les lèvres.

- Les premières dents apparaissent vers l'âge de 6 mois, c'est la denture primaire ou « dents de lait ». Les dents permanentes apparaissent et se développent vers 6 ans. Entre 17 et 25 ans, les 32 dents de la dentition définitive sont en place.

(Fig 16) Les dents comportent 3 parties :

- La couronne (partie de la dent visible) constituée de l'email et de la dentine
- Le collet entre la couronne et la racine constituée de dentine (ou ivoire) et de pulpe (irriguée par des vaisseaux sanguins et un nerf).
- La racine : implantée dans l'os de la gencive constituée de cément (fais la liaison entre la dentine et l'os de la gencive), de dentine et de pulpe laissant place à des vaisseaux de nerfs.

(Fig 15) Les dents ont des rôles différents :

Les incisives: attraper et couper les aliments.

Les canines: déchiqueter les aliments.

Les prémolaires: écraser et commencer le broyage.

Les molaires: terminer le broyage avant la déglutition.

- (Fig 17) Pendant la fragmentation des aliments, ils sont enrobés de salive. La salive est produite par trois groupes de glandes salivaires : la **glande sublinguale**, **sous-maxillaire (ou submandibulaire)** et **parotide**. Plusieurs fonctions de la salive :

- Solubiliser les substances chimiques qui vont ainsi pouvoir stimuler les papilles gustatives
- Humecter la bouche (indispensable à l'élocution) : la salive contient un polymère gélatineux qui est la mucine
- Enrober le bol alimentaire (aliment mastiqué) de mucus pour permettre la déglutition.
- La salive a des propriétés antiseptiques avec des immunoglobulines de type A.
- Commencer l'hydrolyse de certains glucides comme l'amidon grâce à l'amylase salivaire.

- L'oesophage et la déglutition :

(Fig 18) La déglutition est volontaire au départ puis involontaire : se déroule en plusieurs étapes. Un des enjeux de la déglutition est de ne pas s'étouffer (la zone sensible c'est la glotte, car c'est la convergence entre voies nasales et digestives).

Pour déglutir la langue, va propulser de façon volontaire à l'arrière de la bouche ce qui va déclencher le réflexe de déglutition (involontaire). À ce moment-là la luette va venir fermer les voies nasales. Ensuite le larynx va remonter et cette remontée du larynx a pour effet de renverser l'épiglotte sur la glotte (ferme la trachée). Le muscle du sphincter oesophagien supérieur se détend (il arrête de se contracter et va ouvrir l'oesophage). Ensuite c'est le péristaltisme qui prend le relais jusqu'au sphincter oesophagien inférieur qui ouvre et ferme l'estomac.

C) L'estomac

⁶ Une muqueuse (du latin *mucus*) est une mince couche de tissu constituée d'un épithélium, et de tissu conjonctif sous-jacent qui se nomme chorion. Les muqueuses tapissent les cavités du corps qui sont en continuité avec la peau. Épithélium et chorion sont séparés par une lame basale.

(Fig 19) Estomac organisé en 4 parties chez l'Homme :

- Le Cardia
- Le Fundus
- Le corps de l'estomac
- Antré pylorique / pylore

Des deux côtés de l'estomac on a un muscle sphincter qui servent à fermer la cage stomachale. L'estomac fait un volume à vide de 50 mL et 4L quand il est plein (les aliments peuvent rester plusieurs heures dans l'estomac). Pour compenser la différence de volume, il y a des plis gastriques. La musculeuse est très développée (grande épaisseur), cette musculeuse développée permet des mouvements de pétrissages.

L'estomac n'est pas l'organe principal de la digestion enzymatique : l'intestin et le pancréas fabriquent la majorité des enzymes.

(Fig 20) Structure de l'épithélium de la muqueuse stomachale : deux structures : les cryptes et les glandes gastriques :

- Dans les cryptes se trouvent des cellules à mucus (épithélium supérieur) : l'estomac est tapissé d'un mucus protecteur
- Dans les glandes gastriques :
 - Cellules à mucus du collet.
 - Cellules pariétales : sécrètent de l'acide chlorhydrique (HCl) et produisent un facteur intrinsèque (permets le transport de la vitamine B).
 - Cellules principales : produit une enzyme : la pepsine, mais elle est sécrétée sous forme de précurseur : le pepsinogène qui est ensuite activé en pepsine.
 - Endocrinocytes gastro-intestinaux (cellule G de l'estomac) : fonction endocrine : production d'Hormone : la gastrine.

Quel rôle pour l'HCl et du pepsinogène produits respectivement par les cellules pariétales et les cellules principales :

HCl a pour fonction :

- Stérilise le contenu de l'estomac (acide).
- Transforme le pepsinogène en pepsine (la pepsine elle-même catalyse la transformation de la pepsinogène en pepsine : plus il y a de pepsine plus il sera facile de faire la réaction : retroactivation positive)
- Dénature les protéines (donc rend les protéines plus accessibles pour les enzymes)
- Change l'état d'ionisation de certains éléments : facilite l'absorption du fer et du calcium.

La pepsine : Enzyme qui s'active à pH acide (intérêt de l'acide chlorotique) : son action est de rompre les liaisons peptidiques entre les aa aromatiques (trp, phe, tyr). Les protéines sont coupées en polypeptides voir en aa seul => cette étape correspond à 15% de la dégradation des protéines.

L'estomac n'est pas spécialisé dans l'absorption des nutriments, mais certains éléments passent quand même :

- Des petites molécules : le glucose et l'alcool (jusqu'à 30%)
- Les acides gras à courte chaîne
- Des électrolytes, de l'eau et certains médicaments (comme aspirine)

• **(Fig 21)** Comment les cellules pariétales produisent-elles de l'HCl ?

Il s'agit d'un mécanisme d'échange d'ion complexe. Les cellules pariétales ont de nombreuses mitochondries qui permettent de nombreux transports actifs (transport consommant de l'ATP produit par la respiration cellulaire). En associant du CO₂ du sang qui combiné à l'eau va donner H₂CO₃ (acide carbonique) qui se dissocie en H⁺ et HCO₃⁻ (ions bicarbonates) qui repart dans le sang => Phénomène impliqué dans la respiration, excréition et augmentation du pH sanguin.

Pour le Cl⁻, il est récupéré dans le milieu intérieur par un transporteur antiport et puis diffusion facilitée pour aller à la lumière de l'estomac. C'est ce Cl⁻ qui fait que le pH de l'estomac est compris entre 1,5 et 3,5.

- Comment les cellules de l'estomac se protègent-elles contre son acidité ? Plusieurs raisons :

- La couche de mucus qui tapisse l'estomac est riche en ions bicarbonates (HCO₃⁻)
- Le meilleur moyen de ne pas subir des dégâts c'est le renouvellement cellulaire rapide grâce aux cellules souches (en 6 jours l'intégralité du tapis cellulaire de l'estomac est renouvelée)
- Caractéristiques cellulaires (jonction serrée) permettant l'imperméabilité membranaire.

- Comment les aliments sont-ils mélangés dans l'estomac ?

(Fig 22) La motilité : couches musculaires assez importantes et cette motilité est assurée par des ondes péristaltiques avec 3 ondes/minuttes, lié à des cellules rythmogènes (dépolarisation spontanée).

- Comment se régule l'activité gastrique ?

(Fig 23) Régulation stomacale se fait en 3 phases (=> Les 3 peuvent se produire en même temps) :

- Phase céphalique : corresponds à une régulation nerveuse uniquement déclenchée par des stimuli externes (exemple : la vue de la nourriture, un stress qui fait perdre l'appétit...). C'est le nerf vague (n°10) qui est le nerf moteur de l'estomac, il libère de l'acétylcholine (neurotransmetteur) qui va avoir pour effet de stimuler la sécrétion et la motilité de l'estomac.
- Phase gastrique : lié à l'arrivée des aliments dans l'estomac avec deux stimulus qui interviennent : l'étirement de l'estomac (sa distension) et puis la diminution de l'acidité ou plutôt la augmentation du pH (ce qu'on mange à un pH neutre). Cette phase peut impliquer des réflexes longs comme le nerf vague, des réflexes court (locaux), mais aussi et surtout la libération de gastrine dans le sang (hormone produite par les cellules G)
- Phase intestinale : Phase globalement inhibitrice qui est déclenchée par des signaux en provenance du duodénum (première partie de l'intestin grêle), ces signaux sont des hormones inhibitrices produites par l'intestin : on a la sécrétine, la cholécystokinine (CCK), le GIP/VIP (vasoactive intestinal peptide).

D) Intestin grêle et structures annexes

- Le carrefour duodénal :

(Fig 24, 25) Après le passage dans l'estomac, les aliments sont réduits en forme de bouillie liquide appelée le chyme qui va sortir de façon très progressive par le sphincter pylorique (pour un repas solide, il faut 3 heures, un repas liquide 20 minutes).

La sortie lente du chyme acide par le sphincter pylorique et son l'acidité (liée à l'estomac) est contrôlée par le suc intestinal qui est riche en ions bicarbonate (HCO₃⁻).

Le duodénum est une zone de convergence de plusieurs liquides que sont : la bile (provenant du foie) et le suc pancréatique (provenant du pancréas). Ces deux liquides débouchent dans le duodénum par un canal commun l'ampoule hépatopancréatique de Vater dont l'ouverture est contrôlée par le sphincter d'Oddi.

L'ensemble de ces liquides contribuent à ramener le pH de chyme acide à des valeurs plus basiques (7 voir 8).

- Foie et vésicule biliaire :

(Fig 26, 27) Le foie est un organe présentant une organisation lobulaire. Il a une irrigation particulière et va en effet recevoir du sang oxygéné provenant du cœur via l'artère hépatique. Mais

en plus de cette artère, il reçoit le sang riche en nutriment issu de la digestion via la veine porte-hépatique. L'ensemble du sang repart par la veine hépatique qui débouche dans la veine cave inférieure du cœur. Cela signifie que toutes les substances qui sont dans le sang issues de la digestion passeront obligatoirement par le foie avant de rejoindre la circulation générale. Le foie est un organe de stockage (cf. chapitre 3 de terminale).

(Fig 28) Les cellules du foie sont les hépatocytes avec un équipement enzymatique très complet (cellule capable de faire beaucoup de transformations chimiques) et permettent au foie d'assurer 4 fonctions principales :

- Production de la Bile (stockée dans la vésicule biliaire)
- Stockage et transformation des nutriments permettant la régulation de la glycémie.
- Production de l'urée par les réactions de désamination (on enlève la fonction amine des protéines) qui sera ensuite filtrée par les reins.
- Fonction de détoxication du sang (capillaires percés (fenestrés) permettant de récupérer des substances chimiques)

(Fig 24, 25) La bile est produite au niveau du foie en permanence et contient notamment des sels biliaires qui sont des dérivés du cholestérol. En dehors des repas, la bile est acheminée et stockée dans la vésicule biliaire via le canal cystique. Sous l'influence du nerf vague et de la CCK (cholécystokinine) cette vésicule biliaire se contracte et expulse alors la bile dans le canal cholédoque qui débouche dans le duodénum.

La bile est impliquée dans la digestion des lipides et c'est aussi une voie d'élimination de certains déchets : notamment les résidus des hèmes (résidu de Fer dans l'hémoglobine).

● Le pancréas :

(Fig 24, 25) Tous les sucs du pancréas se déversent dans l'intestin par le canal principal (de Virsung) principalement, mais aussi par le canal accessoire (de Santorini) accessoirement.

(Fig 29) Le pancréas est composé de petites sphères : un acinus ou des acini pancréatiques : ils ont une fonction exocrine (production vers le milieu extérieur : le tube digestif) en produisant le suc pancréatique. Le suc est produit par des cellules acinaires (exocytoses de vésicules visibles au MET), le suc se trouve ensuite dans des conduits pancréatiques qui débouchent petit à petit vers les canaux pancréatiques principaux ou accessoires.

Le suc pancréatique à une composition variable peut être composé d'eau et d'ions : notamment des ions bicarbonates (HCO_3^-) permettant de faire remonter le pH : tamponner l'acidité du chyme. Cela est sous l'influence de la sécrétine (hormone).

Deuxième forme de sécrétion du pancréas : production d'un suc riche en enzyme : se fait sous l'influence de la CCK (voir **Fig 32**).

Les îlots de Langerhans (autre type de cellule que l'on rencontre dans le foie) ont une fonction endocrine en produisant des hormones : l'insuline et le glucagon (impliquées dans la régulation de la glycémie). Voir CHP 3 terminale.

Quelles sont ces enzymes pancréatiques ?

La plupart des enzymes pancréatiques sont sécrétés sous forme de précurseur inactif. Parmi ces enzymes on trouve des **amylases pancréatiques** (dégrade l'amidon), plusieurs **lipases pancréatiques** (dégrade les lipides), des **protéases (ou peptides ou enzymes protéolytiques) pancréatiques** (dégrade les protéines) et des **nucléoles pancréatiques** qui dégradent l'acide nucléique. Ces enzymes sont activées en présence de certains ions qu'il y a uniquement dans l'intestin.

(Fig 30) Les **enzymes protéolytiques** sont plus dangereuses elles dégradent les protéines et sont activées par les enzymes fixés sur la membrane plasmique des entérocytes (cellule présente dans

la muqueuse de l'intestin grêle) du duodénum. C'est uniquement quand les enzymes arrivent dans l'intestin qu'elles s'activent.

Ces enzymes protéolytiques il y en a 3 :

- Le trypsinogène forme la trypsine grâce à l'entéropeptidase. Puis la trypsine active les autres.
- Le chymotrypsinogène fait la chymotrypsine grâce à la trypsine.
- Le procarboxypeptidase fait le carboxypeptidases grâce à la trypsine.

Les enzymes pancréatiques dégradent tous les nutriments issus de la digestion (glucides, protéines et lipides). Sans pancréas la digestion est impossible, il réalise les 3/4 de la digestion chimique enzymatique.

La digestion chimique enzymatique se termine au niveau du duodénum. L'absorption se termine à la fin de l'intestin grêle au niveau de l'iléon.

● (**Fig 31**) Intestin grêle et ses caractéristiques.

L'intestin grêle présente 3 ordres de plissemens permettant d'augmenter considérablement la surface d'échange (optimise les paramètres de la loi de Fick).

3 ordres de plissement :

- Plis circulaires
- Villosités intestinales
- Microvillosités porté par les cellules intestinales : les entérocytes.

Chaque villosité est bien irriguée par un réseau de capillaire sanguin, mais également par un vaisseau lymphatique (en cul-de-sac) : vaisseaux chylifères.

L'entérocyte :

(**Fig 31**) Chaque entérocyte est relié ou attaché à son voisin par des liaisons cellulaires (jonction serrée, desmosomes et jonction GAP). Cela permet de favoriser l'étanchéité de l'épithélium intestinal et d'éviter la diffusion de substances entre les cellules. Cela renforce aussi la cohésion mécanique entre les cellules de l'épithélium (le tout fixé sur la lame basale).

Autre caractéristique des entérocytes : ce sont des cellules très polarisées par rapport à leurs organites : elles présentent à leurs bases le noyau et un réticulum endoplasmique abondant à la base et au pôle apical des microvillosités lié à un cytosquelette d'actine.

● La régulation du carrefour duodénal :

(**Fig 32**) Régulation du carrefour duodénal : régulation des sécrétions biliaires et pancréatiques :

Régulation principalement hormonale : le nerf vague (nerf crânien n°10) intervient légèrement en favorisant les contractions de la vésicule biliaire. Le reste de la sécrétion est assuré principalement par deux hormones : la CCK et la sécrétine.

- La CCK est sécrétée quand le chyme est très acide (sucre enzymatique riche en enzyme et favorise aussi les contractions de la vésicule biliaire).
- La sécrétine est produite quand le chyme est riche en protéine et gras et elle va agir en favorisant la sécrétion d'un suc riche en ions bicarbonate (HCO_3^-) et stimule la production de bile par le foie.

(**Fig 33**) L'estomac a aussi son rôle de régulation, mais agit comme inhibiteur. Quand l'intestin reçoit le chyme, il signalera à l'estomac de s'arrêter => Production de GIP (peptide inhibiteur gastrique).

La plupart des sécrétions sont déclenchées par la présence du chyme lui-même. Une hormone pas représentée sur le schéma : c'est la somatostatine (produite par l'estomac et l'intestin grêle) sous l'influence du système nerveux sympathique et donc avec une fonction inhibitrice le fonctionnement du tube digestif.

E) Le gros intestin

(Fig 34) Le gros intestin a un diamètre de 7cm et une longueur de 1,5m. La digestion est très limitée, voire absente (elle se termine à l'iléon). C'est la flore intestinale du colon qui va digérer les nutriments restants, mais à son propre bénéfice.

La fonction principale du gros intestin est d'absorber l'eau et donc de déshydrater le chyme (certaines vitamines sont aussi absorbées).

Enfin, le gros intestin va segmenter le chyme pour son évacuation sous forme de fèces. Ce dernier est évacué du corps en passant par le rectum et l'anus qui s'ouvre ou se ferme par deux sphincters (interne et externe).

Il est possible de vivre sans colon en fixant l'iléon directement sur le canal anal.

IV) Digestion chimique et absorption des nutriments

A) Les glucides

(Fig 35) Enzymes qui dégradent les glucides : l'amylase salivaire et l'amylase pancréatique produite par les glandes salivaires et les acinus pancréatiques. La particularité des amylases est qu'elles ne libèrent pas de monomères (comme du glucose), mais libère des disaccharides (molécules constituées de deux sucres : dimère de glucose).

Les enzymes de la bordure en brosse de l'intestin grêle (= membrane organisée en microvillosités des entérocytes) vont dégrader les disaccharides (lactose, du maltose ou du saccharose).

Cette digestion enzymatique des sucres est très rapide et 100% de l'amidon est converti en monosaccharides en 10 minutes au niveau du duodénum.

Au niveau du gros intestin, les glucides qui n'ont pas été digérés le sont par la digestion bactérienne, mais aucune absorption pour l'Homme.

(Fig 36) Passage des monomères glucidiques de la lumière intestinale vers le sang se fait par des transporteurs membranaires :

- SGLT 1 : symport (actif secondaire, car utilise le gradient de Na^+ grâce à la NaK ATPase) qui peut faire passer du sodium et du glucose ou du galactose et du sodium.
- GLUT 5 et GLUT 2 : transport passif : diffusion facilitée par les transporteurs.

B) Cas de la cellulose

(Fig 37) Paradoxe important avec la cellulose : c'est un polymère de glucose avec des liaisons $\beta 1-4$. D'un point de vue potentiel énergétique, il y a beaucoup de glucose dedans : c'est le polymère le plus abondant sur Terre, car elle est présente dans toutes les parois des végétaux.

La cellulase est l'enzyme qui permet de dégrader la cellulose en glucose est très rare. Plusieurs animaux la produisent : l'escargot, le taret, le lépisme.

Chez les herbivores la solution la plus courante est d'héberger des micro-organismes en symbiose qui vont eux posséder la cellulase.

- Cas des termites : elles sont xylophages (se nourrissent de bois). Comment font les termites pour digérer le bois ? Possède une panse rectale qui va abriter une faune de bactéries qui va participer à un complément d'apport azoté et des protozoaires qui possèdent une cellulase. Les termites vont concasser le bois en fragment avec leurs mandibules et puis ces fragments de bois vont être phagocytés par les protozoaires ciliés possédant la cellulase. Les bactéries vont traiter les déchets azotés de ces unicellulaires pour fournir un complément d'azote aux termites.
- **(Fig 38)** Les ruminants présentent un estomac avec plusieurs poches : en réalité seule la 4 ème poche correspond réellement à l'estomac : les premières sont plutôt des extensions de l'œsophage.

Les deux premières poches sont la **panse (ou réseau)** et le **bonnet (ou Rumen)** : elles ont la même fonction, il s'agit d'un grand incubateur/fermenteur contenant les microorganismes permettant de digérer la cellulose (qui possèdent la cellulase). Il s'agit notamment de bactéries ou de protozoaires ciliés. La fermentation réalisée par ces microorganismes dans un milieu anaérobie aboutit à la libération d'acide gras, mais aussi à la production de gaz : comme le CO₂, mais aussi du méthane (190 L/jours) expulsé par éruption (par la bouche).

Qu'est-ce que la rumination en tant que telle ? Les aliments après être passés dans la panse et dans le bonnet vont être renvoyés dans la bouche pour être remastiqués et à nouveau enrobés de salive (la salive contient ici de l'urée : les microorganismes peuvent se servir de l'urée dans cette salive pour proliférer). La salivation qui implique la rumination présente jusqu'à 150L d'eau/jours et elle ne peut pas se permettre de perdre autant d'eau donc la troisième poche : le **feuillet** permet donc de réabsorber l'eau et de compacter le bol alimentaire. Enfin les aliments arrivent dans la **caillette** qui correspond au véritable estomac. Il y a une production d'HCl, mais aussi la production de lysozyme qui permet de dégrader les peptidoglycans des parois bactériennes.

=> La vache ne se nourrit pas vraiment d'herbe : c'est les micro-organismes qui récupèrent du glucose et puis la vache se nourrit des microorganismes eux-mêmes. La vache est presque micropophage.

- (**Fig 39**) Cas de la caecotrophie (lapins et certains rongeurs)? Cas particulier avec injection de crottes particulières : les caecotrophes : crotte molle produite la nuit. Ces caecotrophes sont réintégrées, car elles contiennent des nutriments issus de la digestion bactérienne qui a eu lieu dans le caecum et dans le gros intestin. Pourquoi elles sont réintégrées ? Les produits de la dégradation ne peuvent pas être absorbés dans le gros intestin, l'animal va réintiquer ces crottes pour les refaire passer dans le système pour absorber ce qu'il ne pouvait pas avant.
- (**Fig 40**) De façon générale, les herbivores ont un tube digestif plus long que les carnivores avec notamment le caecum et le gros intestin qui est bien développé. Ce s'explique par le fait que les herbivores ont une digestion plus lente pour digérer les fibres végétales.
Chez le panda on a un herbivore avec un tube digestif de carnivore : le panda qui fait plus de 100kg produit 24 kilos de déjection par jours et doit s'alimenter en quantité.

C) Les protéines

(**Fig 41**) Les protéines ou protides (= polymères d'aa). 3 étapes pour la dégradation complète en aa :

- (1) Action de la pepsine au niveau de l'estomac
- (2) Action des enzymes pancréatiques
- (3) Action des enzymes de la bordure en brosse des entérocytes

=> les protéines sont clivées en aa simples ou dipeptides / tripeptides (deux ou trois aa).

Enzymes importantes présentes sur la membrane des bordures en brosse : la carboxypeptidase et aminopeptidase qui libère des aa un à un en partant soit de l'extrémité C terminal ou N terminal.

(**Fig 42**) Une fois la digestion effectuée, comment les peptides passent-ils dans le sang ?
Le transport se fait principalement par un cotransport entre le sodium (Na⁺) et les aa. (Il peut aussi y avoir absorption de dipeptides par cotransports avec les ions H⁺). Enfin dans certains cas des tripeptides peuvent être absorbés par endocytose notamment dans le tube digestif immature des jeunes enfants. Le passage des entérocytes vers le sang se fait par diffusion simple ou diffusion facilitée.

D) Les lipides

(**Fig 43**) Deux actions pour digérer les lipides : la bile et de la lipase pancréatique.

- Les sels biliaires ont un effet détergent : ce sont des molécules dites amphipathiques (ou amphiphiles) ce qui permet d'émulsionner les gouttelettes lipidiques (grosse gouttelette de graisse fragmentée en plus petites gouttelettes : des micelles). Les molécules amphiphiles sont constituées de deux pôles : une tête hydrophile et une tête hydrophobe (comme la membrane plasmique).
- Cette émulsion favorise l'action de la lipase pancréatique qui est un enzyme hydrosoluble (agit sur les graisses par l'extérieur). 1 triglycéride libère un monoglycéride + 2 acides gras.

(**Fig 44**) Comment les lipides passent-ils dans le sang au niveau de la bordure en brosse, car ce sont des molécules hydrophobes ? .

Les acides gras et les lipides peuvent rentrer directement par diffusion sans transporter protéique. Dans le REL les acides gras et monoglycérides sont rassemblés en triglycérides. Ces triglycérides sont associés à des protéines, du cholestérol, des phospholipides dans l'appareil de Golgi. Il se forme alors des gouttelettes hydrosolubles (des chylomicrons). Ces chylomicrons sont exocytés et vont passer dans les vaisseaux chylifères qui sont plus perméables que les capillaires sanguins.

(**Fig 45, 46**) Les chylomircons appartiennent à la catégorie de lipoprotéines, ce sont des transporteurs de lipides dans l'organisme et notamment dans le sang et la lymphe.

E) Autres molécules

(**Fig 45 tout en bas**) Les acides nucléiques sont dégradés par des enzymes pancréatiques et des enzymes de la bordure en brosse et sont ensuite transportés par transport actif dans le sang. Les vitamines vont passer par diffusion et selon leurs catégories (liposoluble ou hydrosoluble) il peut y avoir un transporteur. L'absorption de la vitamine B12 est rendue possible par la production du facteur intrinsèque au niveau de l'estomac.

Les électrolytes (ions chargés) vont être absorbés au niveau de l'estomac et l'intestin grêle. Les ions vont passer par diffusion selon leurs gradients ou par un transporteur (un cotransport généralement).

Certains éléments sont absorbés directement en fonction du besoin (cas du fer ou du calcium).

L'eau : passe par osmose en même temps que les nutriments sont absorbés. (**Fig 55**) On peut distinguer l'eau produite par le tube digestif (production endogène) : 7L d'eau produite par le tube digestif. En plus il faut rajouter 1,5L d'eau de boisson => 8,5L d'eau présentés par jour à l'intestin. Il y a une perte de 200mL d'eau dans les matières fécales.