

Chapitre 4 Eléments de microbiologie du tube digestif

4.1. La microflore digestive de l'homme

Dans ses activités quotidiennes normales, le corps humain est exposé à d'innombrables micro-organismes dans l'environnement. En effet, les humains possèdent une vaste population de micro-organismes, principalement des bactéries sur la peau et les muqueuses qui tapissent la bouche, le tube digestif, et les systèmes de reproduction et d'excrétion, appelées collectivement la microflore normale. Le corps humain contient 10^{13} - 10^{14} cellules, mais 10^{14} - 10^{15} micro-organismes vivent sur ou dans le corps. La plupart de ces micro-organismes sont bénéfiques et d'autres sont nécessaires pour maintenir une bonne santé.

4.1.2. La colonisation du corps humain par les micro-organismes

Les mammifères *in utero* se développent dans un environnement stérile et sont à l'abri des micro-organismes. La colonisation et la croissance des micro-organismes dans les tissus de l'hôte, commence après la naissance. Les surfaces de la peau sont facilement colonisées par de nombreuses espèces. De même, la cavité buccale et le tractus gastro-intestinal vont acquérir des micro-organismes grâce à l'alimentation et à l'exposition du corps de la mère, qui, avec d'autres sources environnementales, initie la colonisation de la peau, de la cavité buccale, le tractus respiratoire supérieur et du tractus gastro-intestinal. Différentes populations de micro-organismes colonisent les individus dans différentes localités et à des moments différents. Par exemple, *Escherichia coli*, qui est un micro-organisme normal de l'intestin de l'homme et des animaux, colonise les intestins des enfants dans les pays en voie de développement au bout de quelques jours après la naissance. Alors que, les nourrissons dans les pays développés, ne vont l'acquérir qu'après plusieurs mois ; les premiers micro-organismes à coloniser l'intestin de ces nourrissons seraient plus typiquement des *Staphylococcus aureus* et d'autres micro-organismes associés à la peau. Les facteurs génétiques jouent aussi un rôle.

4.1.3. Fonctions du système digestif

Le tractus gastro-intestinal est responsable de la digestion des aliments, l'absorption des nutriments, ainsi que la production d'éléments nutritifs par la microflore indigène. Dans un processus appelé l'absorption, les produits finaux de la digestion passent de l'intestin grêle dans le sang ou la lymphe pour être distribués aux cellules du corps. Ensuite, l'aliment se déplace à travers le gros intestin, où l'eau, les vitamines et les nutriments sont absorbés.

Au cours d'une durée de vie moyenne, environ 25 tonnes de nourriture passent à travers le tractus gastro-intestinal. Les solides non digérés résultants, appelés fèces, sont éliminés de l'organisme à travers l'anus. Le Gaz intestinal (flatulence) est un mélange d'azote de l'air et les produits d'ingestion de la voie microbienne : le dioxyde de carbone, l'hydrogène et le méthane. En moyenne, nous produisons 0,5 à 2,0 litres de flatulences chaque jour.

Le tractus gastro-intestinal est adapté à l'absorption des nutriments qui le traversent. Cependant, en même temps que les nutriments absorbés des microbes nocifs peuvent être ingérés en même temps que les aliments et l'eau. Un important facteur de défense dans ce cas est le contenu de l'estomac élevé en acides, ce qui élimine de nombreux microbes ingérés potentiellement nocifs. L'intestin grêle possède également des défenses antimicrobiennes importantes. Parmi ces défenses significative citons les millions de cellules spécialisées granulaires, appelées cellules de *Paneth*. Celles-ci sont capables de phagocyter les bactéries, et produisent également des protéines antibactériennes appelées *defensines* et le lysozyme antibactérien.

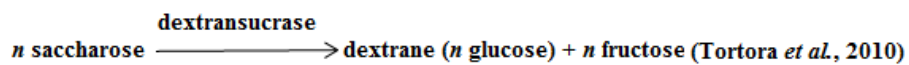
4.1.4. Microorganismes de la cavité buccale

La cavité buccale est un habitat microbien complexe et hétérogène. La salive contient des substances nutritives microbiennes en faible concentration. Mais elle contient aussi des substances antibactériennes tels que le lysozyme, enzyme qui clive les liaisons glycosidiques dans le peptidoglycane de la paroi cellulaire bactérienne, ce qui affaiblit la paroi et provoquant la lyse des cellules. La Lacto-peroxydase, une enzyme présente dans le lait et la salive, tue les bactéries par une réaction dans laquelle l'oxygène est généré. En dépit de l'activité de ces substances antibactériennes, les particules alimentaires et les débris cellulaires fournissent de fortes concentrations de nutriments à proximité des surfaces telles que les dents et les gencives, ce qui crée des conditions favorables à la croissance extensive locale microbiennes. Plus de 700 espèces de bactéries ont été isolées à partir de la cavité buccale. La plupart d'entre elles ne peuvent pas être cultivées par les procédés classiques.

Les bactéries présentes dans la bouche au cours de la première année de vie sont principalement des anaérobies aérotolérants telles que les streptocoques et les lactobacilles. Cependant, d'autres bactéries, y compris certains aérobies, sont présentes. Lorsque les dents apparaissent, l'équilibre va vers les anaérobies qui sont spécifiquement adaptées à la croissance sur les surfaces des dents et dans les crevasses gingivales. Parmi

les espèces les plus répandues: *Actinomyces* (4%), *Bacteroidetes* (2,4%), *Capnocytophaga* (2,6%) *Lachnospiraceae* (2,4%), *Lactobacillus* (3,4%), *Leptotrichia* (3,2%), *Neisseria* (3,2%), *Prevotella* (8,9%), *Selenomonas* (3,6%), *Streptococcus* (6,6%) et *Treponema* (7,9%). Bien que la plupart de ces micro-organismes ont un métabolisme aérobie facultative, quelques-uns tels que *Bacteroidetes* sont anaérobies stricts, et d'autres comme *Neisseria* ont un métabolisme aérobie. Cette liste des genres ne représente qu'environ 48 % de toutes les espèces identifiées. Probablement la plus importante est la bactérie cariogène (causant les caries) *Streptococcus mutans*, coque à gram-positif qui est capable de métaboliser un très large éventail d'hydrates de carbone, plus que tout autre micro-organisme à gram-positif. D'autres espèces de streptocoques sont également cariogènes mais joueraient un rôle moins important dans l'initiation des caries.

La colonisation bactérienne de la surface des dents commence par la fixation des cellules bactériennes individuelles. Même sur une surface de dent fraîchement nettoyée, des glycoprotéines acides provenant de la salive forment un film organique mince de quelques micromètres d'épaisseur. Ce film présente un site de fixation de micro-colonies bactériennes. Les bactéries hydrolysent en premier le saccharose en monosaccharides constitutifs, le fructose et le glucose. La glucosyl-transférase alors assemble les molécules de glucose en dextrane. Le fructose résiduel primaire est alors fermenté en acide lactique. Les accumulations de bactéries et de dextrane qui adhèrent aux dents forment la plaque dentaire.



Si la plaque continue de se former, les anaérobies filamenteux tels que les espèces *Fusobacterium* commencent à se développer. Les bactéries filamenteuses sont incorporées dans la matrice formée par les streptocoques et s'étendent perpendiculairement à la surface de la dent, ce qui rend la couche de bactéries de plus en plus épaisse. Associés aux bactéries filamenteuses on retrouve des spirochètes comme les espèces de *Borrelia*, des bacilles à Gram positif, à Gram négatif et coques. Dans les plaques épaisses, les anaérobies stricts filamenteux tels que *Actinomyces* peuvent prédominer. Ainsi, la plaque dentaire est un **biofilm**, constitué par une couche relativement épaisse de bactéries appartenant à des genres différents, ainsi que des produits bactériens accumulés.

La nature anaérobie de la microflore buccale peut paraître surprenante compte tenu de l'apport d'oxygène par la bouche. Cependant, l'anoxie se développe en raison de l'activité métabolique des bactéries facultatives qui poussent sur des matières organiques à la surface de la dent. L'accumulation de la plaque produit une matrice dense qui diminue la diffusion de l'oxygène à la surface de la dent, en formant un microenvironnement anoxique. Les populations microbiennes dans la plaque dentaire existent dans un microenvironnement qu'elles ont construit et se maintiennent dans des conditions macro-environnementales subissant ainsi les grandes variations de la cavité buccale.

4.1.5. Micro-biote normale de l'appareil digestif

Dans la bouche, chaque millilitre de salive peut contenir des millions de bactéries. L'estomac et l'intestin grêle ont relativement peu de micro-organismes en raison de l'acide chlorhydrique produit par l'estomac et le mouvement rapide des aliments dans l'intestin grêle. En revanche, le gros intestin contient d'énormes populations microbiennes, dépassant 100 milliards de bactéries par gramme de fèces (Jusqu'à 40 % de la masse fécale est composée de cellules microbiennes). La population du gros intestin est composée principalement d'anaérobies et anaérobies facultatifs. La plupart de ces bactéries participent à la dégradation enzymatique des aliments, en particulier de nombreux polysaccharides qui seraient non digestible. En plus de la synthèse par certains de vitamines utiles.

4.1.5.1. L'estomac

Étant donné que les fluides de l'estomac sont très acides (pH environ 2), celui-ci est une barrière chimique à l'entrée de micro-organismes dans le tractus gastro-intestinal. Des études utilisant des séquences d'ARNr 16S indiquent que l'estomac renferme une population microbienne composée de plusieurs phylums bactériens. Ces populations comptent plusieurs espèces de bactéries gram-positives ainsi que des espèces de *Protéobactéries*, *Bacteroidetes*, *Actinobactéries*, et *Fusobacteria*. *Helicobacter pylori*, l'organisme le plus commun des parois de l'estomac, peut causer des ulcères chez les hôtes sensibles. Certaines des bactéries qui peuplent l'estomac sont constituées d'organismes présents dans la cavité buccale, introduites avec le passage des aliments.

La flore intestinale chez l'homme varie considérablement et est quelque peu dépendante de l'alimentation. Les personnes qui consomment une quantité considérable de viande montrent un plus grand nombre de *Bacteroides* et une baisse du nombre de coliformes et de bactéries lactiques par rapport aux individus avec un régime végétarien.

4.1.5.2. L'intestin grêle

L'intestin grêle a deux environnements distincts, le duodénum et l'iléon, qui sont reliés par le jéjunum. Le duodénum, à côté de l'estomac, est relativement acide et sa microflore normale ressemble à celle de l'estomac. Du duodénum à l'iléon, le pH devient progressivement moins acide et le nombre de bactéries est en constante augmentation. Dans la partie basse de l'iléon, le nombre cellulaire est compris entre 10^5 - 10^7 / gramme de contenu intestinal, même si l'environnement devient de plus en plus anoxique. Les bactéries Fusiforme anaérobies sont typiquement présentes, attachées par une extrémité à la paroi intestinale.

4.1.5.3. Le gros intestin

L'iléon se déverse dans le caecum, la partie de raccordement du gros intestin. Le côlon constitue le reste du gros intestin. Dans le côlon (cuve de fermentation), les bactéries sont présentes en quantités énormes, en utilisant les nutriments issus de la digestion de la nourriture. Les bactéries aérobies facultatives tels que *Escherichia coli* sont présentes, mais en plus petit nombre que les autres bactéries ; en effet ces aérobies facultatifs représentent moins de 10^7 /gramme du contenu intestinal. Les bactéries aérobies facultatives consomment tout l'oxygène, ce qui fait que le gros intestin est strictement anoxique. Cette condition favorise la croissance des anaérobies stricts, y compris les espèces de *Clostridium* et *Bacteroides*.

Le nombre total d'anaérobies stricts dans le côlon est énorme, il serait de l'ordre de 10^{10} à 10^{11} cellules/g dans l'intestin distal et contenus fécaux, avec des *Bacteroidetes* et des espèces Gram- positives qui représentent plus de 99% de toutes les bactéries. Les *Archaea* tels que les méthanogène *Methanobrevibacter smithii* est significativement représenté. Les protistes sont absents du tractus gastro-intestinal des humains en bonne santé.

4.1.6. Fonctions et produits de la microflore intestinale

Les micro-organismes intestinaux effectuent une grande variété de réactions métaboliques essentielles qui produisent divers composés. La composition de la microflore intestinale et le régime alimentaire influent sur le type et la quantité des composés produits. Parmi ces produits, on retrouve les vitamines B12 et K. Ces vitamines essentielles ne sont pas synthétisées par l'homme, mais par la microflore de l'intestin ensuite absorbées. En outre, les stéroïdes qui sont produits dans le foie et libérés dans l'intestin par la vésicule biliaire en temps qu'acides biliaires, sont modifiés au niveau de l'intestin par cette microflore intestinale; les composés stéroïdiens modifiés et bioactifs sont ensuite absorbés par l'intestin.

4.1.6.1. Autres produits générés par les activités de fermentation bactériennes méthanogènes.

Pendant le passage des aliments dans le tractus gastro-intestinal, l'eau est absorbée à partir de la matière digérée, qui progressivement devient plus concentrée et est converti en matières fécales. Les bactéries représentent environ un tiers du poids de la matière fécale. Ces organismes vivent dans la lumière du gros intestin sont constamment déplacés vers le bas par le flux de matière, et des bactéries qui sont perdu sont constamment remplacées par une nouvelle croissance. Ainsi, le gros intestin possède des propriétés de culture continue d'un **chémostat**. Le temps nécessaire pour le passage d' matière à travers le tractus gastro-intestinal complet est d'environ 24 h chez les humains ; le taux de croissance des bactéries dans la lumière est de une à deux fois par jour. Chez l'homme, environ 10^{13} cellules bactériennes sont éliminées par jour dans les fèces.

4.1.6.2. Modification de la microflore normale

Lorsque les antibiotiques sont administrés par voie orale, ils inhibent la croissance des agents pathogènes, ainsi que celle de la flore normale, ce qui conduit à la perte de bactéries sensibles aux antibiotiques dans le tractus intestinal. Ceci est souvent signalé par des selles molles ou de diarrhées. En l'absence de la gamme complète de la flore normale, les micro-organismes opportunistes telles que les résistants aux antibiotiques *Staphylococcus* , *Proteus*, *Clostridium difficile* , ou la levure *Candida albicans* peuvent s'établir. La mise en place de ces agents pathogènes opportunistes peut conduire à une détérioration de la fonction digestive ou même à la maladie. Par exemple, un traitement antibiotique permet à certains microorganismes tels que *C. difficile* (qui sont moins sensibles aux antibiotiques) de se développer sans la concurrence de la flore normale, ce qui provoque l'infection et la colite. Lorsque le traitement antibiotique est terminé, cependant, la flore intestinale normale est rétablie rapidement chez les adultes. Pour accélérer la mise en place d'une flore compétitive, la recolonisation de l'intestin par l'espèce désirée peut être accomplie par l'administration de probiotiques.

4.1.6.3. Probiotiques

Les probiotiques (pro = pour, bios = vie) sont cultures vivantes de bactéries intestinales qui, lorsqu'ils sont appliqués à un hôte par administration ou par ingestion, peuvent conférer un effet bénéfique pour sa santé. En effet, la recolonisation rapide de l'intestin peut rétablir une flore locale compétitive et fournir des produits métaboliques microbiens souhaitables. Les probiotiques peuvent être administrés avec des prébiotiques, qui sont des produits chimiques qui favorisent sélectivement la croissance des bactéries bénéfiques. Plusieurs

études ont montré que l'ingestion de certaines bactéries lactiques (LAB) peut soulager la diarrhée et empêcher la colonisation par *Salmonella enterica* au cours d'un traitement antibiotique. Les probiotiques sont couramment utilisés dans la production des animaux d'élevage pour éviter les problèmes digestifs. Par exemple, des souches de *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *Bacillus* et *Saccharomyces* ont été utilisés avec succès à cette fin. Un certain nombre de maladies humaines répondent positivement à l'administration de probiotiques. Par exemple, la diarrhée des enfants infectés par un rotavirus peut être raccourcie par l'administration de plusieurs préparations de probiotiques. *Saccharomyces* (levure) peut réduire la récurrence de la diarrhée et des infections dues à *Clostridium difficile*. En effet, lorsque les LAB colonisent le gros intestin, l'acide lactique et des bactériocines qu'elles produisent peuvent inhiber la croissance de certains organismes pathogènes.

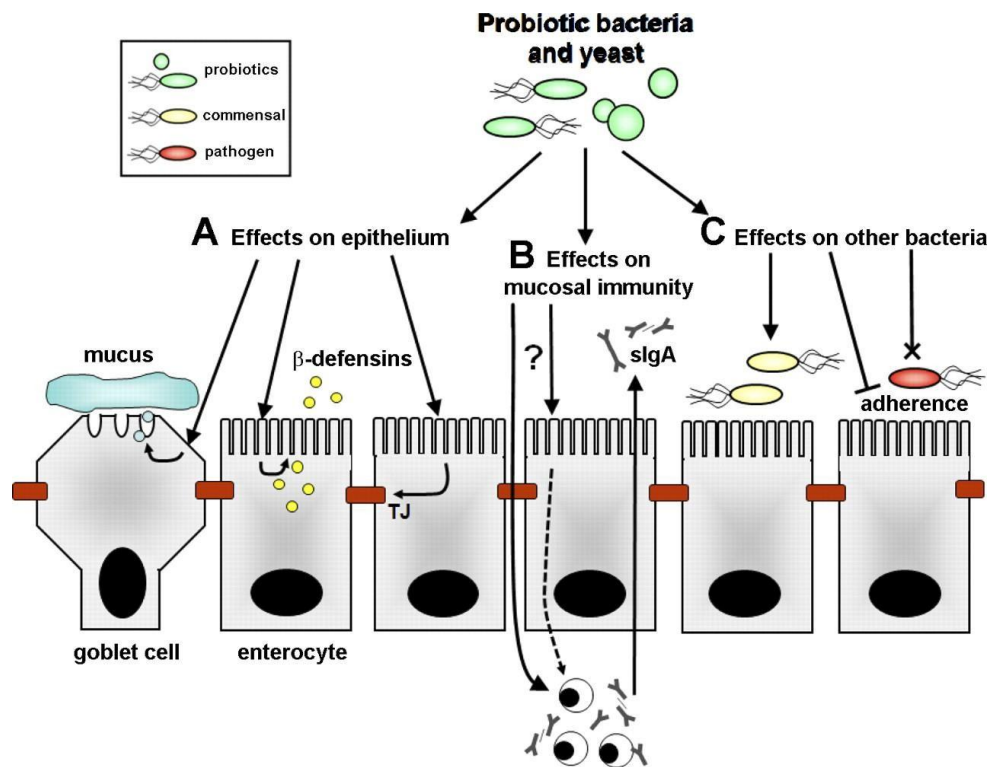


Figure 1. Effets des bactéries **Probiotiques** et des levures sur la fonction de barrière de l'épithélium intestinal. (Ohland and MacNaughton, 2010)

4.2. La microflore du tube digestif des ruminants

4.2.1. Anatomie du tube digestif

Le tube digestif polygastrique (plusieurs estomacs) caractérise de manière générale les animaux domestiques Ruminant. Il est très différencié caractérisés par plusieurs particularités anatomiques et physiologiques (Figure 2)

4.2.1.1. Cavité buccale

La cavité buccale assure la préhension des aliments et la rumination mérycisme.

Cette cavité se caractérise par

- Préhension des aliments (prise alimentaire), la langue (chez les bovins), les lèvres (chez le mouton)
- Absence d'incisives sur la mâchoire supérieure, contrairement aux monogastriques qui possèdent des incisives sur les mâchoires supérieure et inférieures
- Forte insalivation (grande quantité de salive émise au cours de la prise alimentaire et de la mastication.
- Mastication et broyage des aliments
- Reflexe de déglutition (passage des aliments vers l'œsophage)

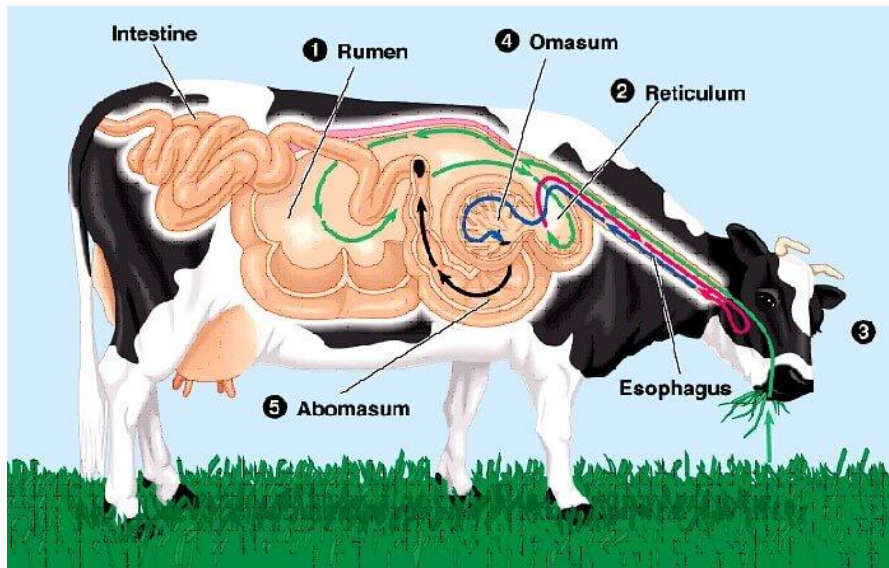


Figure 2. Anatomie du tube digestif des ruminants.

4.2.1.2 Œsophage

L'œsophage est un tube qui va du pharynx au rumen (panse) en se rétrécissant (1 à 1,5 m de long). C'est un organe de transit, sa paroi muqueuse est un simple épithélium pavimenteux non glandulaire. L'œsophage permet l'acheminement des aliments vers l'estomac.

4.2.1.3. Estomac

Plusieurs cavités constituent le système digestif chez le ruminant, comprenant quatre parties nettement distinctes extérieurement. Ce sont successivement le rumen (ou panse), le réseau (ou réticulum) et le feuillet (ou omasum) et la caillette (ou Abomasum). Les trois premières représentent les pré-estomacs, dont la paroi muqueuse est un simple épithélium non glandulaire et sont placées avant le vrai estomac (Chimique) qui est la caillette. Ces trois pré-estomacs, agissant comme des tamis de plus en plus étroits, et visent à réduire progressivement la taille et l'état structurel des matières ingérées. Cet ensemble est très volumineux, il occupe une grande partie de la cavité abdominale et représente environ les deux tiers.

4.2.1.4 Rumen (ou panse)

Le rumen ou la panse, est la cavité la plus volumineuse. C'est un vaste sac bilobé, allongé d'avant en arrière et légèrement aplati d'un côté à l'autre. Il est situé dans les parties gauche et ventrale de l'abdomen. Il s'étend du diaphragme au bassin. La musculature est importante et comporte des piliers charnus qui divisent le rumen en deux sacs. La muqueuse sécrétrice porte de nombreuses papilles aplaties (de 2 mm à 2 cm).

- il renferme de 70 à 75 % du contenu du tube digestif et représente de 50 à 60 % de son volume (150 à 250 litres chez les bovins adultes).

- Il constitue une vraie cuve de stockage pour les aliments

- Sa paroi muqueuse est un simple épithélium non glandulaire

- Une forte population de micro-organisme colonise le rumen, constituée de millions de bactéries et de protozoaires qui permettent la dégradation des aliments présents.

- Il constitue une cuve de fermentation non glandulaire

- Le rumen ne se développe chez le jeune que lorsqu'il commence à manger l'aliment solide.

Le contenu du rumen n'est pas réparti de façon homogène, en partie ventrale, on trouve une phase liquide, en partie intermédiaire une phase solide et en partie dorsale une phase gazeuse.

- Phase liquide, a pour origine l'abreuvement (50 à 100 L par jour), la salivation (80 à 200 L par jour) et l'eau contenue dans les aliments. L'eau est le constituant principal du contenu ruminal (85 %), et se trouve principalement dans la phase liquide contenant de fines particules en suspension (particules alimentaires ou bactéries) et des molécules en solution (sels minéraux, petites molécules organiques). Cette phase liquide permet l'imbibition des aliments.

- Phase solide, se concentre dans un amas fibreux en partie dorsale du rumen et a pour origine l'ingestion d'aliments.

- Phase gazeuse, comprend majoritairement les gaz issus des fermentations microbiennes. Ces gaz sont éliminés par éructation.

4.2.1.5 Réseau, ou *réticulum* ou bonnet

Le **réseau** est le plus petit et le plus crânial des pré-estomacs (petit réservoir : 12 L chez les bovins, 1L ovins, 1 à 2,3L caprins). Le réseau (ou *réticulum*) doit son nom à sa muqueuse réticulée et parsemée de papilles absorbantes. Il est situé à proximité du diaphragme et du cœur (2 à 4cm). Il est considéré comme un diverticule du rumen (situé entre le rumen et le diaphragme). Il a la forme d'un sac aplati dont la face diaphragmatique est moulée sur le diaphragme.

- Il joue un rôle central dans la circulation des particules.
- Les particules qui franchissent l'orifice réticulo-omasal doivent avoir une taille moyenne inférieure ou égale à 1 mm.
- De ce fait, les aliments solides sont donc retenus tant qu'ils n'ont pas atteints cette taille minimale

4.2.1.6 Feuillet ou omasum

Le feuillet est le dernier pré-estomac. Il est placé entre le rumen et la caillette. Il a la forme d'un ballon rond légèrement aplati (20L chez les bovins, 0,2L ovins, 1,2L chèvre). Sa face viscérale est accolée au rumen. Sa face pariétale est tournée à droite et en avant. Le feuillet est presque entièrement occupé par des lames parallèles, de hauteurs inégales, disposées dans le sens du transit alimentaire. Entre ces lames, on retrouve des aliments très fins et secs. Le canal du feuillet a un contenu liquidien.

- Ces lamelles ou feuilles de hauteurs inégales, sont disposées dans le sens du transit alimentaire.
- Son volume représente 7 % de la capacité total du Tube Digestif. (12-20 l, chez la VL ; 0,5 l chez le mouton)
- Lieu de transit rapide et de l'absorption d'eau.
- Il communique en aval avec la caillette par un orifice large et dilatable.
- Sa paroi musculaire est épaisse et forte et permet l'essor de l'eau de l'aliment avant son évacuation vers l'abomasum. L'épithélium de la muqueuse du feuillet est de même nature que celui du rumen (sa muqueuse est non sécrétrice). C'est au niveau du feuillet que se produit une grande partie de l'absorption de l'eau et des sels minéraux présents dans le contenu du rumen réseau.

4.2.1.7. Caillette (ou abomasum)

La caillette est comparable à l'estomac des monogastriques, **sa muqueuse est sécrétrice** : elle synthétise le suc gastrique contenant de l'eau, de l'acide chlorhydrique et de la pepsine (C'est l'estomac chimique des ruminants). La caillette a la forme d'une poire, disposée longitudinalement, à droite du rumen (20L bovins, 2L ovins, 2 à 4L caprins). Elle est tapissée par une muqueuse peptique. Celle-ci est plus épaisse dans la partie pylorique que dans la partie fundique.

Les fonctions digestives de la caillette des ruminants sont analogues à celles de l'estomac des mammifères mono-gastriques. Secrète HCl, pepsine, Les sucs digestifs permettent une dégradation des protéines, hydrates C, et lipides en substances plus simples qui peuvent passer à l'intestin grêle pour plus de digestion et pour l'assimilation.

4.2.1.8 Intestin

L'intestin est divisé en deux parties :

- **L'intestin grêle** : Il est très long 40 à 45 m / 70 L chez les bovins. Les trois portions de l'intestin grêle sont le duodénum, le jéjunum et l'iléon. Les mécanismes de la digestion enzymatique et de l'absorption dans l'intestin grêle sont les mêmes que chez les monogastriques.

L'anse duodénale, qui constitue la première partie reçoit les sécrétions biliaires et pancréatiques.

- **Le gros intestin** : 10 m (30L bovins), il ne sécrète pas de sucs digestifs. Le gros intestin est composé de :

*Cæcum 0,9 m (10 L bovins), le cæcum a une forme cylindrique et légèrement sigmoïde. Son diamètre est d'environ 10 cm. Il est en continuité avec le côlon ascendant.

*Côlon, il est toujours visible depuis le flanc. Il est situé médialement au duodénum descendant. Les anses du côlon se différencient aisément des anses de l'intestin grêle de par leur contenu très gazeux.

*Rectum, continu par le canal anal

.Le gros intestin est caractérisé par, l'absence de sucs digestifs, une faible digestion microbienne et c'est le lieu de l'absorption et de la réabsorption de l'eau.

4.2.1.9 Glandes annexes

Elles présentent quelques particularités

- Glandes salivaires : Elles sont très développées et sécrètent 100-200 L/j de salive chez un gros bovin et 10L/j chez un ovin. Elles jouent un rôle important dans l'humidification du bol alimentaire, la sécrétion est continue mais elle augmente fortement pendant la mastication. La salive ne contient pas de ptyaline. Son pH égal à 8,2 constitue une véritable solution tampon.

- Bile : Elle n'a pas un rôle important chez les ruminants qui ingèrent peu de lipides

4.2.2. Le rumen et son écosystème microbien

Le rumen abrite donc des conditions physicochimiques très particulières permettant le développement d'un microbiote anaérobie très actif.

Le rumen accueille un microbiote diversifié: environ 200 espèces de bactéries (10^{10} à 10^{11} bactéries par mL), des protozoaires (de 10^4 à 10^6 par mL) et des champignons (entre 10^3 et 10^5 zoospores par mL – les zoospores sont des spores mobiles flagellées participant à la reproduction de certains Eumycètes). On trouve également entre 10^7 et 10^9 particules de virus bactériophages par mL.

4.2.2.1. Les Bactéries

Les Bactéries correspondent à un peu plus de la moitié de la biomasse microbienne du rumen. Les trois quarts de ces Bactéries sont fixés sur des particules alimentaires. Elles sont constamment éliminées par prédation des protozoaires ruminiaux ou évacués vers le feuillet et le reste du tube digestif. Néanmoins, ces pertes sont compensées par une croissance régulière de la population bactérienne.

Cette population est de loin la plus active. Les Bactéries du rumen sont généralement classées selon leur capacité à dégrader certains substrats et à les utiliser pour leur survie. En particulier elles sont souvent distinguées en fonction de leur activité glucidolytique : fibrolytique ou amylolytique.

Les principales espèces fibrolytiques sont *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus albus*, *Ruminococcus flavefaciens* et *Butyrivibrio fibrisolvens*. Ces Bactéries adhèrent aux particules fibreuses et synthétisent des enzymes actives sur les glucides pariétaux (cellulose, hémicelluloses et pectines). Cette population se développe mieux avec un pH supérieur ou égal à 6,5. Les principales espèces amylolytiques (digérant l'amidon) sont *Streptococcus bovis*, *Ruminobacter amylophilus*, *Succinomonas amylolytica*, *Selenomonas ruminantium* et *Prevotella ruminicola*. Elles préfèrent des pH inférieurs à 6.

Il n'existe pas de bactérie strictement protéolytique : ce sont en grande partie les Bactéries amylolytiques (et certaines Bactéries fibrolytiques) qui exercent cette fonction.

Les lipides sont soumis à deux types de réactions qui s'enchaînent : la lipolyse des esters d'acides gras suivie par la biohydrogénation des acides gras insaturés.

La lipolyse est principalement réalisée par *Anaerovibrio lipolytica*, et certains représentants du genre *Butyrivibrio*.

La biohydrogénation ruminale est complexe : elle se divise en plusieurs étapes successives d'isomérisations et de réductions et elle nécessite l'intervention de plusieurs enzymes synthétisées par des espèces différentes. Les Bactéries impliquées dans ce phénomène ne sont pas encore très bien connues si ce n'est celles appartenant au genre *Butyrivibrio*.

4.2.2.2. Les protozoaires

Les protozoaires ruminiaux (comme *Endotinium caudatum* ou *Epidinium ecaudatum*) sont des organismes eucaryotes unicellulaires microscopiques. Ils sont de taille variable, 20 à 100 fois plus grands que les Bactéries mais 10^4 fois moins nombreux. Ils peuvent représenter jusqu'à 40 % de la biomasse microbienne. La plupart des protozoaires sécrètent des enzymes (protéolytiques, fibrolytiques, amylolytiques) participant à la digestion des particules ingérées.

Les protozoaires sont des prédateurs des Bactéries et récupèrent les acides aminés, les peptides et les acides nucléiques bactériens pour les incorporer dans leur propre organisme.

4.2.2.3. Les Champignons

Les Champignons appartenant principalement aux genres *Neocallimastix*, *Piromyces* et *Caecomyces*, sécrètent de nombreuses enzymes intervenant dans la digestion des glucides pariétaux, mais ont un rôle mineur par rapport aux bactéries. Ils ont une activité protéolytique faible. Leur contribution à la dégradation des glucides cytoplasmiques est peu connue.

4.2.2.4. Les Archées

Au sein du microbiote ruminal, figurent également des Archées méthanogènes qui utilisent le dihydrogène produit par le métabolisme bactérien en conditions anaérobies pour réduire le dioxyde de carbone en méthane. Cette réaction est nécessaire car la présence en excès de dihydrogène inhiberait les fermentations et donc le fonctionnement du rumen. Dans le gros intestin ce sont principalement les Bactéries acétogènes qui remplissent cette fonction. Les Archées ne participent pas directement à la digestion ruminale. Elles forment une population peu abondante et probablement peu diversifiée et encore peu connue, mais qui serait peu diversifiée.

Le rumen est donc un fermenteur, présentant des conditions physicochimiques particulières, qui permet la multiplication d'un microbiote anaérobie. Il permet ainsi aux Ruminants de tirer parti des fibres végétales. Nous allons maintenant nous intéresser aux processus de dégradation des principaux composants alimentaires.

4.2.3. Digestion des aliments d'origine végétale par les microorganismes ruminiaux

Les digestions ruminales sont réalisées par des Bactéries, des protozoaires, des Archées et des Champignons. Ces microorganismes dégradent les glucides en acides gras volatils, transforment une partie des protéines ingérées, et hydrolysent les triglycérides et autres esters, puis assurent l'hydrogénation de la majorité des acides gras insaturés (Figure 3).

Selon la nature du glucide fermenté, on différencie deux types de bactéries. Les bactéries amylolytiques, dont le substrat privilégié est l'amidon, synthétisent essentiellement du propionate et préfèrent les pH inférieurs à 6. Les bactéries fibrolytiques s'attaquent quant à elles surtout aux glucides pariétaux pour donner majoritairement de l'acétate et du butyrate, et affectionnent les pH supérieurs à 6.

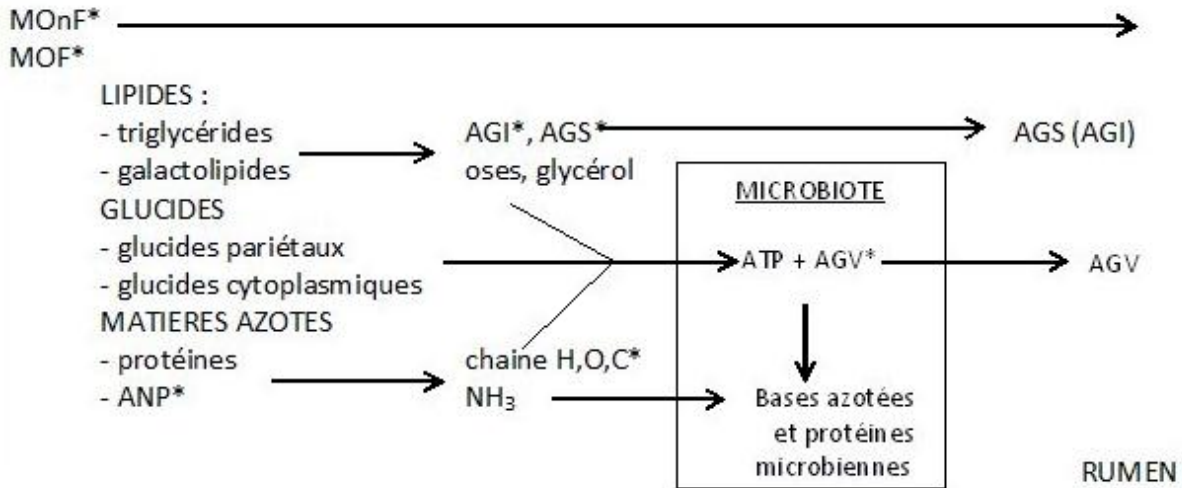


Figure 3. La digestion ruminale des aliments. MONF : matière organique non fermentée, MOF : matière organique fermentée, ANP : azote non protéique, AGS : acides gras saturés, AGI : acides gras insaturés, AGV : acides gras volatils. (Meynadier *et al.*, 2021).